

De l'origine du langage
à l'origine des langues :
Modélisations de l'émergence et de
l'évolution des systèmes linguistiques

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 6 Janvier 2003

pour l'obtention du

Doctorat de l'université Louis Lumière – Lyon 2
(spécialité Sciences Cognitives, option Linguistique)

par

Christophe Coupé

Composition du jury

<i>Président :</i>	Prof. Jean Jacques Hublin	Université de Bordeaux 1
<i>Rapporteurs :</i>	D.R. Bernard Victorri D.R. Alain Peyraube	Ecole Normale Supérieure de Paris Centre de recherches linguistiques sur l'Asie Orientale
<i>Examineurs :</i>	Prof. Jean-Marie Hombert D.R. Dan Sperber	Université Lyon 2 (Directeur de thèse) Institut Jean Nicod

Mis en page avec la classe thloria.

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce à une allocation de recherche du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

Mes premiers remerciements vont à Jean-Marie Hombert, pour son encadrement durant ces trois dernières années. Son enthousiasme, ses vastes connaissances et compétences tant à propos de la recherche que de ceux qui la font m'ont définitivement inoculé la passion du chercheur. Les innombrables opportunités qu'il m'a offertes et la confiance qu'il m'a accordé tout au long de mon travail ont fait de celui-ci un plaisir.

Je remercie également l'ensemble des autres membres du jury, Messieurs Alain Peyraube, Bernard Victorri, Dan Sperber et Jean-Jacques Hublin pour l'honneur et le grand plaisir qu'ils me font de juger mon travail. Les interactions que j'ai pu établir avec eux au cours des dernières années et leur grande expertise scientifique ont enrichi mes connaissances tout comme mon intérêt pour l'origine de l'homme et du langage.

Je suis redevable à tous les membres du laboratoire *Dynamique du Langage*, pour leur gentillesse et l'aide constante qu'ils ont pu m'apporter au cours de mon travail.

Mes remerciements les plus sincères vont à Egidio Marsico, de qui je suis redevable de nombre des idées présentes dans ce document. Que ce soit au cours de nos longues discussions parfois acharnées, de nos trépidantes simulations informatiques (!) ou de nos explorations new-yorkaises, son perpétuel soutien, sa gentillesse et son efficacité m'ont été d'une grande aide tout au long de cette thèse. Merci aussi à François Pellegrino pour sa disponibilité et son aide précieuse, et sans oublier Jean-Philippe Magué et Emmanuelle Perrone, qui m'ont supporté avec patience et qui ont toujours pris sur leur temps pour échanger idées et impressions sur tout sujet.

Au professeur Hélène Paugam-Moisy, pour m'avoir fait découvrir le domaine fascinant des sciences cognitives.

Au professeur William Shi-Yuan Wang, pour la grande opportunité qu'il m'a offerte de travailler à plusieurs reprises au sein de son laboratoire à Hong Kong, et dont la richesse des recherches est une référence à mes yeux.

A tous mes amis et collègues rencontrés à Hong Kong, Jinyun Ke, Liu Juan, Wang Feng, Bong Au, James Minett, Peng Gang, Charles, Merritt Ruhlen, Tom Schoenemann, Thomas Lee, Georges van Driem, qui ont contribué à rendre cette ville encore plus magique à mes yeux.

A Magali (42), Blandine, Elsa, Samantha, Frédérique, Magali, Anne, Sandra, Guillaume, Arnaud, Alex, Julien, Fro, Nathalie, Claudia, Badara et tous les autres pour les nombreux très bons moments passés ensemble. Merci tout particulièrement à Frédéric pour son entêtement à modérer de façon juste toutes mes idées.

A Sau Ying "Tiu tiu malo", pour son affection et sa joie de vivre.

A mes parents et grands-parents, mon frère et ma sœur, qui m'ont supporté pendant si longtemps et tant appris.

*Sur ma table, se trouve un biface qui n'a pas été déplacé durant cent millions d'années, malgré le passage de toutes les espèces du néolithique. Et cent millions d'années plus tard, je l'ai ramassé.
N'est-ce pas une invitation au silence, à la méditation et à l'espérance dans la pérennité?
Théodore Monod*

Résumé

La problématique de l'origine du langage connaît un intérêt croissant depuis une quinzaine d'années grâce au concours de différentes disciplines : linguistique, informatique, génétique... Parallèlement, la linguistique historique postule l'impossibilité de reconstruire sur la base des données linguistiques contemporaines les langues parlées il y a plus de 8,000 ans.

Notre travail porte sur l'origine des langues et l'évolution de la diversité linguistique en lien avec l'origine et l'évolution du langage. L'objectif est de franchir la limite imposée par le rythme des évolutions linguistiques grâce à l'intégration de données pluridisciplinaires. Nous recourons principalement à des modèles informatiques, développés sur une plate-forme logicielle baptisée LEMMingS (Language Evolution Modelling and Monitoring System).

Notre approche s'articule sur une description systémique du langage, centrée sur les notions de structures, de contraintes, et de trajectoires évolutives dans un espace des possibles linguistiques. Les spécificités de cette approche sont mises au profit d'un scénario d'émergence des langues, qui s'appuie à la fois sur un modèle probabiliste d'émergence des innovations culturelles, et sur la structure sociale des populations préhistoriques. Nous avançons l'hypothèse d'une polygenèse structurelle des composantes qui bâtissent les systèmes linguistiques, en reflet des évolutions cognitives et physiologiques qui jalonnent la phylogénie humaine. A la recherche des composantes qui fondent la modernité des langues actuelles, nous étudions alors les traversées maritimes vers l'Australie il y a plus de 60,000 ans pour mettre au jour des indices d'un système de communication moderne. Nous défendons l'idée de traversées intentionnelles, "à vue", et sous-tendues par un langage permettant le partage de représentations cognitives liant différents épisodes temporels. Nous étudions enfin l'évolution ancienne des langues grâce à un modèle des changements, en projetant les propositions de la sociolinguistique contemporaine sur les structures sociétales du passé. Ce modèle est également l'occasion de présenter un cadre unifié des différents changements linguistiques.

Mots-clés: émergence du langage, origine des langues, diversité linguistique, systémique, polygenèse, modélisation, traversées maritimes, paléo-démographie.

Abstract

The study of the origins of language has become increasingly popular for the last fifteen years. This trend is mostly due to the fruitful convergence of various disciplines : linguistics, genetics, computer science, anthropology. . . However, as the investigations spread to remote periods of our past, most of the historical linguists agree on the limit of 8,000 years to reconstruct ancestral languages on the sole basis of linguistic data.

Our work focuses on the origin of languages and the evolution of linguistic diversity, in link with the emergence and evolution of language. We aim at crossing the gap postulated by the former scholars, and to this end, rely mostly on computer models, developed with a home-made software : LEMMingS (Language Evolution Modelling and Monitoring System).

Our approach is centered on a systemic description of language, based on notions as structures, constraints, and evolutionary trajectories in a space defined by the possible states that a linguistic system can adopt. This approach and its specificities build a framework for the emergence of languages, which takes into account both a probabilistic model of the emergence of cultural innovations, and the social structures of prehistoric populations. We propose that most of the building blocks of modern languages appeared through a structural polygenesis, hence reflecting the evolution of our cognitive and physiological capacities. Looking for the components at the roots of truly modern languages, and the related cues of modern behaviors, we investigate the first sea-crossings to Australia more than 60,000 years ago. We hypothesize motivated sea-crossings to visible islands, underlied by a language allowing the sharing of cognitive representations bridging various temporal periods and spatial locations.

We finally study the ancestral evolution of languages with a new model of linguistic change, by back-propagating the results of today's sociolinguistics into the past, and deducing the societal structures of prehistoric populations from genetic or archaeological data. This model also allows us to unify internally- et externally-motivated changes.

Keywords: emergence of language, origin of languages, linguistic diversity, systemics, polygenesis, monogenesis, sea-crossings, palaeo-demography.

Table des matières

Table des figures	xiii
Liste des tableaux	xix

Partie I Origines et évolutions du langage et des langues : approches historiques, théoriques et informatiques

1

De l'origine du langage et des langues : aspects historiques et approche pluridisciplinaire

1.1	Historique des recherches sur l'origine et l'évolution du langage	6
1.1.1	Une quête ancienne	6
1.1.2	Les courants du XIXème et du XXème siècle	13
1.1.3	Le renouveau des études sur l'origine du langage	25
1.2	Spécificités de la question de l'origine du langage et des langues	28
1.2.1	Comment définir le langage ?	28
1.2.2	Langage et système cognitif général	31
1.2.3	L'absence de fossiles linguistiques	32
1.2.4	Variabilités et dimensions d'étude	33
1.3	Approche pluridisciplinaire de la question de l'origine du langage et des langues	33
1.3.1	Ethologie et systèmes de communication animaux	34
1.3.2	Génétique	39
1.3.3	Psychologie et neurosciences cognitives	46

1.3.4	Théorie de l'évolution et théorie des jeux	50
1.4	Premières conclusions	53

2

Approche "systémique" du langage : description et dynamique

2.1	Description systémique et dimensions du langage	56
2.1.1	Une description systémique du langage	56
2.1.2	Trois dimensions pour l'espace linguistique	58
2.2	Description "synchronique" du système linguistique (état statique)	60
2.2.1	Les frontières du système linguistique	60
2.2.2	Structures et auto-organisation	63
2.2.3	Espaces des possibles	67
2.2.4	Forces et contraintes internes et externes	70
2.3	Description diachronique du langage : les évolutions du système linguistique	80
2.3.1	Diversité, variabilité et évolution	80
2.3.2	Potentialité, fluctuations, fréquences d'occurrence et changements . .	84
2.3.3	Mécanismes des changements intra- et inter- individuels	86
2.3.4	Actuation et implémentation d'un changement	90
2.3.5	Aspect graduel ou abrupt des changements linguistiques	93
2.3.6	Evolution des systèmes : contingence et directionnalité des changements	99
2.3.7	Interférences et structure du système linguistique	105
2.4	Conclusions	107

3

Modèles, simulations et outils informatiques

3.1	Panorama des recherches informatiques sur l'origine et l'évolution du langage et des langues	112
3.1.1	Une brève histoire de l'informatique	112
3.1.2	Modélisation et simulations informatiques	113
3.1.3	Principaux paradigmes de modélisation	116
3.1.4	Principaux courants de recherche	120
3.1.5	Discussion	135
3.2	Un outil de modélisation : la plate-forme LEMMINGs	139
3.2.1	Langages et outils logiciels	139
3.2.2	Description du logiciel	141
3.2.3	Conclusions	155

Partie II Propositions pour l'origine et la diversification des langues

4

Emergence des langues et diversité linguistique

4.1	Problématiques de l'origine des langues et de l'évolution de la diversité linguistique	164
4.1.1	Remarques introductives et définitions	164
4.1.2	Complexité des langues et des structures linguistiques	166
4.1.3	Problématiques et questions relatives à l'origine des langues et des diversités linguistiques	167
4.2	Démographie et organisation sociale des populations préhistoriques	168
4.2.1	Introduction : époques et industries de la préhistoire	168
4.2.2	Notions de paléo-démographie	169
4.2.3	Postulats et conclusions préliminaires	180
4.3	Monogénèse ou polygénèse d'innovations	181
4.3.1	Définitions et comparaisons de quelques innovations culturelles	181
4.3.2	Estimations probabilistes sur la monogénèse ou la polygénèse d'une innovation	182
4.3.3	Monogénèse, polygénèse et fréquences de contact	183
4.4	Vers une genèse des langues par polygénèse structurale des stratégies linguistiques	196
4.4.1	Emergence du langage, des langues et des stratégies linguistiques	196
4.4.2	Corrélation entre changements de la dimension naturelle et changements de la dimension structurale du système langage	199
4.4.3	Polygénèse structurale et diffusion des stratégies linguistiques	202
4.5	Evolution des diversités et complexités linguistiques	206
4.5.1	Evolution de la diversité et de la complexité des états possibles	206
4.5.2	Evolution de la diversité et de la complexité des états possibles	212
4.5.3	Effets de murs et tendances pour l'évolution des diversités et contraintes linguistiques	216
4.6	Conclusions	218

5

Emergence des langues modernes : indices paléo-anthropologiques

5.1	Introductions aux premières traversées maritimes	223
5.1.1	Présentation de la paléo-géographie de la région de Wallacea	223
5.1.2	Caractères intentionnel et à vue des premières traversées	234
5.1.3	Implications linguistiques des traversées maritimes intentionnelles	238
5.1.4	Intentionnalité sans visibilité	240
5.2	Traversées maritimes : un point d’ancrage des scénarios de l’évolution humaine et de l’origine des langues	240
5.2.1	Trois scénarios d’évolution des techniques de navigation	240
5.2.2	Les migrations côtières hors d’Afrique	241
5.2.3	Le cas des îles Andaman	244
5.3	Origine des comportements et des stratégies linguistiques modernes	247
5.3.1	Développement de la navigation dans un contexte évolutif	247
5.3.2	Quelques indices sur les langues du Paléolithique Moyen et du Paléolithique Supérieur	248
5.3.3	Apparition d’ <i>Homo sapiens</i> , liage spatio-temporel et stratégies linguistiques modernes	252
5.4	Conclusions	258

6

Un modèle préliminaire des changements linguistiques

6.1	Description du modèle	262
6.1.1	Introduction à la notion d’optimisation et aux techniques mathématiques de minimisation de fonction	262
6.1.2	Objectifs et présupposés théoriques du modèle	266
6.1.3	Description mathématique du modèle	275
6.1.4	Quelques remarques en guise de transition	284
6.2	Etude des dynamiques d’évolution d’un système linguistique	285
6.2.1	Première série d’expériences : impact de la distribution des variations fréquentielles sous contraintes naturelles et distribuées	285
6.2.2	Deuxième série d’expériences : Réseaux sociaux et évolution d’une communauté de locuteurs dans un paysage énergétique plat	297
6.2.3	Troisième série d’expériences : Evolution d’un système linguistique communal sous contraintes internes et sociales	311
6.2.4	Analyse et extrapolation des résultats des expériences	321
6.3	Conclusions	329

Conclusions et perspectives

7.1	Résumé et synthèse	332
7.2	Perspectives	333
7.2.1	Perspectives directes	333
7.2.2	Perspectives à plus long terme	337
7.3	En guise de mot final.	340

**Annexe A : Approche combinatoire et représentation matricielle du modèle
d'évolution linguistique 343**

3.1	Représentation matricielle des contraintes	343
3.2	Représentation d'un contexte et d'un ensemble de contextes	344
3.3	Définition de la compatibilité systémique d'un item et de la cohérence système d'un système	344
3.4	Dérivée de la fonction d'énergie	346

**Annexe B : Table des correspondances phonétiques et classification des langues
des îles Andaman 349**
Bibliographie 351

Table des figures

1.1	Les 12 grandes familles linguistiques de Merritt Ruhlen	17
1.2	Le cerveau du patient “Tan” de Paul Broca	19
1.3	Triangle vocalique de l’anglais	31
1.4	Une proposition de phylogénie des espèces humaines, selon Conroy [Conroy, 1997]	43
2.1	Les trois dimensions du “système langage”	59
2.2	Différents niveaux d’auto-organisation dans les systèmes langagiers	66
2.3	Espaces des possibles génomiques	68
2.4	Evolution d’une masse sous l’action de la gravitation	78
2.5	Variation et changement dans l’espace des possibles d’un système	83
2.6	Réseau social basé sur la théorie de Milroy [Milroy, 1992]	89
2.7	Catégories phonologiques de deux locuteur Fang, d’après [Hombert & Puech, 1984]	91
2.8	Emergence et diffusion de changements	91
2.9	Modes de changements entre deux états A et B d’un système	94
2.10	Courbe logistique	96
2.11	Evolution d’un système par bifurcations	100
2.12	Compétition entre mots pour l’émergence d’un lexique [Steels, 1996]	102
2.13	Evolution par diversification sans tendance évolutive	104
2.14	Evolution par diversification avec tendance évolutive	104
2.15	Evolution par diversification sans tendance évolutive mais effet de barrière	104
2.16	Un paysage énergétique plat sans états optimaux	108
2.17	Paysage énergétique présentant une topographie marquée	109
3.1	L’architecture de Von Neumann	113
3.2	Schéma d’un perceptron multi-couches	119
3.3	Interaction lors d’un naming game	121
3.4	Evolution de la cohérence de deux populations de taille identique en situation de contact linguistique	123
3.5	Evolution du vocabulaire emprunté de deux populations de taille identique en situation de contact linguistique	124
3.6	Evolution de la cohérence de deux populations de tailles différentes en situation de contact linguistique	124
3.7	Evolution du vocabulaire emprunté de deux populations de tailles différentes en situation de contact linguistique	125
3.8	Impact du contexte sémantique et homophones : interactions à un mot et ratio concepts sur mots égal à 1	126

3.9	Impact du contexte sémantique et homophones : interactions à deux mots et ratio concepts sur mots égal à 1	126
3.10	Impact du contexte sémantique et homophones : interactions à un mot et ratio concepts sur mots égal à 3	127
3.11	Impact du contexte sémantique et homophones : interactions à deux mots et ratio concepts sur mots égal à 3	127
3.12	Le composant graphique TimeGraph , pour l’affichage de courbes de fonctions dépendantes du temps	144
3.13	Le composant graphique Graph2D , pour la représentation d’espaces bidimensionnels	145
3.14	Le composant graphique TextDisplay , pour l’affichage de texte	145
3.15	Une interface pour modifier les paramètres d’un prototype de courbe pour le composant graphique TimeGraph	146
3.16	Interface graphique principale du logiciel Lemmings	148
3.17	Exemple de module pour la plate-forme LEMMingS : transformée de Fourier et détection d’événements dans le signal	151
3.18	Exemple de module pour la plate-forme LEMMingS : module de cartographie	151
4.1	Diversité des états possibles et diversité des états réels	165
4.2	Epoques et industries de la préhistoire	168
4.3	Schéma des chocs des molécules de gaz parfait	176
4.4	Un exemple de mouvement brownien en dimension 2	178
4.5	Mouvement pseudo-brownien	178
4.6	Impact de la directionnalité sur la fréquence de contact pour différents angles de variation de la direction ($r = 1.25km$)	179
4.7	Impact de la directionnalité sur la fréquence de contact pour différents angles de variation de la direction ($r = 5km$)	179
4.8	Evolution des probabilités de monogénèse et de polygénèse d’une innovation en fonction de la probabilité d’émergence en un site	183
4.9	Evolution du ratio probabilité de polygénèse sur probabilité de monogénèse en fonction de la probabilité d’émergence en un site	184
4.10	Reproduction expérimentale des résultats théoriques de [Freedman and Wang, 1996]	185
4.11	Schéma des probabilités de polygénèse et de monogénèse pour une densité de 0.0001 groupes au km^2	187
4.12	Schéma des probabilités de polygénèse et de monogénèse pour une densité de 0.001 groupes au km^2	187
4.13	Schéma des probabilités de polygénèse et de monogénèse pour une densité de 0.01 groupes au km^2	188
4.14	Schéma des probabilités de polygénèse et de monogénèse pour un ratio de probabilités $\frac{P_i}{P_c}$ de 10.0	188
4.15	Schéma des probabilités de polygénèse et de monogénèse pour un ratio de probabilités $\frac{P_i}{P_c}$ de 50.0	189
4.16	Schéma des probabilités de polygénèse et de monogénèse pour un ratio de probabilités $\frac{P_i}{P_c}$ de 500.0	189
4.17	Simulation multi-agents d’une diffusion d’innovation dans une macro-population humaine ; début de la diffusion : émergence de l’innovation en un site	191
4.18	Simulation multi-agents d’une diffusion d’innovation dans une macro-population humaine ; progression de la diffusion	192

4.19	Scénario d'émergence des langues illustrant une polygenèse et une origine unique des langues actuelles	198
4.20	Un paysage énergétique séparé en deux régions par une barrière énergétique . . .	205
4.21	Traits des segments des langues du monde [Marsico & al., 2002]	209
4.22	Evolution par diversification sans tendance évolutive mais effet de barrière	217
4.23	Evolution de la distribution des items de l'espace des possibles au court du temps	217
5.1	Topographie contemporaine de la région de Wallacea	224
5.2	Evolution du paléo-climat au cours du Pléistocène, d'après [Conroy, 1997]	225
5.3	Carte des terres européennes émergées avec une baisse du niveau marin de 80 mètres	226
5.4	Evolution du niveau des mers à la Barbade au cours du dernier épisode glaciaire, reproduit d'après [Bard et al., 1990], original de [Schakleton, 1987]	227
5.5	Evolution du niveau des mers à la péninsule du Huon au cours du dernier épisode glaciaire (minima and maxima), reproduit d'après [Lambeck et al., 2001]	228
5.6	Région de Wallacea, niveau relatif des mers de -50m	228
5.7	Région de Wallacea, niveau relatif des mers de -80m	229
5.8	Localisation des plus anciens sites australiens et papous	230
5.9	Routes migratoires proposées par Birdsell [Birdsell, 1977]	233
5.10	Visibilité et rotondité de la Terre	235
5.11	Principales routes menant vers l'Asie depuis l'Afrique de l'est	243
5.12	Topographie contemporaine des îles Andaman et Nicobar	245
5.13	Iles Andaman et Nicobar, niveau relatif des mers de -60m	246
5.14	Différents types causatifs, reproduction d'après [Shibatani & Pardeshi, 2001] (p. 101)	256
5.15	Comparaison des structures crâniennes d' <i>Homo erectus</i> (gauche) et d' <i>Homo sapiens</i> (droite), reproduction d'après [Balter, 2002] (p. 1220)	258
6.1	Paysage énergétique avec un minimum absolu	264
6.2	Paysage énergétique avec deux minima locaux	264
6.3	Somme normalisée de deux Gaussiennes présentant deux pics bien distincts . . .	281
6.4	Somme normalisée de deux Gaussiennes présentant deux pics très rapprochés . .	281
6.5	Paysage énergétique défini par la fonction f	286
6.6	Evolution du système sous contrainte par optimisations locales	287
6.7	Evolution du système en l'absence de contraintes	288
6.8	Evolution selon une distribution des changements sous contraintes après 10,000 pas de temps	289
6.9	Evolution selon une distribution des changements sous contraintes après 20,000 pas de temps	290
6.10	Evolution de l'énergie du système linguistique	292
6.11	Un indicateur des changements d'un système en évolution : distance entre les barycentres du système pour deux périodes consécutives	292
6.12	Evolution du ratio de la distance entre barycentres sur la moyenne des écarts-types des distributions des deux périodes temporelles consécutives considérées	293
6.13	Evolution du nombre de changements en fonction de la variance de la distribution des transformations possibles	293
6.14	Evolution de la distance entre barycentres pour une variance égale à 0.002	294
6.15	Evolution de la distance entre barycentres pour une variance égale à 0.006	295
6.16	Un paysage énergétique avec seize bassins d'attraction	296

6.17	Evolution de l'entropie d'un ensemble de systèmes linguistiques lors de l'exploration de l'espace des possibles	296
6.18	Vue de la diversité linguistique d'un ensemble de systèmes linguistiques après exploration de l'espace des possibles	297
6.19	Evolution de deux locuteurs en l'absence de liens sociaux (variance sociale = 0.0001)	299
6.20	Evolution de deux locuteurs unis par deux liens positifs symétriques de valeur 1.0 (variance sociale = 0.0001)	299
6.21	Evolution de deux locuteurs unis par deux liens positifs symétriques de valeur 10.0 (variance sociale = 0.0001)	300
6.22	Evolution de deux locuteurs unis par deux liens négatifs symétriques de valeur -1.0 (variance sociale = 0.0001)	300
6.23	Evolution de deux locuteurs unis par deux liens négatifs symétriques de valeur -10.0 (variance sociale = 0.0001)	301
6.24	Evolution de la distance moyenne au barycentre en fonction des liens (symétriques) entre agents	302
6.25	Evolution de la distance moyenne parcourue par les agents et le barycentre en fonction des liens (symétriques) entre agents	303
6.26	Evolution de deux locuteurs unis par deux liens positifs symétriques de valeur 1.0 pour une variance sociale égale à 0.001	304
6.27	Evolution de deux locuteurs unis par deux liens positifs symétriques de valeur 1.0 pour une variance sociale égale à 0.0001	304
6.28	Evolution de l'entropie du système et de la distance moyenne parcourue par les locuteurs en fonction de la variance de la distribution sociale	305
6.29	Evolution de la distance moyenne parcourue par les agents en fonction de la variance sociale	305
6.30	Evolution de deux locuteurs unis par des liens positifs symétriques et initialement localisés en deux positions distinctes de l'espace des possibles	306
6.31	Evolution de deux locuteurs unis par des liens positifs ou nuls asymétriques et initialement localisés en deux positions distinctes de l'espace des possibles	307
6.32	Evolution de la distance moyenne parcourue par le barycentre et les agents en fonction du nombre d'agents	309
6.33	Evolution de la distance moyenne des agents au barycentre du système en fonction du nombre d'agents	310
6.34	Evolution de la distance moyenne parcourue par le barycentre pour les trois situations	312
6.35	Evolution de la distance moyenne au barycentre en fonction des liens (symétriques) entre agents en présence de contraintes naturelles	314
6.36	Evolution de la distance moyenne parcourue par les agents et le barycentre en fonction des liens (symétriques) entre agents en présence de contraintes naturelles	315
6.37	Evolution de l'entropie du système en fonction des liens (symétriques) entre agents en présence de contraintes naturelles	315
6.38	Trajectoires évolutives de deux agents liés par des liens positifs de valeur 1.0, 5000 pas de temps	316
6.39	Trajectoires évolutives de deux agents liés par des liens positifs de valeur 1.0, 7000 pas de temps	317
6.40	Trajectoires évolutives de deux agents liés par des liens positifs de valeur 1.0, 8000 pas de temps	318

6.41	Evolution de la distance moyenne des agents au barycentre du système en fonction du nombre d'agents (liens symétriques de valeur 1.0 entre tous les agents)	319
6.42	Evolution de la distance moyenne parcourue par le barycentre en fonction du nombre d'agents	319
6.43	Evolution de l'entropie du système en fonction du nombre d'agents	320
6.44	Evolution de la distance moyenne parcourue par les agents en fonction du nombre d'agents	320
6.45	Evolution des barycentres des membres de deux classes différentes, et comparaison avec les trajectoires de deux agents de ces classes	322
6.46	Différentes topologies de l'espace énergétique aptes à rendre compte des quatre schémas de stabilité et d'émergence de Greenberg [Greenberg, 1987] (p. 76) . . .	326
6.47	Distance moyenne au barycentre au cours des 4 phases du scénario d'évolution des structures sociétales	327
6.48	Distance moyenne parcourue par les agents au cours des 4 phases du scénario d'évolution des structures sociétales	328
6.49	Distance moyenne parcourue par le barycentre du macro-système au cours des 4 phases du scénario d'évolution des structures sociétales	328
1	Proposition de classification des langues des îles Andaman	350

Liste des tableaux

1.1	Un exemple de correspondances phonétiques dans plusieurs langues indo-européennes, d'après [Baldi,1983]	15
1.2	Examen des 16 traits de Hockett pour différents animaux et situations de communication [Coleman, 2001]	29
1.3	Tableau des recherches sur l'apprentissage du langage aux grands singes	36
1.4	Régions spécifiques pour la mémorisation de différentes catégories d'éléments	48
1.5	Corrélation entre main dominante et localisation du langage dans le cerveau (HD : hémisphère droit, HG : hémisphère gauche)	49
4.1	Surfaces des continents terrestres	173
4.2	Calcul des densités moyennes de groupes humains pour différents couples surface / nombre de groupes	173
4.3	Taille et densité de plusieurs populations de chasseurs-collecteurs des derniers siècles	174
4.4	Estimations de la taille et de la densité de la population en Europe au Paléolithique Moyen et au Paléolithique Supérieur	174
4.5	Estimation de la taille des territoires des groupes humains pour différents sites archéologiques, d'après [Biraben et al., 1997]	175
4.6	Fréquence de contact d'après le modèle des gaz parfaits pour $\varepsilon = 10km$	176
5.1	Distances et visibilité entre les îles de la région de Wallacea	236
5.2	Pronoms personnels des langues andamaïses	250
5.3	Nombres des langues des îles Andaman	251
6.1	Distribution géographique condensée des liens pour les agents en anneau	311
6.2	Distribution géographique intermédiaire des liens pour les agents en anneau	311
6.3	Distribution géographique étalée des liens pour les agents en anneau	312
1	Table des correspondances pour la prononciation des mots en langues Andamaïses	349

Première partie

Origines et évolutions du langage et des langues : approches historiques, théoriques et informatiques

Quatre aveugles s'assemblèrent un jour pour examiner un éléphant. Le premier toucha la jambe de l'animal et dit : "L'éléphant est comme un pilier." Le second palpa la trompe et dit : "L'éléphant est comme une massue." Le troisième aveugle tâta le ventre et déclara : "L'éléphant est comme une grosse jarre." Le quatrième enfin, fit bouger une oreille de l'animal et dit à son tour : "L'éléphant est comme un grand van." Puis ils se mirent à se disputer à ce sujet.

Un passant leur demanda la raison de leur querelle ; il la lui exposèrent et le prirent comme arbitre. L'homme déclara : "Aucun de vous n'a bien vu l'éléphant. Il n'a pas l'air d'un pilier, mais ses jambes sont des piliers ; il n'a pas l'air d'un van, mais ses oreille y ressemblent, il n'a pas l'aspect d'une jarre, mais c'est son ventre qui en est une. Il n'est pas une massue, c'est sa trompe qui est semblable à une massue. L'éléphant est une combinaison de tout cela : jambes, oreilles, trompe et ventre." Ainsi se querellent ceux qui n'ont vu que l'un des aspects de la Divinité.

Ramakrishna.

Gaja Shastra, Traité sur les éléphants.

L'origine et l'évolution du langage et des langues constituent un vaste domaine d'étude, qui a vu naître en son sein nombre des courants de recherche actuels en linguistique. De plus en plus, il implique en outre la convergence de disciplines extérieures qui ouvrent progressivement de nouvelles perspectives sur un sujet difficile.

L'objectif de cette première partie est d'offrir un tour d'horizon synthétique de ces recherches, en plaçant l'accent sur leur apparition et leur développement au cours du temps et dans des contextes scientifiques spécifiques. Reflétant une dichotomie partielle des idées et des recherches, les deux premiers chapitres de cette partie s'articuleront respectivement autour des questions de l'origine et du changement du langage et des langues. Le troisième chapitre décrit quant à lui plus en détail les modélisations informatiques, puisque celles-ci seront notre principal paradigme d'étude. Nous tenterons au cours de cet exposé de dégager et de justifier les problématiques et les thèmes que nous aborderons dans la seconde partie de notre thèse.

Les idées rapportées ici couvrent de nombreuses disciplines et une large période historique. Il va de soi qu'il ne serait guère raisonnable de s'estimer expert dans l'ensemble des domaines abordés, et nous nous plaçons naturellement en-deçà de cette espérance. Nous ne pouvons prétendre à une exhaustivité et une présentation exempte d'incompréhensions et d'à-peu-près, et nos connaissances des différents domaines ont été plus glanées dans des lectures, des séminaires ou des rencontres que par une approche méthodique et pédagogique des disciplines. Notre objectif est plus ici de faire ressortir la richesse du domaine, ainsi qu'une chronologie des idées, afin de poser les postulats qui sous-tendent notre approche du langage. Nous espérons cependant défendre l'idée que la diversité des connaissances, même sans être experte, peut-être une passionnante source d'idées et d'enrichissement de la réflexion.

Chapitre 1

De l'origine du langage et des langues : aspects historiques et approche pluridisciplinaire

*If the Lord Almighty had consulted me before embarking on creation
I should have recommended something simpler.*

Alphonse X (Alphonse le Sage) (1221-1284) (reproduit dans [Murray, 1984])

Si la quête de l'homme pour comprendre l'origine de la parole est fort ancienne, la question de l'origine du langage humain constitue un sujet d'étude actuel et très vivant dans une partie de la communauté scientifique.

Cet intérêt de tout temps se comprend aisément si l'on songe à l'importance du langage dans les communautés et les cultures humaines. Il n'existe en effet aucune population humaine qui ne possède un langage articulé, et le nombre de langues parlées sur notre planète avoisine les 6000. En comparaison, si de nombreuses espèces du reste du règne animal manifestent des formes de communication variées, aucune de ces formes n'atteint la complexité et l'efficacité du langage humain.

Le langage est ainsi partiellement définitoire de la nature humaine, et son origine se mêle intimement à celle des formidables capacités cognitives dont nous faisons montre, ainsi qu'à celle de la culture sous toutes ses formes : comportements religieux, sens artistique et esthétique, constructions sociales extrêmement développées et complexes, . . .

Une question fondamentale pour mieux comprendre ce qui fonde la spécificité humaine est dès lors de comprendre comment une telle fonction a pu se développer au cours de l'histoire évolutive, et se diversifier jusqu'à donner la myriade des langues actuelles.

Ce premier chapitre a pour but de parcourir partiellement les courants scientifiques qui se sont penchés sur cette question. Pour ce faire, nous présentons dans un premier temps une rapide synthèse de l'évolution historique des courants de pensée et de recherche. Nous détaillons ensuite quelques unes des théories actuelles, au travers des différentes disciplines qui participent aujourd'hui à l'étude de l'origine du langage.

1.1 Historique des recherches sur l'origine et l'évolution du langage

Les connaissances actuelles sur la place de l'homme dans le règne animal, sur son histoire phylogénétique, sur sa cognition et sur l'émergence des civilisations sont sans commune mesure avec celles d'autrefois. Nos interrogations sur l'origine du langage sont aujourd'hui plus précises et en un certain sens plus pertinentes que celles des premiers penseurs qui se sont penchés sur cette question. Quel que soit cependant le degré d'avancement de la réflexion, les positions sur la question au cours de l'histoire reflètent souvent les grands cadres philosophiques des différentes époques (religieux, socioculturels...), comme nous essaierons de le mettre en valeur dans notre présentation.

1.1.1 Une quête ancienne

Le questionnement sur l'origine du langage enfouit ses racines très profondément dans l'histoire humaine, et remonte peut-être même à l'origine du Verbe. Il a pu prendre la forme de considérations physiologiques, de recherches philosophiques ou religieuses, et même d'expériences menées avec des enfants.

Premières expériences et conceptions antiques sur le langage

Premières expériences sur l'origine du langage Plusieurs souverains ont tenté l'expérience de priver de jeunes enfants de toute interaction linguistique avec l'espoir de les voir spontanément parler la langue originelle de l'humanité, comme le décrit Frédéric Kaplan [Kaplan, 2000] (p. 1-2). Le pharaon Psammétique I, au VII^e siècle avant notre ère, espérait ainsi démontrer que l'égyptien était la première langue des hommes. Le mot *bekos* qu'aurait prononcé l'un des enfants l'aurait cependant amené à conclure que le phrygien était une langue encore plus ancienne (*bekos* y désigne le pain). Plus tardivement, l'empereur Frédéric II de Hohenstaufen, au XIII^e siècle, échoue à découvrir la langue originelle parmi l'hébreu, le latin, le grec et l'arabe (tous les enfants périssent). Au tournant du XVI^e siècle, sous le règne de James IV d'Écosse, des enfants élevés par une nourrice muette aurait spontanément parlé Hébreu. Et en Inde, Akbar le Grand (1542-1605) fit construire la *Gang Mahal* (ou "maison des idiots"), d'où aucun son ne filtrait, pour y enfermer des enfants. Ceux-ci ne développèrent cependant aucun langage.

Les incertitudes quant à la localisation de la pensée humaine et de l'âme au sein des civilisations grecque et babylonienne ont également été de mise pour celle de la faculté de langage. Au cours des antiquités grecque et babylonienne, le cerveau, mais aussi le cœur et le foie, furent envisagés comme siège de celle-ci. Dans un passé encore plus lointain, Imhotep, officiel très renommé de la 3^eme dynastie égyptienne (XXVII^e siècle avant notre ère), architecte, prêtre, poète et médecin, souligna par ses investigations et ses recherches médicales la relation physiologique entre le langage et le cerveau.

La pensée grecque et le lien entre noms et choses du monde Sur un plan philosophique, la pensée grecque fut l'une des premières à s'attarder sur la nature du langage, ainsi que sur son origine, avec une approche souvent proche de considérations sémiologiques.

Le principal débat de l'Antiquité à propos du langage concerne la nature de la relation entre les mots et les choses du monde réel. Pythagore (580 - 490), qui résume une des deux positions des penseurs grecs, pense que le lien entre les noms et les objets qu'ils désignent est naturel (phusei), ce qui signifie que les premiers ne sauraient posséder une autre forme que celle qu'ils prennent pour désigner les objets du monde qui leur correspondent. Cette relation se retrouve d'ailleurs dans d'autres systèmes philosophiques : la pensée indienne offre même un mot, "nama-rûpa" (nama, le nom, rûpa, la forme) pour transcrire cette relation indissociable. Les mots acquièrent par le lien naturel la puissance des choses, et le langage devient sacré car il exprime la Nature elle-même. La parole des rishis, les voyants védiques de l'Inde, est ainsi si puissante et représentative de la Nature que même les Dieux doivent y obéir [Carfantan, 2000].

Après Pythagore, Platon (428-347), dans le Cratyle (citations extraites de [Robin, 1940]), va clairement poser la question de l'origine naturelle ou conventionnelle du langage, à travers le lien qui relie les mots aux choses qu'ils désignent. Par le biais des deux personnages de Cratyle et Hermogène, Platon introduit le point de vue Pythagoricien et son opposé :

"Hermogène : Cratyle ici présent déclare, Socrate, qu'il existe une rectitude originelle de dénomination, appartenant de nature à chaque réalité ; qu'il n'y a pas dénomination quand il s'agit d'une appellation dont tels hommes sont convenus d'appeler une chose, en utilisant pour cela une partie de leurs articulations vocales ; mais qu'une rectitude de dénomination existe originellement, pour Grecs et Barbares, et la même pour tous, indistinctement. (...) En vérité, Socrate, pour ce qui est de moi, en dépit de nombreux entretiens avec lui comme avec beaucoup d'autres, je ne puis me convaincre qu'il y ait autrement rectitude de dénomination, si ce n'est par une convention et un accord. Voici en effet mon avis : tel nom qu'aura pu poser un tel pour telle chose, c'est celui-là qui est le nom correct ; que plus tard, à sa place il en pose un autre et ne recoure plus, pour la chose dont il s'agit, à cette appellation, il n'y a pas du tout moindre rectitude dans le second cas que dans le premier. C'est comme avec les serviteurs : nous remplaçons un nom par un autre, mais celui-ci, le nom de remplacement, n'est pas moins correct que le nom antérieurement assigné. Le fait est que, de nature et originellement, aucun nom n'appartient à rien en particulier, mais bien en vertu d'un décret et d'une habitude, à la fois de ceux qui ont pris cette habitude et de ceux qui ont décidé l'appellation." [Platon] (383a-384e)

Dans le cas où les mots nomment les choses de par leur nature, choses et mots se trouvent reliés sans intervention de l'homme, et peuvent être vus comme la création des Dieux qui permet aux hommes de communiquer entre eux sur le monde. Dans le cas contraire, on conçoit que les mots puissent être introduits par l'homme pour lui servir d'instruments de communication, instruments flexibles et de convention.

Ce dernier point de vue est celui défendu par les sophistes, souvent attaqués par Platon, et poursuivis par une mauvaise réputation historique. Ils furent cependant parmi les premiers à mettre à jour le lien entre le langage et la logique (par le biais des sophismes). Leurs études ont été fondatrices de la rhétorique, de la grammaire et d'autres champs de la linguistique. Gorgias de Leontium (487? - 380?) s'est particulièrement intéressé au langage, et a défendu l'idée que le langage ne révèle pas l'être, mais *est* l'être par quoi les choses acquièrent leur réalité [Gorgias, 2001]. Cette puissance créatrice du langage se retrouvera à la base de plusieurs religions à des époques postérieures.

Platon a tenté de dépasser les deux origines naturelle (phusei) et conventionnelle (thesei) des

mots en proposant entre autres une évolution des mots (les mots complexes renvoient à des mots plus simples, qui eux-mêmes renvoient à la valeur expressive des lettres et des sons). On trouve ainsi l'idée d'une évolution des langues, à travers une complexification de leurs éléments qui permet un plus grand pouvoir d'expression. Cette évolution des mots conduit plus généralement à une histoire des langues, qui sépare les formes actuelles des formes originelles [Gerbier, 1999b]. Le problème initial demeure toutefois posé : d'une part, le fait que l'on puisse énoncer des choses fausses brise l'adéquation du mot à la chose, puisqu'il n'est pas possible qu'un lien naturel puisse conduire au faux ; d'autre part, le fait de pouvoir communiquer la différence entre le vrai et le faux, et l'impossibilité de soutenir tour à tour des hypothèses contradictoires vont à l'encontre d'un pur conventionnalisme des mots. En effet, un tel conventionnalisme, sans aucun lien avec la réalité du monde, devrait permettre de soutenir toute chose et son contraire.

Notons ici que les questions soulevées par Platon ou les sophistes sont au cœur du débat qui oppose réalistes et nominalistes en philosophie. Les premiers pensent qu'une réalité peut exister indépendamment du langage, quand les seconds défendent au contraire l'idée que la réalité n'existe qu'à travers celui-ci. Nous reviendrons sur ce débat qui anime toujours la philosophie contemporaine.

A la suite de Platon, Aristote (384-322 av. J.C.) prolonge la réflexion et introduit l'idée d'une médiation entre les mots utilisés par les hommes et leur référents :

“Les sons émis par la voix sont les symboles des états de l'âme, et les mots écrits les symboles des mots émis par la voix. . . Et de même que l'écriture n'est pas la même chez tous les hommes, les mots parlés ne sont pas non plus les mêmes, bien que les états de l'âme dont ces expressions sont les signes immédiats soient identiques chez nous, comme sont identiques aussi les choses dont ces états sont les images.” [Aristote] (16a3-5) (cité dans [Gerbier, 1999a])

Aristote offre en fait une solution partielle au problème précédent, en rompant le lien direct entre les mots et les choses qu'ils désignent [Gerbier, 1999b]. La continuité et l'accord des états de l'âme permettent de rendre compte des différences entre le vrai et le faux, ou l'impossibilité de soutenir tour à tour des hypothèses contradictoires, tout en permettant un usage du langage défini par des conventions.

On peut voir dans cette position d'Aristote la première distinction entre langue et faculté de langage. La capacité et surtout l'intention de parler ne se trouvent désormais plus sur le même plan que le choix de la forme sonore particulière des mots. Toutefois, malgré cette différenciation, qui permet de distinguer la question de l'origine du langage de celle de la diversité des langues, le choix de tel ou tel mot (forme sonore) par les hommes reste non élucidé.

Aristote explique en outre la faculté de langage par la nécessité des hommes de vivre ensemble. La langue est ce qui permet la vie commune et permet la politique au sens large. L'origine du langage serait avant tout sociale.

La place du langage dans le christianisme et le judaïsme

Suite à la période grecque, les grands textes fondateurs des religions monothéistes vont également aborder le sujet de l'origine du langage. Si dans la Bible le langage est un don de Dieu aux hommes, qui crée Adam à son image, c'est cependant ce dernier qui choisit les noms à donner aux choses qui l'entourent (les extraits suivants proviennent de [de Brouwer, 1975]) :

“Yahvé Dieu modela encore du sol toutes les bêtes sauvages et tous les oiseaux du ciel, et il les amena à l'homme pour voir comment celui-ci les appellerait : chacun devait porter le nom que l'homme lui aurait donné. L'homme donna des noms à tous les bestiaux, aux oiseaux du ciel et à toutes les bêtes sauvages, mais, pour un homme, il ne trouva pas l'aide qui lui fût assortie.” (La Genèse (Ancien Testament) II :19-20) (p. 19)

La même distinction que celle opérée par Aristote se présente ici : si Dieu offre la faculté de langage à l'homme, le libre choix des mots est laissé à ce dernier. Les mots sont donc une convention humaine, mais c'est le langage lui-même qui bénéficie d'une relation naturelle au monde, puisqu'il est voulu par Dieu. Toutefois, l'homme ne choisit pas les mots pour toute chose. Un passage situé plus en amont dans la Genèse rend compte en effet du choix de Dieu pour les mots désignant le jour et la nuit :

“Au commencement, Dieu créa le ciel et la terre. Or la terre était vide et vague, les ténèbres couvraient l'abîme, un vent de Dieu tournoyait sur les eaux. Dieu dit : Que la lumière soit et la lumière fut. Dieu vit que la lumière était bonne, et Dieu sépara la lumière et les ténèbres. Dieu appela la lumière jour et les ténèbres nuit. Il y eut un soir et il y eut un matin : premier jour.” (La Genèse (Ancien Testament), I :1-5) (p. 17)

Deux des éléments fondamentaux du monde sont dénommés par Dieu lui-même. Le Christianisme va en fait plus loin dans la place accordée au Verbe, puisqu'il en fait l'origine même du monde. Comme le rapporte Jean dans son évangile :

“Au commencement était le Verbe et le Verbe était avec Dieu. Et le Verbe était Dieu. Il était au commencement avec Dieu. Tout fut par lui, et sans lui rien ne fut.” (L'Évangile selon saint Jean, Prologue 1-3) (p. 1841)

Dieu et le Verbe se confondent, et tous deux (ou leur unité) possèdent la puissance créatrice grâce à laquelle le monde émerge. La langue offre la possibilité de s'approprier ce dernier et de le représenter. C'est cette puissance que Dieu cède à l'homme en lui offrant le Verbe. L'origine de la langue humaine devient la possibilité de répondre à Dieu et à sa création [Gerbier, 1999b]. Cette origine divine de la langue expliquera la recherche de la langue parfaite ou *adamique* dans la tradition judéo-chrétienne, afin de se rapprocher de la divinité (on pensera aux incantations magiques pour donner la vie au Golem, évoquées juste ci-dessous). Le lien naturel de la pensée grecque est devenu un lien divin.

La Bible résout également de façon élégante le problème de la diversité des langues grâce au mythe de Babel : pour punir l'orgueil des hommes qui voulaient ériger une tour jusqu'au royaume de Dieu, ce dernier fit parler les bâtisseurs dans des langues différentes ; l'impossibilité de communiquer entraîna l'inachèvement de la tour :

“Tout le monde se servait d'une même langue et des mêmes mots. Comme les hommes se déplaçaient à l'orient, ils trouvèrent une vallée au pays de Shinéar et ils s'y établirent. Ils se dirent l'un à l'autre : Allons ! Faisons des briques et cuisons-les au feu ! La brique leur servit de pierre et le bitume leur servit de mortier. Ils dirent : Allons ! Bâtissons-nous une ville et une tour dont le sommet pénètre les cieux ! Faisons-nous un nom et ne soyons pas dispersés sur toute la terre ! Or Yahvé descendit pour voir la ville et la tour que les hommes avaient bâties.

Et Yahvé dit : Voici que tous font un seul peuple et parlent une seule langue, et tel est le début de leurs entreprises ! Maintenant, aucun dessein ne sera irréalisable pour eux. Allons ! Descendons ! Et là, confondons leur langage pour qu'ils ne s'entendent plus les uns les autres. Yahvé les dispersa de là sur toute la face de la terre et ils cessèrent de bâtir la ville. Aussi la nomma-t-on Babel, car c'est là que Yahvé confondit le langage de tous les habitants de la terre et c'est de là qu'il les dispersa sur toute la face de la terre." (La Genèse (Ancien Testament), XI :1-9) (p. 29-30)

Avant l'épisode de Babel, une seule langue, bâtie vraisemblablement sur les mots choisis par Adam, était parlée par tous les hommes. Il n'y a donc pas d'évolution de la langue originelle, et l'on peut raisonnablement estimer que la langue adamique, dans sa perfection divine, ne nécessitait aucun changement.

La puissance qui investit la langue dans le christianisme, qui la rend maître des choses, comme le soulignait déjà Gorgias, se retrouve dans une autre religion du livre : le judaïsme. Dans la mythologie juive, la créature appelée **golem** reçoit la vie par des incantations magiques constituées de manipulations de l'alphabet Hébreu. L'importance accordée à cette utilisation du langage souligne sa place dans le processus de création. Le langage est ici capable de donner la vie.

Rôle et origine du langage chez quelques philosophes de la Renaissance et de l'Epoque contemporaine

Beaucoup plus tardivement et après les réflexions de nombreux penseurs que nous ne mentionnerons pas ici (comme St-Augustin qui s'inspira du modèle stoïcien du langage), Descartes (1596-1650) établit le langage comme fondement de la raison humaine. Là où les animaux sont semblables à des automates, le langage permet à l'homme d'échapper à cette condition :

"Car c'est une chose bien remarquable, qu'il n'y a point d'hommes si hébétés et si stupides, sans en excepter même les insensés, qu'ils ne soient capables d'arranger ensemble diverses paroles, et d'en composer un discours par lequel ils fassent entendre leurs pensées ; et qu'au contraire il n'y a point d'autre animal, tant parfait et tant heureusement né qu'il puisse être, qui fasse le semblable. Ce qui n'arrive pas de ce qu'ils ont faute d'organes, car on voit que les pies et les perroquets peuvent proférer les paroles ainsi que nous, et toutefois ne peuvent parler ainsi que nous, c'est-à-dire en témoignant qu'ils pensent ce qu'ils disent ; au lieu que les hommes qui, étant nés sourds et muets, sont privés des organes qui servent aux autres pour parler, autant ou plus que les bêtes, ont coutume d'inventer d'eux-mêmes quelques signes, par lesquels ils se font entendre à ceux qui, étant ordinairement avec eux, ont loisir d'apprendre leur langue. Et ceci ne témoigne pas seulement que les bêtes ont moins de raison que les hommes, mais qu'elles n'en ont point du tout. Car on voit qu'il n'en faut que fort peu pour savoir parler. . .

Et on ne doit pas confondre les paroles avec les mouvements naturels, qui témoignent les passions, et peuvent être imités par des machines aussi bien que par les animaux ; ni penser, comme quelques anciens, que les bêtes parlent, bien que nous n'entendions pas leur langage : car s'il était vrai, puisqu'elles ont plusieurs organes qui se rapportent aux nôtres, elles pourraient aussi bien se faire entendre à nous qu'à leurs semblables. C'est aussi une chose fort remarquable que, bien qu'il y ait plusieurs animaux qui témoignent plus d'industrie que nous en quelques-unes de leurs actions, on voit toutefois que les mêmes n'en témoignent point du tout en beaucoup d'autres : de façon que ce qu'ils font mieux que nous ne prouve pas qu'ils ont de l'esprit ; car, à ce compte, ils en auraient plus qu'aucun de nous et feraient mieux en toute chose ; mais plutôt qu'ils n'en

ont point, et que c'est la Nature qui agit en eux, selon la disposition de leurs organes : ainsi qu'on voit qu'une horloge, qui n'est composée que de roues et de ressorts, peut compter les heures, et mesurer le temps, plus justement que nous avec toute notre prudence." [Descartes, 1637] (V, 9)

Le langage est fondamental dans le sens où il est manifeste de la spécificité de l'homme, qui est sa pensée. L'intérêt du langage comme outil d'expression de la raison est ici établi, mais il s'agit de comprendre le terme de "fondement de la raison" comme la démonstration de l'existence de la pensée, et son absence chez les animaux. L'idée d'un langage constitutif de la pensée humaine, qui sera développée par la suite et surtout au XX^{ème} siècle, n'est pas encore présente.

Bien que Descartes ait peu abordé la question du langage dans ses nombreux écrits, ses propositions seront fondamentales pour la question de l'origine du langage, en particulier lorsque l'homme aura été replacé dans l'histoire évolutive des espèces par Darwin¹. L'extrait suivant met également l'accent sur plusieurs notions aujourd'hui toujours au cœur du débat au sujet des capacités des animaux à acquérir un langage :

"Il n'y a aucune de nos actions extérieures, qui puisse assurer ceux qui les examinent, que notre corps n'est pas seulement une machine qui se remue de soi-même, mais qu'il y a aussi en lui une âme qui a des pensées, excepté les paroles, ou autres signes faits à propos des sujets qui se présentent, sans se rapporter à aucune passion. Je dis les paroles ou autres signes, parce que les muets se servent de signes en même façon que nous de la voix ; et que ces signes soient à propos, pour exclure le parler des perroquets, sans exclure celui des fous, qui ne laisse pas d'être à propos des sujets qui se présentent, bien qu'il ne suive pas la raison ; et j'ajoute que ces paroles ou signes ne se doivent rapporter à aucune passion, pour exclure, non seulement les cris de joie ou de tristesse, et semblables, mais aussi tout ce qui peut être enseigné par artifice aux animaux ; car si on apprend à une pie à dire bonjour à sa maîtresse lorsqu'elle la voit arriver, ce ne peut être qu'en faisant que la prolotion de cette parole devienne le mouvement de quelqu'une de ses passions ; à savoir, ce sera un mouvement de l'espérance qu'elle a de manger, si l'on a toujours accoutumé de lui donner quelque friandise lorsqu'elle l'a dit ; et ainsi toutes les choses qu'on fait faire aux chiens, aux chevaux et aux singes, ne sont que des mouvements de leur crainte, de leur espérance, ou de leur joie, en sorte qu'ils les peuvent faire sans aucune pensée." [Descartes, 1646]

Nous reviendrons sur ces notions d'apprentissage et d'expression par le langage (dans un contexte "non passionné") lorsque nous aborderons les expériences d'apprentissage du langage menées sur les grands singes.

Un siècle après Descartes, Rousseau s'est particulièrement intéressé au problème de l'origine des langues, en lui accordant une place dans son système philosophique sur la nature de l'homme. Une des premières positions de Rousseau est un refus d'une convention au sens strict pour le langage :

"La parole, étant la première institution sociale, ne doit sa forme qu'à des causes naturelles." [Rousseau, 1781] (chapitre I)

En effet, la langue étant le premier élément permettant la réunion et la communication entre

¹Chomsky a d'ailleurs inscrit son parcours linguistique pour une partie dans les idées de Descartes, comme l'indique le titre de son livre *"Cartesian Linguistics"* [Chomsky, 1966].

les hommes, elle ne peut être elle-même une convention dictée par les hommes². La conséquence logique est la recherche par l'auteur des éléments naturels propres à façonner la forme d'une langue. Rousseau va ainsi développer une théorie en étudiant l'environnement des individus. Il s'appuie en particulier sur la distinction entre langues du nord de la France (langues d'oïl) et langues du sud (langues d'oc) : les climats et les environnements peuvent conditionner la forme de la langue.

Rousseau développe également une théorie pour rendre compte non pas de l'émergence d'une langue, mais de la faculté de langage :

“On ne commença pas par raisonner, mais par sentir. On prétend que les hommes inventèrent la parole pour exprimer leurs besoins ; cette opinion me paraît insoutenable. L'effet naturel des premiers besoins fut d'écarter les hommes et non de les rapprocher. Il le fallait ainsi pour que l'espèce vint à s'étendre, et que la terre se peuplât promptement ; sans quoi le genre humain se fut entassé dans un coin du monde, et tout le reste fut demeuré désert. De cela seul il suit que l'origine des langues n'est point due aux premiers besoins des hommes ; il serait absurde que de la cause qui les écarte vînt le moyen qui les unit. D'où peut donc venir cette origine ? Des besoins moraux, des passions. Toutes les passions rapprochent les hommes que la nécessité de chercher à vivre force à se fuir. Ce n'est ni la faim, ni la soif, mais l'amour, la haine, la pitié, la colère, qui leur ont arraché les premières voix. Les fruits ne se dérobent point à nos mains ; on peut s'en nourrir sans parler ; on poursuit en silence la proie dont on veut se repaître : mais pour émouvoir un jeune cœur, pour repousser un agresseur injuste, la nature dicte des accents, des cris, des plaintes. Voilà les plus anciens mots inventés, et voilà pourquoi les premières langues furent chantantes et passionnées avant d'être simples et méthodiques.” [Rousseau, 1781] (chapitre II)

Le langage apparaît donc comme moyen d'expression des passions. On retrouve ici l'état de nature des premiers hommes qui sous-tend une partie du discours philosophique de Rousseau. Celui-ci opte pour une origine chantée du langage. Le chant est en effet pour lui plus naturel que la parole articulée, et plus prompt à exprimer les désirs et les passions. Alors que la société évolue et que l'état de nature disparaît, la langue se transforme, perd son aspect initial pour se complexifier et devenir plus précise.

Pour terminer ce tour d'horizon très partiel de quelques conceptions philosophiques liées à la question de l'origine du langage et des langues, il nous semble intéressant de mentionner, par le biais d'une réflexion de Nietzsche, le développement du débat sémiologique sur le langage :

“Tout mot devient immédiatement concept par le fait qu'il ne doit pas servir justement pour l'expérience originale, unique, absolument individualisée, à laquelle il doit sa naissance, c'est-à-dire comme souvenir, mais qu'il doit servir en même temps pour des expériences innombrables, plus ou moins analogues, c'est-à-dire, à strictement parler, jamais identiques, et ne doit donc convenir qu'à des cas différents. Tout concept naît de l'identification du non-identique. Aussi certainement qu'une feuille n'est jamais tout à fait identique à une autre, aussi certainement le concept feuille a été formé grâce à l'abandon délibéré de ces différences individuelles, grâce à un oubli des caractéristiques, et il éveille alors la représentation, comme s'il y avait dans la nature, en dehors des feuilles, quelque chose qui serait “la feuille”, une sorte de forme originelle

²Il est intéressant de voir comment cette question de l'émergence de la convention sans accord initial a été abordée par les informaticiens modélisateurs, cf. chapitre 3.

selon laquelle toutes les feuilles seraient plissées, dessinées, cernées, colorées, crêpées, peintes, mais par des mains malhabiles au point qu'aucun exemplaire n'aurait été réussi correctement et sûrement comme la copie fidèle de la forme originelle." [Nietzsche, 1873]

Nietzsche décrit ici la nécessaire abstraction du langage, dont les mots réfèrent nécessairement à des concepts plutôt qu'à des événements ou des objets dans le présent ou le lieu immédiat. Par l'évocation de la formation d'un concept particulier, il souligne ici une faculté intrinsèque du langage humain. Plus généralement, il renvoie aux différences sémiotiques entre icônes, signes et symboles, qui seront encore une fois fondamentales pour caractériser le langage humain par rapport aux systèmes de communication des autres espèces (voir plus loin dans ce chapitre). Peut-on concevoir un langage sans symboles ? Comment envisager le passage d'un tel langage à un langage symbolique ? Telles sont quelques unes des questions qui découlent de telles considérations.

Nous avons tenté par ces quelques exemples, plus que de présenter une histoire du développement des concepts philosophiques liés à l'origine du langage et des langues, d'insister sur le fait que les questions qui sont toujours discutées aujourd'hui étaient déjà en place dans les systèmes philosophiques bien avant le XX^{ème} siècle. L'éclairage "scientifique" récent qui a été apporté aux anciennes réflexions des philosophes ne doit pas faire oublier ce point, et la récence de cette nouvelle approche, plus éloignée de la philosophie, aide à comprendre les mouvements de refus que nous allons détailler dans la section suivante.

1.1.2 Les courants du XIX^{ème} et du XX^{ème} siècle

There is no debate, so I have no opinion.
Noam Chomsky.

Le XIX^{ème} siècle est le siège de plusieurs progrès et découvertes scientifiques qui vont jouer un grand rôle pour la question de l'origine du langage.

Le développement de la linguistique historique (XIX^{ème} et XX^{ème} siècles)

C'est que la reconstitution d'une hypothétique langue mère comporte un vice méthodologique : on applique aux familles de langues reconstruites le même traitement que celui que l'on applique aux éléments de la même famille, en l'occurrence des langues connues. Il s'agit d'un cas typique d'hypostase métaphysique d'une règle méthodologique.

Laurent Mayet, directeur de la rédaction des hors-série Sciences et Avenir [Mayet, 2001]

Le XIX^{ème} siècle assiste tout d'abord au développement de la linguistique historique, et à la caractérisation des premières grandes familles de langues. L'existence de ressemblances entre certaines langues est cependant une découverte plus ancienne. En effet, dès le XVII^{ème} siècle,

plusieurs savants (en particulier hollandais) avaient noté les proximités lexicales entre le latin, le grec et les langues européennes de l'époque, proximités qu'ils attribuaient déjà à une origine commune. Toutefois, les préjugés religieux, s'appuyant sur la Bible qui désigne l'hébreu comme mère de toutes les langues, éclipsaient toute autre considération, qui pouvait également être le fait de marchands ou de voyageurs.

Les constatations de ces savants prirent cependant encore de l'ampleur avec les travaux de Sir William Jones (1746-1794), fonctionnaire anglais en poste aux Indes. En étudiant le sanskrit, celui-ci découvre des parentés avec le grec et le latin, mais également avec d'autres langues comme le gothique, les langues celtiques et l'ancienne langue des Perses. La comparaison avec d'autres langues comme l'arabe l'amène à la conclusion que les premières langues ont une origine commune dans le passé. Jones expose ses recherches le 2 Février 1786 devant les membres de l'*Asiatic Society* à Calcutta :

“The Sanskrit language, whatever be its antiquity, is of a wonderful structure ; more perfect than the Greek, more copious than the Latin, and more exquisitely refined than either, yet bearing to both of them a stronger affinity, both in the roots of verbs and in the forms of grammar, than could possibly have been produced by accident ; so strong, indeed, that no philologist could examine them all three, without believing them to have sprung from some common source, which, perhaps, no longer exists.” [Stockdale, 1807]

Le XIXème siècle va donc voir éclore la comparaison scientifique et rigoureuse de nombreuses langues. La parenté du terme “indo-européen” revient ainsi à l'anglais Thomas Young en 1813, et sous l'impulsion en particulier de l'école allemande (Friedrich von Schlegel et Franz Bopp), les comparaisons entre langues européennes et langues indiennes vont s'intensifier. Parallèlement, le déchiffrement de langues anciennes comme le vieux perse, le tokharien ou le hittite, permet de caractériser des états ancestraux présumés de l'indo-européen. Il faut souligner ici qu'il n'est pas possible d'attester l'existence d'une unique langue mère indo-européenne à l'origine des langues actuelles, et il se peut que plusieurs langues ou dialectes aient en réalité composé l'origine commune des langues indo-européennes contemporaines.

La recherche autour d'autres grandes familles prend également son essor, en particulier pour l'est du continent asiatique, avec des familles regroupant le tibétain, le chinois³, les langues birmanes... De nombreuses hypothèses ont cohabité au cours du temps, certaines s'étant révélées erronées par la suite (ou tout au moins ayant été jugées comme telles), comme par exemple la proposition d'une famille indo-chinoise reliant le chinois et les langues indiennes.

La méthode de reconstruction “classique” se base sur l'établissement de correspondances phonétiques régulières entre deux langues, c'est à dire qui touchent l'ensemble des mots du lexique étudié. La table 1.1 donne un exemple de telles correspondances pour des mots de langues indo-européennes [Baldi, 1983] (p. 4) (les formes gothiques et d'islandais ancien ont été omises). L'étude de ces relations entre les langues permettent de se faire une idée de leur proximité, mais elles sont parfois masquées par des emprunts lexicaux ou sur-estimées à cause de ressemblances fortuites.

A partir d'un ensemble de concepts déterminés, les linguistes établissent le pourcentage de

³Ce terme est incorrect dans le sens où il n'existe pas une langues chinoise unique, mais de nombreuses langues, souvent baptisées dialectes de façon erronée, disséminées sur le territoire chinois : “dialecte de Beijing” ou mandarin (Bei3jing1 hua4), “dialecte de Guangzhou” ou cantonais (Guang3zhou1 hua4), “dialecte de Suzhou” (Su1zhou1 hua4)...

	'father'	'mother'	'brother'
Sanskrit	pítár-	mātár-	bhrátar-
Latin	pater	māter	frāter
Greek	patér	mātēr	phrātēr
Old Irish	athir	māthir	brāthir
Armenian	hayr	mayr	ełbayr
Tocharian A	pācar	mācar	pracar
Tocharian B	pātar	mātar	procer
Old Church Slavic		mati	bratrŭ

TAB. 1.1 – Un exemple de correspondances phonétiques dans plusieurs langues indo-européennes, d'après [Baldi,1983]

cognats entre deux langues à partir du nombre de paires de mots (un dans chaque langue) qui sont reliés par une transformation phonétique régulière. Le terme de cognat désigne une paire de ces mots qui sont supposés descendre d'une origine commune.

L'ensemble des concepts étudiés est généralement composé d'éléments supposés centraux dans la vie quotidienne et en conséquence résistants à l'emprunt (parties du corps, éléments de l'environnement comme le soleil, la lune, le sol. . .), ce qui permet de ne pas obscurcir les relations génétiques entre langues basées sur les correspondances régulières. Les listes de Swadesh, composées de 100 ou 200 mots du *vocabulaire de base* supposés très résistants à l'emprunt, et proposées par le chercheur du même nom dans les années 1950, sont ainsi régulièrement utilisées. Pour certaines situations ethnographiques particulières, du vocabulaire spécifique peut également être mis à profit : noms d'animaux [Mouguiama-Daouda, 1995], noms d'éléments reliés à la culture du riz en Chine, vocabulaire lié à l'agriculture de façon générale. . .

Pour un ensemble de langues, il est possible d'établir une matrice triangulaire des pourcentages de cognats pour chaque couple de langues. A partir de cette matrice de distance, différents algorithmes peuvent être mis à profit pour déterminer un arbre de filiation. Il est également possible de reconstruire partiellement la langue à l'origine des différentes langues filles par comparaison et analyse des différentes correspondances phonétiques. Ces langues anciennes aujourd'hui disparues portent le nom de **proto-langues**.

Ces recherches ont un impact important sur la question de l'origine du langage, puisqu'elles attestent l'existence de langues anciennes dont dérivent les langues actuelles. L'évolution récente des langues est mieux maîtrisée, et par application récursive du processus de descendance, il devient possible d'envisager une origine commune pour toutes les langues actuelles. Cette hypothèse est bien sûr mise en relation avec l'histoire des peuples et les vagues de migrations humaines ; on imagine un peuple fondateur et sa langue qui se seraient répandus sur la Terre et diversifiés. L'ancien mythe de la langue originelle se connote de scientificité.

Ces recherches vont bien entendu se développer tout au long du XXème siècle, avec la proposition de familles linguistiques toujours plus vastes et globalisantes⁴. La famille nostratique, super-famille regroupant la plupart des langages d'Europe, d'Afrique du nord et d'Asie du nord, a ainsi été proposée dans les années 1960 par l'école russe (principalement par les linguistes

⁴On oppose classiquement les "*lumpers*" (*to lump* : mettre en tas), qui tentent de regrouper les langues en familles toujours plus vastes, aux *splitters* (*to split* : scinder), qui se dirigent dans la direction opposée.

Aharon Dolgopolsky, Vitaly Shevoroshkin et Vladislav Illich-Svitch).

Joseph Greenberg (1915-2001), considéré par certains comme le plus grand taxonomiste linguistique et typologiste du XXème siècle, a énormément contribué au “*lumping*” linguistique, en développant entre autre la méthode de la *comparaison multi-latérale* ou *comparaison de masse*. Cette méthode étend le cadre strict de la reconstruction linguistique décrit plus haut. Pour ce faire, des ensembles beaucoup plus vastes de mots sont considérés, avec des correspondances sémantiques moins strictes lors de la comparaisons entre les termes.

Greenberg s’est tout d’abord illustré dans les années 1950 avec une proposition de classification en quatre familles d’une grande partie des langues d’Afrique [Greenberg, 1966]. Riche de plus de 1200 langues, le domaine était alors très peu ordonné, hormis quelques aires comme celles des langues bantoues ou sémitiques. Tout d’abord sévèrement critiquée, cette classification est aujourd’hui très largement admise.

Les classifications ultérieures de Greenberg firent moins l’objet d’un consensus :

- une classification en une seule famille des langues de Nouvelle-Guinée en 1971 (langues qui étaient alors virtuellement inexplorées) ;
- en 1987, une classification en 3 familles (seulement) des langues du Nouveau Monde, en totale opposition avec la vision très parcellaire alors en valeur : la famille amérind, et les familles na-déné et eskimo-aleut (les deux dernières ne faisaient pas l’objet de controverses) [Greenberg, 1987] ;
- au tournant du XXIème siècle, la proposition d’une famille Eurasiatique regroupant l’Indo-Européen, la plupart des langues d’Asie du nord (ouralique, turc, mongol, ainou, chuckchikamchatkan, japonais, coréen, tongouse, gilyak), et l’eskimo-aleut en Amérique du nord.

Joseph Greenberg s’est également illustré par ces travaux en typologie. Il promut en particulier l’étude, non seulement des similarités typologiques entre langues génétiquement reliées, mais également entre langues non nécessairement reliées. Il fut ainsi l’un des premiers à souligner l’existence d’universaux linguistiques, et à montrer comment la typologie peut aider au travail de comparaison linguistique.

Elève de Greenberg, Merritt Ruhlen s’inscrit dans le prolongement de ses idées et de ses travaux. Auteur d’un ouvrage de référence sur la classification des langues du monde [Ruhlen, 1987] (voir la figure 1.1 pour une carte des 12 macro-familles de langues identifiées par Ruhlen), il est surtout connu (et abondamment critiqué) pour ses propositions de reconstruction de la langue originelle, baptisée *proto-world*. Ruhlen estime ainsi avoir mis au jour des éléments lexicaux de cette proto-langue, à l’aide de la méthode mise au point par Greenberg, comme le montre l’exemple suivant pour le mot *doigt* :

“Another striking resemblance among the world’s language families is a word whose original meaning was probably ‘finger’ (though it has evolved to ‘one’ and ‘hand’ [= ‘fingers’] in many languages), and whose original form was something like tik. I first became aware of the widespread nature of this root at a public lecture that Greenberg gave at Stanford in 1977, in which he mentioned three roots that were widely distributed around the world : tik ‘finger,’ pal ‘two’ (which we will look at in the following section), and par ‘to fly.’ As you no doubt noticed in your examination of Table 10, no less than eight of the twelve families show traces of tik ‘finger,one,’ namely, Nilo-Saharan (B), Niger-Kordofanian (C), Afro-Asiatic (D), Eurasiatic (G),

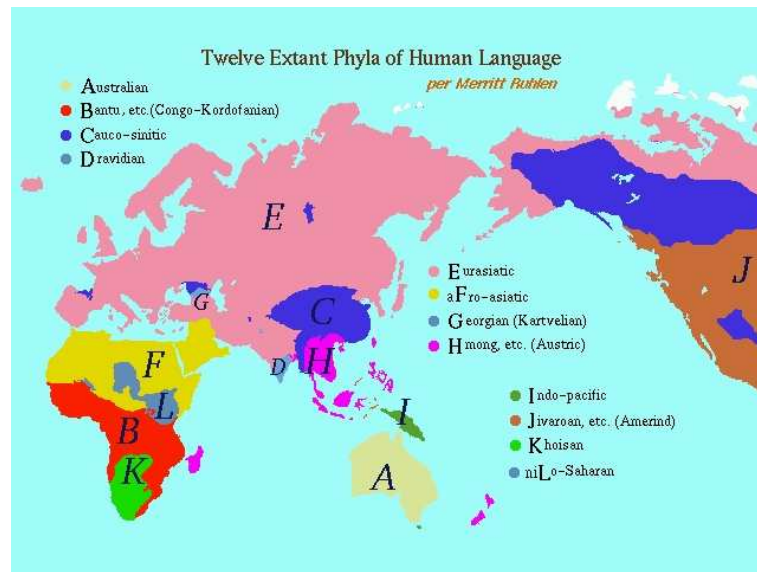


FIG. 1.1 – Les 12 grandes familles linguistiques de Merritt Ruhlen

Dene-Caucasian (H), Austriac (I), Indo-Pacific (J) and Amerind (L).” [Ruhlen, 1994] (p. 115)

Afin d’enrichir ces propositions, Merritt Ruhlen tente d’intégrer des données issues de la paléo-anthropologie, comme l’existence de grandes vagues de migrations humaines que nous introduirons par la suite.

Une des questions fondamentales relatives à l’ensemble de ces travaux est de pouvoir dater plus ou moins précisément quand les proto-langues étaient effectivement parlées, et incidemment de mesurer la vitesse à laquelle les langues évoluent.

Une des premières tentatives en ce sens est celle de la **glottochronologie** proposée dans les années 1950 par Morris Swadesh. Son but est de déterminer la date de divergence entre deux langues à partir de l’examen des cognats entre ces langues (un cognat est un couple de mots (un par langue) qui partagent une origine commune ; voir plus haut). Son postulat est que les vocabulaires de base de toutes les langues changent au même rythme, constant, de façon analogue par exemple à la dégradation du carbone 14 dans les éléments fossiles. Ces changements sont dus à des changements internes ou à de l’emprunt (qui doit normalement être minime⁵). En comparant des langues modernes à des langues anciennes bien connues comme le latin, des estimations des taux de changements furent calculées. Pour la liste de 200 mots de Swadesh, 81% sont ainsi préservés à la fin d’une période de 1 000 ans.

La formule principale est la suivante :

$$t = \frac{\log(c)}{2 \cdot \log(r)}$$

où t est le temps de séparation entre deux langues, c le pourcentage de cognats entre ces deux langues, et r la *constante glottochronologique*, égale à 81% pour une liste de 200 mots.

⁵Voir [Minett and Wang, 2002] pour des algorithmes de détection d’emprunt par analyse d’arborescence de langues.

Cette dernière constante permet de calibrer la formule, et comme nous l'avons vu plus haut, n'est pas le résultat d'un calcul mathématique, mais celui d'une observation de certaines langues contemporaines et antiques.

La glottochronologie est aujourd'hui tombée en désuétude, car la plupart des auteurs contestent la pertinence des listes de vocabulaire de base, et surtout le rythme constant de changement du vocabulaire de base (à la fois sur un intervalle de temps pour une langue et entre les langues). Celui-ci est en effet vraisemblablement "parasité" par les emprunts, les tabous linguistiques, les traditions littéraires, les sentiments d'appartenance nationale (la défense de la langue française est un bon exemple), les structures sociétales... Des études et des théories plus récentes mettent en valeur les variations possibles de la vitesse d'évolution des langues, comme les propositions de Dixon basées sur la notion d'équilibre ponctué, que nous décrirons au chapitre prochain.

La notion de stock de Johanna Nichols correspond à la reconstruction la plus large permise par la linguistique historique. Un stock est ainsi un groupement de langues de la diversité et de la profondeur historique de l'indo-européen, présentant des correspondances régulières, un nombre de cognats significatifs et des proximités grammaticales consistantes [Nichols, 1992] (p. 24-25).

Un important point méthodologique se trouve en jeu pour les reconstructions historiques à grande profondeur. Le renouvellement du vocabulaire de base, même à rythme non constant, semble inéluctable, et la conclusion logique est qu'un intervalle de temps trop important conduit à un remplacement quasiment total du vocabulaire, et masque donc la forme de la proto-langue. Il devient alors non pertinent de détecter des ressemblances entre mots, puisque l'on travaille "sous le niveau du bruit" : les ressemblances ne sont dues qu'au hasard⁶. La question du rythme de changement est évidemment cruciale, et certaines langues comme celles d'Australie sont considérées comme beaucoup plus stables que d'autres (voir ici encore les théories de Dixon au chapitre 2). La question est dès lors de savoir si 8,000 ou 10,000 ans représentent une limite supérieure, comme le pensent la majorité des linguistes, ou s'il est possible de reconstruire des langues parlées il y a plusieurs dizaines de milliers d'années, comme le pense par exemple Merritt Ruhlen. Le débat porte naturellement sur les différences de performance et de pertinence entre les méthodes de reconstruction classiques et les comparaisons multi-latérales. Les défenseurs des méthodes de comparaisons multi-latérales pensent que travailler sur de plus larges ensembles de mots augmente les chances de détecter des correspondances qui ont subsisté. A l'opposé, Donald Ringe est un des critiques les plus virulents à ce sujet et résume la pensée de nombreux linguistes :

"The consensus of opinion among mainstream historical linguists is that while all human languages are likely to be genetically related, the remoter relationships cannot be demonstrated by reliable linguistic methods because the languages in question have diverged too much. From time to time this conventional wisdom is challenged by scholars who claim to have demonstrated one or more remote relationships." [Ringe, 1992] (p. 1)

"Since the burdon of proof is always on those who claim to have demonstrated a previously undemonstrated linguistic relationship, it is very surprising that those who have recently tried to demonstrate connections between far-flung language families have not even addressed the question of chance resemblance. This omission calls their entire enterprise into question." [Ringe, 1992]

⁶Lorsque l'on détecte des ressemblances entre deux langues, elles peuvent être dues à une relation génétique, à des emprunts, ou au hasard.

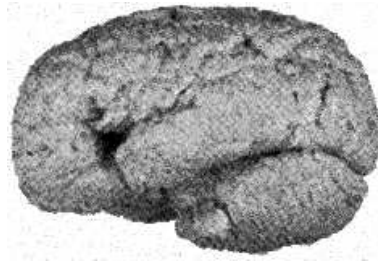


FIG. 1.2 – Le cerveau du patient “Tan” de Paul Broca

(p. 81)

Les équivalences phonétiques et les glissements sémantiques qui sont utilisés pour rapprocher certains mots élargissent en effet l'espace des correspondances possibles. Un modèle mathématique probabiliste récent dû à des chercheurs de l'Institut de la Communication Parlée (ICP) de Grenoble semble ainsi démontrer que le seul hasard peut rendre compte des racines mondiales mises en valeur par Ruhlen [Métoz et al., 2002]. Bien sûr, évaluer des distances phonétiques ou sémantiques reste un challenge à l'heure actuelle, et il est difficile de décider aujourd'hui si les libertés prises lors de certaines comparaisons sont réellement préjudiciables à l'entreprise. En conséquence, il semble à l'heure actuelle que le meilleur atout des partisans des macro-familles soit peut-être la prise en compte d'aspects typologiques en sus des comparaisons entre mots, travail initié par Greenberg (voir par exemple [Whitehouse et al., 2002]), ou des études probabilistes plus poussées de leurs arguments.

Aspects physiologiques et évolutifs ; aires cérébrales du langage et évolution Darwinienne

Découverte des aires de Broca et de Wernicke Un autre pas important est franchi au XIX^{ème} siècle avec la découverte d'aires cérébrales impliquées dans le traitement du langage.

En 1861, le docteur Paul Pierre Broca (1824-1880) présente ces observations sur un sujet baptisé *Tan* à la Société Anatomique de Paris. Ce sujet, qui était son premier patient à l'hôpital Bicêtre, présentait une lésion neuro-syphilitique de l'hémisphère gauche du cerveau (voir figure 1.2), ainsi que des troubles du langage (son surnom était en fait le seul mot qu'il prononçait). Broca établit la corrélation et la fonction pour la production de la parole de l'aire qui porte aujourd'hui son nom.

Si son nom semble indiquer l'implication de l'aire éponyme, l'aphasie de Broca au niveau du contrôle moteur de la parole est cependant aujourd'hui dissociée des lésions dans cette région du cerveau [Fanny Meunier, communication personnelle].

Treize ans plus tard, le docteur Karl Wernicke (1848-1904) met à jour le rôle d'une seconde aire dans la compréhension de la parole, aire qui porte aujourd'hui son nom [Wernicke, 1874]. Les personnes touchées par l'aphasie de Wernicke (lésion dans le lobe temporal) sont en effet incapables de comprendre les mots qu'elles entendent et de produire des phrases sensées, bien que la structure grammaticale de leurs productions demeure correcte.

A travers ces travaux, et par la suite avec le développement de l'ensemble de la psychologie et des neurosciences, le lien entre la faculté de langage et le substrat neuronal va se trouver toujours plus renforcé. Une des lointaines conséquences de ces premières découvertes sera la proposition d'un organe du langage dans le cerveau.

Mise au jour de l'évolution des espèces Une des découvertes les plus importantes du XIX^{ème} siècle est sûrement celle des mécanismes de l'évolution par Charles Darwin [Darwin, 1859]. Par l'observation de la faune et de la flore des îles Galapagos, il démontre que l'évolution agit par différenciation et évolution *graduelle* des espèces ("*Natura non facit saltum*", la nature ne fait pas de bonds). Les êtres vivants contemporains descendent ainsi d'ancêtres communs plus ou moins lointains. L'évolution est le produit d'adaptations, c'est à dire de modifications du comportement ou d'attributs phénotypiques qui améliore l'adéquation d'un organisme à son environnement.

L'homme se voit ainsi inclus de façon tangible dans le règne animal. Cette révolution fondera l'ensemble des études comparatives entre les systèmes de communication animaux et le langage humain, ainsi que la question du passage des premiers à ce dernier.

En outre, sur une échelle temporelle plus restreinte, il devient possible de replacer l'émergence de la faculté de langage dans la phylogénie humaine (cette question sera surtout d'actualité à la fin du XX^{ème} siècle), et d'envisager les "raisons" qui ont conduit à son émergence. Darwin lui-même se penche sur cette question, et conclut que c'est la plus grande intelligence de l'homme qui lui permet de parler :

"Le fait que les singes supérieurs n'utilisent pas leur organes vocaux pour la parole est dû indubitablement au fait que leur intelligence est insuffisamment développée." [Darwin, 1871]

Les interdits des sociétés linguistiques et la naissance du structuralisme

Malgré les progrès que nous venons d'évoquer précédemment, la chape des conceptions religieuses continue de peser sur la question de l'origine du langage au XIX^{ème} siècle. Parallèlement à ces pressions sociales se développe également un courant scientifique caractérisé par une plus grande rigueur dans l'établissement des faits et des conclusions scientifiques.

Conséquence peut-être du rigorisme de ce courant, la question de l'origine du langage perd de sa pertinence aux yeux de certains savants de l'époque. Les outils utilisés pour son étude sont considérés comme trop limités ou inconsistants, et les hypothèses farfelues trop nombreuses⁷.

Sous les deux influences religieuse et scientifique précédentes, la prestigieuse *Société Linguistique de Paris* décide en 1866 d'interdire en son sein toute communication relative à l'origine du langage. L'interdit est repris en 1911 par la *Philosophical Society de Londres*.

La linguistique moderne s'est donc établie pendant la majeure partie du XX^{ème} siècle sur un rejet hors de ses frontières de la question de l'origine du langage, peut-être à juste titre.

Parmi ses développements sans relation directe avec la question de l'origine des langues et du langage (et nous tenterons de rectifier ceci au cours de notre travail), il convient de mentionner

⁷On peut ici entrevoir un parallèle avec l'émergence du courant behavioriste en psychologie, sous l'influence de John B. Watson au début du XX^{ème} siècle. Le cerveau constituant une sorte de boîte noire, les études doivent principalement porter sur les comportements, et non sur états intérieurs qui, bien que réels, ne peuvent être étudiés scientifiquement (rejet de l'introspection).

les travaux du Suisse Ferdinand de Saussure (1857-1913) avant d'effacer la première moitié du XX^{ème} siècle de notre exposé. Saussure est souvent considéré comme le père de la linguistique moderne et le fondateur du courant structuraliste, qui va dominer la linguistique avant les années 1960, avant de s'étendre à d'autres disciplines comme l'anthropologie (sous l'influence en particulier de Levi-Strauss). Parmi les concepts-clés aujourd'hui usuels introduits par Saussure, en particulier dans son célèbre *Cours de linguistique générale* publié en 1916 [Saussure, 1959] : la notion d'arbitraire du signe, l'opposition entre langue et parole, la distinction entre synchronie et diachronie...

Les conceptions de Saussure sont surtout caractérisées par les considérations systémiques qui sont appliquées au langage, système "fonctionnel" dont le but est l'expression et la communication. Le structuralisme se propose ainsi d'étudier le système linguistique en soi et en tant que structure (décomposable). Il repose sur les postulats d'indépendance de la forme et d'autonomie du langage :

- le premier stipule que la forme linguistique constitue un système *autonome* de composants en interaction, chaque élément du système étant défini par rapport aux autres ;
- le second postulat exprime qu'un signe linguistique ne relie pas une expression et un objet du monde, mais un signifiant et un signifié (d'où émergera le célèbre triangle sémiotique référent - signifiant - signifié). Les signes se closent en un système indépendant et doivent être étudiés comme tel, plutôt que par le biais de leurs relations au domaine extra-linguistique. En conséquence, la théorie de la valeur de Saussure stipule que la valeur d'une expression n'est rien d'autre que les relations qu'un signe entretient avec d'autres.

Le courant structuraliste s'est développé en particulier grâce aux travaux du *Cercle Linguistique de Prague*, fondé en Octobre 1926 par S.O. Kartsevski, N.S. Trubetskoj et R. Jakobson. L'école pragoise s'est illustré entre autres dans le domaine de la morphologie et la phonologie. Dans ce dernier champ, la différence entre phonologie et phonétique fut établie, ainsi que la définition du phonème comme plus petite unité fonctionnelle, définie par un système d'oppositions permettant de distinguer deux unités sémantiques (les paires minimales, par exemple "pour" et "paire" en français pour la distinction entre les phonèmes [u] et [ε]).

La révolution Chomskienne

La seconde partie du XX^{ème} siècle va connaître une véritable révolution sous l'influence du linguiste (et analyste politique) américain Noam Avram Chomsky (1928-). Ses travaux vont marquer la naissance du courant formaliste, une évolution vers l'analyse des niveaux supérieurs du langage (par rapport aux études linguistiques mentionnées à la fin de la dernière section), ainsi qu'une certaine désaffection pour les études sur l'origine du langage et des langues, due aux conceptions Chomskiennes sur ce point.

Initialement intéressé par l'activité cognitive qui permet la production et la compréhension du discours⁸, ainsi que par la logique et les fondements mathématiques, Chomsky va développer le concept de **transformation**. Une transformation est un ensemble ordonné de règles qui permet le passage d'une forme profonde à une forme de surface. La première correspond à des représentations mentales du langage manipulées par l'appareil cognitif et qui contiennent le sens de la phrase ; la seconde correspond à une structure linguistique telle qu'elle apparaît dans la

⁸Ce qui constituait une enfreinte forte à la position behavioriste encore dominante en psychologie.

langue (mots et sons). Le livre *Syntactic Structures* [Chomsky, 1957] développe les concepts de *grammaires transformationnelles* ou *génératives* ; chacune est composée de l'ensemble des transformations pour une langue particulière⁹.

Cette approche novatrice de la syntaxe est résolument ancrée dans un cadre mathématico-logique, et l'arbre est la représentation de base pour les transformations. Chomsky travaille sur le pouvoir d'expressivité des grammaires et définit une hiérarchie des langages, ainsi que des grammaires et machines associées (machines au sens informatique d'un procédé permettant d'engendrer exactement toutes les phrases permises par la grammaire, et aucune autre) :

- langage régulier (engendré par des grammaires régulières linéaires à gauche ou à droite) ;
- langage libre de contexte (grammaire “context-free”, ou grammaire algébrique ou libre de contexte) ;
- langage dépendant du contexte (grammaire “context-sensitive” ou dépendante du contexte) ;
- langage récursivement énumérable (grammaire non restreinte et machine de Turing).

Cette classification est toujours utilisée en informatique aujourd'hui.

Comme l'exemple précédent des grammaires voulait le signaler, on assiste ainsi à une formalisation de l'activité cognitive linguistique, qui donne son nom au courant *formaliste*. Mais l'une des principales propositions de Chomsky est la suivante : l'existence d'une (méta-)grammaire innée, appelée **grammaire universelle**, qui peut engendrer les grammaires de toutes les langues du monde. L'argumentation de Chomsky s'articule sur les points suivants : en rupture avec les conceptions antérieures qui considéraient l'acquisition du langage comme une tâche aisée (et se demandaient même pourquoi le jeune enfant met si longtemps à parler), Chomsky émet l'idée que l'acquisition d'une langue est au contraire une tâche très ardue. Il tente de démontrer qu'un enfant peut produire ou comprendre des phrases qu'il n'avait jamais entendues auparavant, et ceci avec un nombre très limité d'“entrées” (*inputs*). Cet aspect “créatif” du langage est particulièrement mis en exergue sur un plan théorique par le fait que ce nombre de phrases qu'il est possible de produire est infini, alors que l'input est fini. Cet argument est connu sous le nom de **“pauvreté du stimulus”**. En outre, l'enfant ne reçoit que des instanciations positives de la langue cible (des phrases correctes syntaxiquement), alors que des instanciations négatives faciliteraient son apprentissage sur un plan théorique (s'il possède en outre l'information que la phrase est erronée).

Pour Chomsky, il est ainsi impossible d'apprendre une langue sur la seule base d'exemples provenant du milieu extérieur. Il en conclut qu'il doit exister une capacité innée permettant l'apprentissage et qui explique la grande rapidité de celui-ci. Cette capacité, connaissance innée des principes syntaxiques généraux des langues, va prendre différentes formes selon les époques et les auteurs. Une dénomination classique est celle de *LAD* ou ***Language Acquisition Device*** [Chomsky, 1965]. Cette appellation ne désigne pas nécessairement un organe physiologique précis dans le cerveau, bien que cette proposition ait été émise (et soit raisonnablement rejetée aujourd'hui), mais de façon générale un mécanisme encodé dans les gènes et exprimé par le biais de la circuiterie neurale. Le terme de **grammaire universelle** résume la qualité de ce mécanisme qui permet l'acquisition d'une grammaire particulière grâce à une connaissance innée

⁹Ce livre est considéré par beaucoup comme l'œuvre scientifique la plus importante du XXème siècle.

des caractéristiques universelles des grammaires des langues. Le terme de grammaire peut-être entendu au sens large, puisque les théories générativistes s'étendent également à la phonologie. La phonologie générativiste a ainsi été initiée avec le livre *The Sound Pattern of English* de Chomsky et Halle en 1968.

Un point fondamental pour la réflexion sur l'origine du langage est l'aspect dédié, spécifique, de ce module pour le traitement linguistique. Pour Chomsky, l'acquisition du langage ne repose pas sur une instanciation de capacités cognitives plus générales. Cet argument repose en particulier sur une indépendance de la syntaxe et de la sémantique, indépendance illustrée par la célèbre phrase syntaxiquement correcte mais sémantiquement non pertinente "Colorless green ideas sleep furiously".

De nombreux chercheurs ont repris et développé les idées de Chomsky, et ont tenté de consolider ses propositions. Lui-même a progressivement enrichi ces travaux, depuis la *théorie standard étendue* jusqu'au *programme minimaliste* des années 1990 [Pollock, 1997]. En 1981, Chomsky a en particulier proposé la théorie **Government and Binding**. Cette théorie reprend les principes des grammaires universelles et transformationnelles, et tente de généraliser les structures syntaxiques (comme les *Verbal Phrase (VP)* ou *Nominal Phrase (NP)*) à l'aide de lois générales basées sur les notions de spécifieurs, de têtes et de compléments (loi pour la structure de phrase et structure X-bar). La "*X-bar theory*" postule ainsi que l'ensemble des phrases d'une langue (NPs, VPs...) obéissent à une même loi de structuration, qui porte sur la position de la tête et des spécifieurs. Plus généralement, l'objectif général de la théorie *Government and binding* est de modérer la trop grande puissance qui était celle des grammaires transformationnelles, en imposant des contraintes sur les mouvements des structures syntaxiques [Black, 1999].

Parallèlement à la théorie précédente, Chomsky a proposé une structuration de la grammaire universelle qui rende compte de la grande richesse de celle-ci pour décrire précisément les contraintes qui pèsent sur chaque langue et consécutivement de la grande variabilité linguistique des langues du monde [Pollock, 1997] (p. 205-206). La **théorie des Principes et des Paramètres** suppose un ensemble de principes qui composent la grammaire universelle, et qui peuvent être rapidement testés par l'enfant pour déterminer la grammaire spécifique de la langue cible qu'il acquiert [Chomsky, 1981]. Une langue du monde correspond ainsi à un certain "réglage" de l'ensemble des principes via un jeu de paramètres. Il existerait ainsi par exemple un principe établissant que la phrase est la structure de toutes les langues du monde, et des paramètres correspondants pour indiquer la position de la tête et du spécifieur dans une langue particulière [Black, 1999] (p. 12-21), comme par exemple :

- tête initiale et spécifieur initial comme en anglais ou dans les autres langues SVO : par exemple, dans la phrase nominale "the house that Paul had bought", le spécifieur *the* arrive avant la projection intermédiaire *house Paul had bought*, et la tête *house* arrive avant son complément *that Paul had bought* ;
- tête finale et spécifieur initial comme en Japonais ou dans les autres langues SOV. Par exemple dans la phrase prépositionnelle japonaise "*Nihon ni*" (Japon - au), la tête *ni* se trouve en position finale.

Parmi les "applications" des théories Chomskiennes, l'étude de langues "émergentes" est particulièrement intéressante pour la question de l'origine du langage et des langues.

Les **créoles** sont un premier exemple. Langues qui émergent dans des contextes de contacts linguistiques pour permettre l'inter-compréhension, ils divergent structurellement des langues dont provient leur vocabulaire. Il est courant de rapprocher les créoles des **pidgins**. Ces derniers servent également à l'inter-communicabilité entre deux populations de langues différentes, et sont parfois définis comme des langues sans locuteurs natifs, à la différence des créoles. Comme ces derniers, ils présentent des différences importantes de structure avec leurs *lexifieurs* : perte importante de morphologie flexionnelle, réduction de la taille du vocabulaire, structures grammaticales influencées par celles des langues natives des locuteurs mais différentes. Ils empruntent souvent majoritairement leur grammaire à une langue (via les transformations mentionnées précédemment), et leur vocabulaire à une seconde.

Outre leur caractère non-natif, les pidgins diffèrent des créoles par une plus grande simplicité structurelle et stylistique, au moins initialement. Ils peuvent néanmoins se complexifier au cours du temps, et de nombreux auteurs assimilent en fait pidgins étendus et créoles, et n'attribuent pas la complexification de la langue au processus de *nativisation*. Salikoko Mufwéné refuse également que les créoles soient des pidgins passés par un stade de nativisation :

“If creoles had really been developed by children, they would be languages in arrested development stage. The alternative is that they would have acquired adult structures when the children became adults, which raises the question of why their parents would have been incapable of developing such structures during the pidgin stage. Would slavery have affected their language faculties so adversely?” [Mufwene, 2001] (p. 7)

En outre, Mufwene rappelle que le terme *pidgin* est apparue plus d'un siècle après celui de *créole* et que pidgins et créoles correspondent en fait à des régions géographiques différentes. Il dénonce enfin le caractère arbitraire de l'attribution de l'un ou l'autre terme à une situation réelle, décision édictée une fois pour toute de façon souvent erronée¹⁰ [Mufwene, Colloque Origine et Evolution des Langues, Collège de France, 26-27 Septembre 2002].

Derek Bickerton, créoliste spécialisé dans les créoles de Hawaï'i, défend la position opposée. Selon lui, les langages ancestraux des locuteurs ne jouent aucun rôle dans l'acquisition du créole par les locuteurs natifs. Ceci s'observe selon lui par la discontinuité grammaticale entre le créole et les langues mères, ainsi que par les proximités structurelles entre créoles d'origines différentes. Il existe ainsi une *rupture de transmission*, et la richesse syntaxique des créoles, qui peut se développer en l'espace d'une seule génération, s'explique par le fait d'une connaissance innée des principes syntaxiques qui bâtissent les langues qui s'expriment lors du processus de nativisation. L'hypothèse d'un programme biologique du langage (*language bioprogram hypothesis* ou LBH) correspond à cette capacité qui peut s'exprimer chez des enfants dans un contexte de pauvreté linguistique [Bickerton, 1988]. Cette hypothèse est bien sûr en relation avec les propositions de Chomsky.

Un autre exemple de langue “émergente” se situe en Amérique Centrale, plus précisément

¹⁰Pidgins et créoles se sont particulièrement développés avec l'esclavage des 17ème et 18ème siècles, et la rencontre entre locuteurs de différentes langues d'Afrique de l'Ouest d'une part, entre colonisateurs Européens et populations locales d'autre part. Le Tok Pisin, créole anglais parlé en Nouvelle-Guinée, est un exemple de rencontre entre l'anglais et les langues locales de l'île. Les créoles sont aujourd'hui langues natives de 10 à 15 millions d'individus. Les créoles français comportent 7 millions de locuteurs à Haïti, sur les îles Maurice, de la Réunion, de la Guadeloupe, de Dominique, en Guyane et en Louisiane.

au Nicaragua, où son évolution a été suivie en détail par une linguiste spécialisée en langues des signes et étudiante de Chomsky : Judith Kegl. Avant la révolution Sandiniste de 1979, le système éducatif du pays ne prenait pas en considération les enfants sourds. Ces derniers, non scolarisés et souvent isolés, ne parvenaient que très peu à communiquer avec d'autres personnes, si ce n'est à l'aide de gestes rudimentaires. L'ouverture d'une école pour ces enfants permit de les rassembler, et si la technique de lecture sur les lèvres n'offrit que peu de résultats, les enfants entrèrent rapidement en interaction grâce à une langue des signes qu'ils développèrent progressivement à partir des signes qu'ils utilisaient chez eux. Alors que les premiers enfants signaient une langue assez rudimentaire, les nouveaux arrivants la transformèrent en une langue beaucoup plus sophistiquée, riche au niveau lexical comme au niveau syntaxique, et suffisamment abstraite pour exprimer une très large panoplie d'idées dépassant de loin les simples désirs ou événements du contexte.

Deux conclusions tout à fait opposées peuvent être tirées de l'observation d'émergences de langues des signes. Une première, dans le cadre Chomskien (adopté par Kegl ou Bickerton), stipule que la rapidité avec laquelle la langue s'est développée ne peut s'expliquer que par une connaissance du langage inscrite dans le cerveau : les notions basiques de verbes, de sujet et d'objet, celles de structures phrastiques... sont présentes de façon innée chez l'enfant.

Une autre conclusion est qu'il n'est pas nécessaire de supposer des mécanismes syntaxiques innés pour rendre compte de l'émergence extrêmement rapide de certaines langues des signes. Sonia Ragir rapporte ainsi les observations de Newport (1999), qui semblent indiquer que l'apprentissage de l'ASL par un enfant sourd par le biais de parents qui manient imparfaitement ce langage ne montre pas les transformations radicales prédites par la mise en jeu de principes syntaxiques innés. L'enfant aurait plutôt tendance à sélectionner et à faire ressortir les traits pertinents du langage auquel il a accès. Cette situation est assez proche de celle des enfants sourds décrite plus haut [Ragir, 2002].

1.1.3 Le renouveau des études sur l'origine du langage

Le cadre de pensée Chomskien a profondément marqué la linguistique de la seconde partie du XX^{ème} siècle. Il a entraîné l'apparition de nouveaux champs de l'étude linguistique, nourris entre autres du lien nouveau entre le langage et la machine, et substantialisés par l'approche logico-mathématique chomskienne. Le traitement du langage naturel, la traduction automatique, connurent un essor important dans les années 1960, avec des espoirs qui furent cependant quelque peu déçus par la suite.

Encodage génétique de la faculté de langage

Parallèlement au développement de la linguistique formaliste, la question de l'origine du langage fut éclipsée par la position innéiste forte proposée par Chomsky. En refusant la thèse d'une continuité entre les systèmes de communication animaux et le langage humain, Chomsky postule que ce dernier est apparu soudainement, éventuellement par le biais d'une macro-mutation génétique. Cette position rend évidemment non pertinente une partie de l'étude de l'évolution du langage, puisque la faculté de langage est supposée ancrée dans les gènes et donc majoritairement résistante à l'impact culturel, ce qui impose une certaine forme de contrainte de staticité sur les structures linguistiques.

Ce problème de l'encodage génétique d'une certaine faculté de langage a bien sûr été au

cœur de la critique envers les théories Chomskiennes. D'une certaine façon, la proposition de Noam Chomsky repousse le problème fondamental de l'apprentissage linguistique à un niveau antérieur : comment la grammaire universelle a-t-elle pu apparaître ? Ce second problème de l'émergence de la faculté de langage est ensuite résolu par l'invocation d'une apparition *ad hoc*¹¹. Un des arguments contre cette macro-mutation a bien sûr été le caractère extrêmement improbable d'une telle mutation aux conséquences si importantes. Le problème de sa diffusion dans la communauté a également été envisagé : si un individu subit la mutation, comment peut-elle être valorisée en terme d'*avantage reproductif* si aucun des congénères ne "répond présent" ? La faculté de langage est une fonction qui s'*auto-catalyse*"¹².

Les aspects génétiques n'ont bien sûr pas été les seuls à être attaqués. Deux courants linguistiques en particulier ont développé une résistance aux positions innéistes.

Les courants fonctionnalistes et cognitivistes

La linguistique cognitive entend démontrer comment divers mécanismes linguistiques peuvent être reliés au reste des processus cognitifs. Cette définition la place d'emblée hors du paradigme Chomskien d'étude du langage. Nous pouvons citer ici Gilles Fauconnier, qui avec Mark Turner, Langacker, Talmy ou Lakoff, est l'un des chercheurs très influents de la discipline :

"In contrast to this sharply autonomous view of language structure, cognitive linguistics has resurrected an older tradition. In that tradition, language is in the service of constructing and communicating meaning, and it is for the linguist and cognitive scientist a window into the mind. Seeing through that window, however, is not obvious. Deep features of our thinking, cognitive processes, and social communication need to be brought in, correlated, and associated with their linguistic manifestations. . . Language is only the tip of a spectacular cognitive iceberg, and when we engage in any language activity, be it mundane or artistically creative, we draw unconsciously on vast cognitive resources, call up innumerable models and frames, set up multiple connections, coordinate large arrays of information, and engage in creative mappings, transfers, and elaborations." [Fauconnier, 2000]

L'approche de Langacker est la production de fondements cognitifs aux phénomènes sémantiques et syntaxiques, tandis que le travail de Lakoff s'articule surtout autour des notions de métaphore et de catégories conceptuelles (description du système conceptuel humain pour des concepts comme le temps, la morale, la politique. . .). Fauconnier et Turner ont quant à eux développé le concept de *blending*, qui correspond à l'existence de frames sémantiques intégratrices au niveau cognitif, permettant entre autre l'analyse sémantique du langage. Le *double scope blending*, forme la plus élaborée de *blending*, qui permet de confronter deux frames très

¹¹S'il est possible de définir les *noeuds gorgiens* de toute théorie, c'est à dire les points précis sur lesquels se concentrent les fondements et les difficultés conceptuelles de celle-ci, alors l'apparition de la faculté innée de langage représente sans aucun doute le noeud principal pour les théories innéistes.

¹²Il est intéressant de noter que la possibilité de macro-mutation, décrite par de très nombreux chercheurs, n'est pas écarté par les découvertes récentes de la génétique. L'argument selon lequel le nombre de gènes pour coder une telle capacité linguistique serait trop important est partiellement contré par l'extrême non-linéarité qui caractérise le passage du génotype au phénotype (ce dernier est ici constitué de réseaux neuronaux spécifiques). Un changement minime au niveau génétique peut avoir de profondes conséquences au niveau phénotypique. La simple modification de la position d'un facteur de croissance pour un gène peut entraîner des variations dans les directions de croissance des aires cérébrales. On peut toutefois rester suspicieux sur l'apparition d'une grammaire universelle, stable et performante, causée par la modification de quelques gènes.

différentes ou incompatibles, est considéré par Turner et Fauconnier comme l'avantage des êtres humains sur le reste du règne animal, et permettrait l'ensemble des activités humaines spécifiques : le langage, la danse, les arts, la religion, . . . Citons enfin les travaux de Talmy Givón : ses théories sont en particulier basées sur l'existence de 2 classes de mots, les mots de classe ouverte qui correspondent au système lexical (racines nominales, verbales ou d'adjectifs), et les mots de classe fermée, qui correspondent au système grammatical (catégories, relations et structures grammaticales). Turner résume l'importance de ces deux concepts :

“Our capacity for language depends on our ability to integrate disparate conceptual contents and conceptual structures to create unified cognitive representations, and equally on our ability to use a relatively limited inventory of grammatical and lexical forms to prompt for virtually unlimited ranges of cognitive representations.” [Turner, 2000]

Parallèlement à la linguistique cognitive, la linguistique fonctionnelle s'est développée dans les années 1970 et 1980, particulièrement le long de la côte ouest des Etats-Unis. Elle dérive partiellement du courant structuraliste et des conceptions fonctionnelles de Saussure.

Le fonctionnalisme, tel qu'on peut le définir par rapport aux courants formalistes, est une approche linguistique qui part du postulat que la structure du langage n'est pas la résultante d'un encodage génétique ou d'un module cérébral spécifique, mais plutôt d'une adaptation aux fonctions qui y font appel. Le langage est une manifestation particulière de capacités cognitives générales, plutôt qu'une activité bénéficiant d'un traitement dédié. Le pragmatisme des interactions linguistiques est en conséquence particulièrement mis en avant :

“Functional grammar is based on a functional view of natural language : A language is regarded in the first place as an instrument by means of which people can enter into communicative relations with one another. From this point of view language is primarily a pragmatic phenomenon – a symbolic instrument used for communicative purposes. According to the functional view, the structure of a language cannot be adequately understood if these pragmatic purposes are left out of consideration.

In this view there is no room for such a thing as 'autonomous' syntax. On the contrary, to the extent that a clear division can be made between syntax and semantics, syntax is there for people to be able to form complex expressions by means of which complex meanings can be expressed, and such meanings are there for people to be able to communicate in differentiated ways. The study of syntax and semantics should be carried out against the background of the pragmatic conventions which determine the use of language in verbal interaction. Syntax is subservient to semantics, and semantics is subservient to pragmatics.” [Dik, 1980]

Les grammaires fonctionnelles, comme la *“Role and Reference Grammar”* de Robert Van Valin, ou la *“Functional Grammar”* de Simon Dik, sont le produit des recherches de la linguistique fonctionnelle. Les travaux de Talmy Givon déjà cités plus haut portent également sur les aspects fonctionnels du langage, et en particulier de la grammaire. L'auteur tente en particulier de replacer le fonctionnalisme linguistique dans un cadre plus large, empruntant à l'anthropologie, à la psychologie ou encore à la sociologie. . .

Nous pouvons également mentionner les travaux de Wallace Chafe, qui s'est appuyé sur des langues indiennes d'Amérique, sur les différences entre écrit et oral ou encore sur les fonctions de la prosodie pour développer un point de vue fonctionnaliste sur le langage. Il insiste en particulier sur les liens qu'entretient ce dernier avec la conscience, et fait reposer la compréhension de composantes linguistiques comme les anaphores, les temps ou les structures de clause, sur

une meilleure appréhension de la nature de la conscience.

La typologie des langues du monde, en particulier par le biais de comparaisons translinguistiques, permet d'étudier les similarités et les schémas de variations des langues. Si certains peuvent être expliqués par des éléments historiques, d'autres se voient proposer des explications fonctionnelles, et aident ainsi à mieux cerner et à replacer la capacité de langage dans le cadre d'une cognition générale. Notons que les grammaires mentionnées précédemment tentent de tirer parti des données typologiques afin de renforcer leur cohérence, en particulier au niveau fonctionnel.

Le retour sur le devant de la scène de la question de l'origine du langage, si elle est redevable aux approches cognitives et fonctionnelles, s'est surtout appuyée sur le développement et les résultats de sciences connexes dans les quinze dernières années. Celles-ci forment aujourd'hui l'ossature de l'approche pluridisciplinaire caractéristique de ce champ d'étude. Si l'on peut toujours se poser aujourd'hui la question de la pertinence des interdits des sociétés linguistiques de Paris et de Londres, force est de constater que la masse des données scientifiques pouvant servir d'arguments aux débats est dorénavant tout à fait considérable.

Avant de présenter succinctement une partie des disciplines qui participent à ce renouveau, il semble judicieux de rappeler quelques unes des spécificités de la question de l'origine du langage et des langues. Ce sont en effet elles qui expliquent partiellement la nécessité d'une approche pluridisciplinaire. Bien que parfois triviales, elles ont le mérite de soulever une partie des grandes questions sur l'origine de l'homme et du langage toujours sans réponse à l'heure actuelle.

1.2 Spécificités de la question de l'origine du langage et des langues

1.2.1 Comment définir le langage ?

Une première question, évidente à soulever mais particulièrement difficile à résoudre est celle de la définition même du langage. Certaines théories formulent en effet des hypothèses quant à la date d'émergence du langage, sans préciser davantage ce qu'elles entendent par ce mot. Le langage humain peut être inscrit dans une certaine "phylogénie" des systèmes de communication, mais les frontières qui le sépare d'eux demeurent assez floues. Les tentatives de définition comme celle de Hockett en 1966, qui proposa 16 traits distinctifs de la communication humaine, ont souvent été mises à mal dans de nombreux cas par les éthologues. La table 1.2 examine les traits proposés par Hockett pour différents systèmes de communication [Coleman, 2001].

Une distinction importante est celle qui sépare les langages oraux des systèmes de communication par gestes ou postures corporelles (y compris faciales). Nous avons vu plus haut que la complexité, l'expressivité et la composition des langues des signes peuvent être tout à fait comparables à celles des langues orales, et la question d'une communication initialement gestuelle (mais primitive par rapport aux langues des signes actuelles) chez nos ancêtres reste d'actualité. Cette hypothèse, déjà proposée au XIX^{ème} siècle, a récemment été reprise par Michael Corballis, qui y décèle plusieurs avantages [Corballis, 2000] :

- contrairement à une communication orale, elle permet d'emblée de représenter des éléments d'une façon iconique, et des représentations plus abstraites et stylisées peuvent ensuite se

1.2. Spécificités de la question de l'origine du langage et des langues

	Crickets	Bee dancing	Western meadowlark song	Gibbon calls	Signing apes	Alex, a Grey parrot	Paralinguistic phenomena	Human sign languages	Spoken language
Vocal-auditory channel	Auditory, not vocal	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	Yes
Broadcast transmission and directional reception	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Rapid fading (transitoriness)	Yes, repeated?	Yes	Yes, repeated	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Interchangeability	Limited	Limited	?	Yes	Yes	Yes	Largely yes	Yes	Yes
Total feedback	Yes	?	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	Yes
Specialization	Yes?	?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes?	Yes	Yes
Semanticity	No?	Yes	In part	Yes	Yes	Yes	Yes?	Yes	Yes
Arbitrariness	?	No	If semantic, yes	Yes	Largely yes	Yes	In part	Largely yes	Yes
Discreteness	Yes?	No	?	Yes	Yes	Yes	Largely no	Yes	Yes
Displacement	Yes, always	?	No	Yes	No	In part	Yes, often	Yes, often	Yes, often
Productivity	No	Yes	?	No	Debatable	Limited	Yes	Yes	Yes
Traditional transmission	No?	Probably not	?	?	Limited	Limited	Yes	Yes	Yes
Duality of patterning	?	No	?	No except Cotton-top tamarin	Yes	Yes	No	Yes	Yes
Prevarication					Yes	No		Yes	Yes
Reflexiveness					No?	No		Yes	Yes
Learnability					Yes	Yes		Yes	Yes

TAB. 1.2 – Examen des 16 traits de Hockett pour différents animaux et situations de communication [Coleman, 2001]

développer sur cette première base ;

- les gestes sont toujours une composante importante des communications humaines, sans compter l'existence des langues des signes ;
- elle s'inscrit dans la continuité du développement de notre lignée évolutive, avec la libération de la main. Elle s'accorde aussi avec le fait que l'utilisation de la voix chez les singes est plus liée à l'expression d'états émotifs, et ces animaux peuvent également apprendre à communiquer gestuellement (voir plus bas).

On peut se demander si une étape manuelle iconique ne représente pas une étape nécessaire avant le développement de la communication orale, qui aurait elle-même permis ensuite, après complexification et par réflexion, le développement des formes gestuelles plus sophistiquées qui existent aujourd'hui. Ce dernier développement s'appuierait sur des capacités cognitives plus générales, puisque l'exemple des enfants sourds du Nicaragua montre bien qu'une langue des signes peut émerger sans référence à une langue orale. Sous cette dernière proposition un peu vague se cache en fait la question de la pertinence de la caractéristique orale du langage humain.

Un point intéressant soulevé par Bickerton est la possibilité de considérer une forme de communication dépourvue de syntaxe. En décomposant le langage en deux composantes lexicale et syntaxique, Bickerton établit que la première de ces deux composantes a raisonnablement émergé avant la seconde [Bickerton, 1990] (p. 130-131). Ce proto-langage, basé uniquement sur des éléments lexicaux combinés de façon très simple, aurait pu être l'attribut de certains de nos ancêtres, avant que des formes plus complexes de communication ne se développent plus récemment. La caractéristique définitoire du langage considérée ici n'est autre que la syntaxe, et nous verrons par la suite comment ce point a pu être abordé par des expériences d'apprentissage

du langage à nos proches cousins grands singes.

Une troisième tentative de définition du langage peut reposer sur la notion de **symbole**. Terrence Deacon, dans son livre *The symbolic species*, reprend la classification sémiotique de Pierce des icônes, index et symboles, que nous reproduisons ci-dessous :

“Icons are mediated by a similarity between sign and object, indices are mediated by some physical or temporal connection between sign and object, and symbols are mediated by some formal and merely agreed-upon link irrespective of any physical characteristics of either sign or object.” [Deacon, 1997] (p. 70)

Les symboles peuvent former un système partiellement clos, comme les définitions d'un dictionnaire : la définition d'un élément renvoie à d'autres éléments du système. Les symboles jouent ainsi un rôle fondamental dans le sens où ils permettent d'échapper à un lien direct avec l'environnement. Cette libération et l'internalisation d'un système symbolique ouvre la voie à un monde d'abstractions, de représentations complexes et de raisonnements beaucoup plus riches que ceux du monde non-symbolique :

“But certain things cannot be represented without symbols. Indexical communication can only refer to something else by virtue of a concrete part-whole link with it, even if this has no more basis than just habitual coincidence. Although there is a vast universe of objects and relationships susceptible to nonsymbolic representation indeed, anything that can be present to senses, this does not include abstract or otherwise intangible objects of reference.” (ibid, p. 397)

La symbolisation ouvre aussi la porte à un nouveau type d'interactions entre individus, car elle rend possible le conventionnalisme des échanges déjà présent dans les débats des philosophes grecs, en particulier au niveau des rapports sociaux (ibid, p. 399-401).

Si l'on suit la classification donnée plus haut, il est ainsi possible de postuler une évolution du système de communication humain qui passe de modes primitifs articulés sur des icônes ou des index, à des modes plus complexes et symboliques. A partir de quand peut-on parler de langage, et quand les différents stades auraient-ils alors pu émerger ?

Notons ici que s'il a couramment été admis que le lien entre sens et formes phonétiques est totalement arbitraire (il s'agit de l'arbitrarité du signe de Saussure), certains auteurs modèrent néanmoins ce propos et décrivent plusieurs types de relations entre les sens et les formes des mots des langues contemporaines. Le phono-symbolisme, comme son nom l'indique, étudie les possibilités que des sons (phonèmes, “patterns” d'intonations...) puissent posséder un sens qui s'exprime dans les mots qu'ils composent, et une typologie de ces relations peut-être mise en évidence [Hinton et al., 1994]. L'exemple le plus célèbre est le *Frequency Code* de Ohala, qui repose sur les deux propositions suivantes : les tons hauts, les voyelles avec un second formant (F_2) important (comme [i]) et les consonnes de fréquences élevées sont associés entre autres à des sons de hautes fréquences, à des mouvements rapides ou encore à des éléments de petite taille ou aux formes anguleuses (“sharpness”) ; à l'inverse, les tons bas, les voyelles de F_2 peu élevé (comme [u]) et les consonnes de basses fréquences sont associés à des sons de basses fréquences, des éléments de grande taille ou aux formes arrondies (“softness”), ou encore des mouvements lents d'éléments lourds [Hinton et al., 1994] (p. 10). La figure 1.3 présente un triangle vocalique, celui de l'anglais, qui permet de localiser les voyelles précédentes.

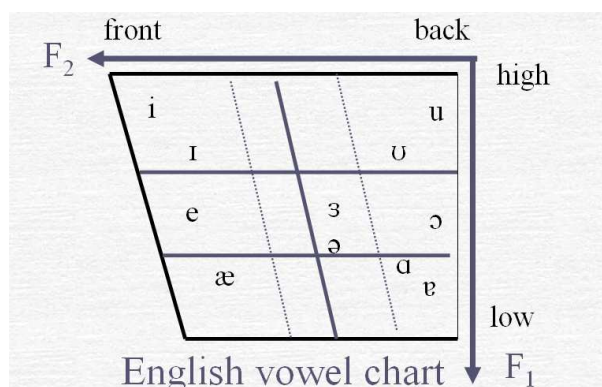


FIG. 1.3 – Triangle vocalique de l'anglais

Certains auteurs vont plus loin et postulent que des similarités géométriques nombreuses existent entre les formes d'objets du monde réel et les configurations du tractus vocal pour produire les sons des mots qui désignent ces objets [Bohas, 2002].

L'ensemble des propositions des derniers paragraphes peut servir de base pour différents critères de définition du langage. Il semble raisonnable et plus pertinent de raisonner sur les raisons et les dates de l'émergence de différentes caractéristiques des systèmes de communication plutôt que sur le langage humain dans son ensemble. Nous tenterons de nous souvenir de ce principe dans les chapitres ultérieurs (en particulier aux chapitres 4 et 5, où nous insisterons sur certaines capacités cognitives impliquées dans l'activité linguistique, et sur les *stratégies linguistiques* des individus).

1.2.2 Langage et système cognitif général

Si les caractéristiques intrinsèques du langage humain sont difficiles à établir, ses relations avec la conscience et le système cognitif général sont encore plus difficiles à dénouer. Nous avons déjà présenté la position de Chomsky, qui postule un module spécifique au traitement syntaxique, et la position inverse qui inscrit au contraire l'ensemble des processus langagiers dans un cadre cognitif plus général. Il est cependant possible de dépasser ces deux hypothèses, et d'aller jusqu'à envisager une cognition humaine construite sur le langage, et basée sur une partie de ses caractéristiques intrinsèques.

L'hypothèse Sapir-Whorf représente une vision particulière de ce dernier point, et pose la question de l'impact des formes linguistiques sur nos représentations mentales. La logique naturelle postule que les pensées exprimées par le langage existent de façon indépendante de celui-ci et que les lois de la logique et de la raison sont universelles et existent en dehors du langage. A l'encontre de ces propositions, le relativisme linguistique postule que le langage vient former nos idées, nos pensées et notre expérience du monde, et qu'il est également à l'origine des lois de la logique et de la raison. Une des conclusions est que des langues différentes conduiront à des représentations du monde différentes.

Différentes études ont tenté d'affirmer ou d'infirmer l'hypothèse Sapir-Whorf. Parmi celles-ci,

les travaux sur les lexiques de couleurs ont eu un grand retentissement. Les travaux des années 1950 allaient dans le sens de l'hypothèse Sapir-Whorf, sur la base d'une corrélation entre une variable linguistique (basée sur les termes de couleur dans une langue, et donc sur la facilité à nommer des couleurs) et une variable extra-linguistique de capacité à mémoriser les couleurs. La mise en évidence de cet effet en anglais, et dans quelques autres langues, sur la base d'une variabilité linguistique assumée *a priori*, impliquait que la cognition générale soit influencée par la catégorisation linguistique des couleurs. Les travaux de Eleanor Rosch dans les années 1970 ont cependant remis ce postulat en cause, en montrant que les deux variables linguistique et non-linguistique étaient toutes deux déterminées par un principe universel de saillance perceptive, qui rendait ainsi compte de la corrélation observée [Kay, 1999]. Les travaux de Berlin et Kay dans les années 1970, par comparaison des lexiques de couleur dans une vingtaine de langues, ont également mis en évidence l'existence d'universaux dans la sémantique des couleurs, et celle d'une échelle évolutive pour l'émergence des termes de couleurs (blanc et noir, puis rouge, puis vert et jaune, puis bleu. . .) [ibid], allant encore une fois à l'encontre d'un relativisme linguistique radical.

Une autre proposition a été avancée par Jerry Fodor dans les années 1970. En introduisant le *mentaleis* ou "*Language of Thought*", Fodor postule que les bases du raisonnement reposent sur un langage de l'esprit, permettant la manipulation de concepts et d'idées. Ce langage possède une sémantique et une syntaxe de combinaison, et c'est l'application de cette dernière qui représente l'activité de pensée, à travers une succession d'opérations syntaxiques sur des représentations mentales [Aydede, 1999]. Il est possible de se poser la question du lien entre ce langage de l'esprit et les langues du monde.

D'une façon générale, l'évolution des lignées humaines au cours des derniers millions d'années a vu un formidable développement de l'intelligence, et l'émergence de la faculté de langage. La question est donc de savoir si le développement de nos capacités cognitives s'est entrelacé avec celui du langage : ce dernier a-t-il contribué non seulement à un niveau social mais également à un niveau cognitif au développement de l'intelligence humaine ? Ou au contraire la relation cognition-langage fut-elle unilatérale ?

1.2.3 L'absence de fossiles linguistiques

Le langage, en tant que processus cognitif, ne laisse pas de traces directes de son utilisation ou, pour reprendre l'expression consacrée, ne "fossilise" pas. Ceci est vrai jusqu'à l'invention des systèmes d'écriture il y a environ 5 000 ans, événement extrêmement récent dans l'histoire de notre espèce. Ceci explique bien sûr la difficulté de la recherche des origines du langage. Une seconde conséquence est que toute recherche sera nécessairement indirecte. Les stratégies de recherche peuvent se classer principalement dans l'un des trois cadres suivants :

- établir des résultats suggérant que le langage est possible à partir d'une certaine époque de l'évolution humaine, mais non auparavant ;
- comparer des structures modernes (linguistiques, physiologiques. . .) et des structures plus anciennes, et proposer un scénario permettant le passage des unes aux autres le plus pertinent possible au niveau des théories évolutionnistes, de la physiologie. . . ;
- mettre en évidence des manifestations cognitives ou culturelles de nos ancêtres qui doivent raisonnablement nécessiter l'existence d'un système de communication plus ou moins sophistiqué.

Ces approches par dérivation ou inférence introduisent une perspective particulière pour l'étude du langage. Les données physiologiques et cognitivo-comportementales ne permettent pas de dater précisément l'origine du langage, et d'une façon générale, il est très difficile d'apporter des éléments indiscutables qui permettent de répondre de façon définitive aux principales questions. La progression des théories, en particulier de celles admises par le plus grand nombre, est donc une politique des petits pas, où les arguments viennent renforcer le déséquilibre d'une situation sans jamais l'emporter tout à fait. Favoriser la parcimonie (terme que nous emploierons plusieurs fois lorsque nous formulerons certaines de nos hypothèses) pour des propositions sur l'origine du langage ou des langues nous semble le plus pertinent dans un domaine où il est très difficile d'apporter des preuves irréfutables (en supposant bien sûr qu'il puisse en exister d'une façon générale).

1.2.4 Variabilités et dimensions d'étude

Un autre aspect linguistique, dans la continuité de la distinction entre langues et faculté de langage, concerne la très grande variabilité des structures typologiques observées dans les quelques 6 000 langues du monde, ainsi que la variété pour chaque communauté linguistique des locuteurs entre eux. Il est difficile d'imaginer comment une faculté de langage unique peut s'incarner dans un si grand nombre de systèmes linguistiques, et cette question constitue la pierre d'achoppement des théories fonctionnalistes et Chomskienne. L'existence d'universaux peut quant à elle laisser en suspens la raison de leur origine : convergences fonctionnelles, héritage de langues ancestrales ou existence d'une faculté innée qui encode ces universaux de façon plus ou moins arbitraire ?

La variabilité précédente se distribue à la fois spatialement et dans le temps, et l'étude des langues et de leur évolution s'inscrit dans un triple contexte évolutif, temporel et socio-géographique. Sur chacune de ces dimensions se pose soit le problème de l'absence de données concrètes, soit des problèmes d'accès aux données qui rendent difficile l'étude de l'évolution des langues ou du langage : difficulté d'englober la diversité typologique des langues et parfois construction de théories sur un ensemble restreint de données linguistiques, difficulté de caractériser le langage d'une communauté à partir de celui de quelques individus, problèmes des continuums dialectaux et de la définition d'une langue au niveau spatial et temporel, ...

Les quelques caractéristiques que nous venons d'évoquer participent à la complexité de l'étude de l'origine du langage et des langues. Cette difficulté requiert ainsi la plus grande diversité de données pour tenter de dégager des propositions qui puissent être validées par différentes approches. Comme la cognition dans son ensemble est l'objet des sciences cognitives, le langage devient un objet scientifique fédérateur, et les disciplines qui s'attellent à la tâche peuvent espérer en retirer des bénéfices propres. Le champ de recherche n'est plus tant défini par un paradigme d'étude (comme les mathématiques ou la physique) que par un objet d'étude qui transcende les paradigmes et les frontières disciplinaires.

1.3 Approche pluridisciplinaire de la question de l'origine du langage et des langues

Les recherches actuelles sur l'origine des langues et du langage se trouvent à la croisée de nombreuses disciplines, couvrant une partie du spectre des sciences "dures" et des sciences hu-

maines (ou plutôt des sciences de la matière et de la nature d'une part, et des sciences humaines et sociales d'autre part). Il est illusoire de penser pouvoir présenter l'ensemble des recherches effectuées, mais il est cependant intéressant de présenter les principaux courants, dont les concepts et résultats pourront nous être utiles par la suite.

1.3.1 Ethologie et systèmes de communication animaux

The Berlin wall is down, and so is the wall that separates man from chimpanzee.
Elizabeth Bates.

L'éthologie, qui s'intéresse aux comportements animaux dans leur ensemble, se centre ici sur les systèmes de communication des différentes espèces, dans le cadre plus général de leurs interactions sociales [Hauser, 1996]. Cet intérêt s'étend également à la comparaison entre ces systèmes et le langage humain, et tente ainsi de replacer ce dernier et ses spécificités dans une phylogénie des systèmes de communication.

Si les grands singes ont été le choix privilégié des expériences d'apprentissage du langage que nous allons décrire, soulignons ici que d'autres animaux comme les dauphins *Tursiops Truncatus* ou les phoques à crinières montrent des capacités de compréhension proches de celles des premiers [Rondal, 2000].

Les premières réflexions et expériences sur l'enseignement du langage aux grands singes

Un domaine majeur regroupe les tentatives d'apprendre un langage aux grands singes¹³.

La première personne à attribuer la capacité de parler aux singes est peut-être l'Anglais Samuel Pepys (1633 - 1703), qui écrit en 1661 dans son journal personnel à propos de ce qu'il appelle un babouin (baboon) :

"I do believe it already understands much english; and I am of the mind it might be taught to speak or make signs." [Wallman, 1992] (p. 11)

Cette idée est reprise moins d'un siècle plus tard par le français Julien Jean Offray de La Mettrie (1709 - 1751) qui, dans son ouvrage *L'Homme machine*, s'oppose vigoureusement aux positions de Descartes et déclare :

"Mais ce vice est-il tellement de conformation, qu'on n'y puisse apporter aucun remède ? En un mot seroit-il absolument impossible d'apprendre une Langue à cet Animal ? Je ne le croi pas.

Je prendrois le grand Singe préférablement à tout autre, jusqu'à ce que le hazard nous eût fait découvrir quelqu'autre espèce plus semblable à la nôtre, car rien ne répugne qu'il y en ait dans des Régions qui nous sont inconnües. Cet Animal nous ressemble si fort, que les Naturalistes l'ont apellé Homme Sauvage, ou Homme des bois. Je le prendrois aux mêmes conditions des Ecoliers d'Amman; c'est-à-dire, que je voudrois qu'il ne fût ni trop jeune, ni trop vieux; car ceux qu'on nous apporte en Europe, sont communément trop âgés. Je choisirois celui qui auroit

¹³en plus de l'homme lui-même, chimpanzés (dont les bonobos *Pan Panicus*), gorilles et orangs-outans.

la physionomie la plus spirituelle, et qui tiendrait le mieux dans mille petites opérations, ce qu'elle m'aurait promis. Enfin, ne me trouvant pas digne d'être son Gouverneur, je le mettrois à l'École de l'excellent Maître que je viens de nommer, ou d'un autre aussi habile, s'il en est." [La Mettrie, 1748].

Si La Mettrie suggère une réelle expérience d'apprentissage du langage à un grand singe, la première tentative de ce genre ne prendra place qu'au début du XX^{ème} siècle : Robert Yerkes, célèbre primatologue, tente en 1920 d'enseigner la langue anglaise à des chimpanzés, mais n'y parvient pas. Il émet cependant l'idée qu'une langue des signes serait peut-être un choix plus judicieux pour l'apprentissage. Cette idée ne sera pas appliquée avant les années 1960, et d'autres expériences précèdent cette date, comme celle des époux Keith et Cathy Hayes dans les années 1940 qui parviennent à apprendre à prononcer quatre mots à leur chimpanzé Viki. Il est à noter que le singe fait partie intégrante de leur famille, et évolue donc dans le même environnement social qu'un jeune enfant. Si sa production de sons demeure très limitée, Viki comprend cependant un certain nombre de phrases et peut "communiquer" par l'intermédiaire de gestes simples. Une tentative très similaire est celle des époux Kellog et de leur chimpanzé femelle Gua dans les années 1930, avec les mêmes résultats.

Sarah, Washoe, Koko, Kanzi et les autres

Aux tournants des années 1960, il paraît clair que les grands singes ne peuvent apprendre à parler comme des êtres humains. Les principales raisons invoquées concernent leur manque d'intelligence (comme le pensait déjà Darwin), une incapacité à imiter les sons perçus ou leur anatomie, avec en particulier une différence au niveau des cordes vocales et du larynx. Les nouvelles expériences, plus rigoureuses sur le plan scientifique, vont donc se tourner vers d'autres moyens de communication.

Sans décrire exhaustivement toutes les recherches, nous pouvons souligner les points principaux, qui peuvent pour la plupart être mis en regard des différentes théories de l'émergence du langage (contexte social, importance du geste, différences entre signes et symboles, ...). La table 1.3 récapitule les recherches menées depuis les années 1960 ; il est accompagné d'une rapide présentation des principaux paradigmes de ces recherches.

Choix du mode de communication.

- langage des signes (le plus souvent ASL : *American Sign Language*), qui met à profit selon Premack les capacités manuelles des chimpanzés et les similarités de leurs mains avec les nôtres [Gardner and Gardner, 1969] ; accompagné éventuellement de *molding* ;
- "*molding*" (façonnage) : une technique mise au point par Roger Fouts qui consiste à corriger les positions manuelles et digitales de l'animal et qui facilite son apprentissage de la langue des signes ; critiquée par Premack qui pense qu'elle désynchronise la production et l'action, et de façon similaire par Savage-Rumbaugh, qui y voit une interférence avec la communication ;
- langage artificiel à base de lexigrammes : figures en plastique aux formes arbitraires placées sur un tableau magnétique. Evite le biais de la mémorisation sur la compréhension et la production. Permet l'étude du caractère non-iconique d'un système de communication. Le singe apprend à associer référents et référés.

Investigateurs	Nom de l'animal	Espèce	Débuté en	Vecteur de communication	Paradigme	Buts poursuivis
A. & B. Gardner	Washoe	chimpanzé	1971	American Sign Language, modelling	contrôle	Apprentissage de l'ASL
D. & A.J. Premack	Sarah	chimpanzé	1971	lexigrammes en plastique et tableau	convivialité	Etablir les caractéristiques spécifiques du langage humain
F. Patterson	Koko	gorille	années 1970	ASL	convivialité	Exploration des capacités intellectuelles du gorille, en particulier créatives et prévaricatrices
L. Miles (étudiante de Roger Fouts)	Chantek	orang-outan	fin 1970	ASL	acculturation	Etude des capacités linguistiques et de l'intelligence des orangs-outans. Accès à la symbolisation
D. Rumbaugh et al	Lana	chimpanzé	1973	lexigrammes et ordinateur (Yerkish)	contrôle	Lana Project : recherche des fondements du langage dans une intelligence plus générale (codage symbolique, classement d'objets, ...)
H. Terrace	Nim Chimpsky	chimpanzé	1979	ASL	convivialité	Apprentissage de la syntaxe
R. Fouts et al	Washoe, Bruno, Booe, Ally	chimpanzé	1973	ASL	convivialité	Etude de l'acquisition spontanée intra-spécifique
R. Fouts et al	Loulis (bébé adopté par Washoe)	chimpanzé	1979	ASL	convivialité	Etude de l'interaction et de l'environnement familial pour la transmission du langage
S. Savage-Rumbaugh and D. Rumbaugh	Sherman et Austin	chimpanzé	1978	lexigrammes et ordinateur	convivialité	Animal Model Project : développement de techniques d'entraînement linguistique pour enfants handicapés mentaux ; définition du langage
S. Savage-Rumbaugh et al	Kanzi	bonobo	1980	lexigrammes et ordinateur	approche naturaliste	Kanzi Project : comparaison entre développement du singe et de l'enfant ; Compréhension du langage

TAB. 1.3 – Tableau des recherches sur l'apprentissage du langage aux grands singes

- utilisation de lexigrammes via un ordinateur. L'usage de ce dernier permet d'éliminer les informations implicites et inconscientes fournies par l'instructeur, et de recueillir un grand nombre d'informations.

Usage de la langue orale. Le singe peut être ou non exposé à la langue orale (l'anglais dans toutes les études). Cette possibilité est discutée. Elle accroît la quantité d'information qui parvient à l'animal et permet de tester sa compréhension : le singe Kanzi de Savage-Rumbaugh distingue ainsi des phrases du type : "Put your ball in the cereal." ou "Get the ball that's in the cereal." [Savage-Rumbaugh et al., 1998] (p. 72). Les Gardner n'y ont par exemple pas eu recours, pensant qu'elle pourrait détourner l'attention de Washoe des signes manuels.

Paradigme de contrôle ou paradigme de convivialité. Dominique Lestel évoque deux comportements vis à vis de l'animal : le paradigme de contrôle caractérise les chercheurs qui insistent sur un contexte rigoureux et manipulable, et un certain contrôle de l'animal. Ils s'inspirent de la psychologie expérimentale et utilisent souvent des langages artificiels. A l'opposé, le paradigme de convivialité préconise une attitude plus souple et un environnement naturel et convivial pour un meilleur apprentissage. Il est plutôt associé à l'ASL [Lestel, 1995].

Approche naturaliste et technique d'acculturation. Dans le prolongement du paradigme de convivialité précédent, l'approche naturaliste (comme celle de Sue Savage-Rumbaugh) préconise de placer l'animal dans un environnement équivalent à celui du jeune enfant : contexte très riche, large vocabulaire, y compris avec utilisation de la langue orale. On recourt soit à des renforcements des attitudes correctes des animaux (comme c'est le cas avec Sherman et Austin), soit à une technique d'imprégnation : le singe est juste exposé au langage, comme c'est le cas

des enfants humains, méthode appliquée à Kanzi et sa compagne Mulika (qui sont comparés aux singes précédents).

En tant qu'anthropologue et dans la même optique, Lyn Miles adopte une démarche différente de celles des psychologues, en refusant les séances d'entraînement à l'ASL. Elle leur préfère un processus d'acculturation : Chantek est immergé dans un environnement culturel humain et les signes de l'ASL lui sont enseignés aux travers de ses activités, par communication "naturelle". Chantek ne connaît aucune pression d'apprentissage, mais il est constamment incité à s'intéresser à son environnement et à communiquer.

Importance et spécificité de l'animal. Une particularité importante des expériences que nous présentons est qu'elles concernent l'étude d'un petit nombre de sujets sur de longues périodes. Dès lors, la spécificité de chaque individu entre en jeu de façon prononcée. Bien que les trois espèces de primates supérieurs aient été étudiées quant à l'apprentissage du langage, les comparaisons sont rares pour savoir si certaines espèces seraient plus disposées que d'autres pour l'acquisition du langage.

L'expérience en 1992 de Sue Savage-Rumbaugh, qui compare un chimpanzé commun (*Pan troglodyte*), Panpanzee, à un chimpanzé bonobo (*Pan paniscus*), Panbanisha, est intéressante à ce propos. Les deux singes, exposés tous deux à l'anglais oral et à des lexigrammes, et vivant dans le même environnement, évoluent différemment : Panbanisha révèle de bien meilleures capacités cognitives et d'analyse grammaticale de la parole humaine. Le caractère hautement social des bonobos peut être une source d'explication de ces meilleures performances.

La personnalité du primate, ainsi que ses capacités "intellectuelles" entrent en jeu. Ces deux facteurs sont souvent trop liés pour qu'on puisse mesurer indépendamment leurs effets, mais leur combinaison est influente, comme le montre l'expérience de Roger Fouts [Fouts, 1973]. Dans cette étude, quatre chimpanzés testés sur l'apprentissage de dix signes de l'ASL acquièrent ces signes en moyenne en 54, 79, 136 ou 159 minutes, le critère d'acquisition d'un signe étant cinq présentations spontanées par l'animal. Les performances de Booe, le plus doué des primates, peuvent s'expliquer par sa plus grande intelligence aussi bien que par son inextinguible envie de raisin, et les faibles résultats de Thelma par sa grande distractibilité.

Plus informellement, Kanzi passe pour un élève très joueur, alors que le caractère irascible de Sarah a pu compliquer son apprentissage. Francine Patterson prétend même que Koko possède un grand sens de l'humour.

Il est intéressant de souligner le grand intérêt suscité par les premiers travaux des Gardner et des Premack dans les années 1970. La discipline connut cependant un coup d'arrêt avec la publication en 1979 d'un article de Herbert Terrace mettant sérieusement en doute les capacités des singes à acquérir le langage, en particulier au niveau syntaxique [Terrace et al., 1979]. L'analyse d'un grand nombre de productions du chimpanzé Nim Chimpsky met en valeur la pauvreté compositionnelle des productions, avec très majoritairement des compositions de 2, 3 ou 4 mots, comportant le plus souvent des répétitions d'un même mot (exemple p. 894). Terrace reconnaît que les combinaisons à 2 éléments semblent indiquer un respect de l'ordre des signes par Nim, mais pense qu'il ne faut pas utiliser le terme de phrase avec sa signification syntaxique pour ces combinaisons ; il n'est en effet pas possible de savoir si l'ordre observé correspond à un ordre lexical ou à une réelle compréhension et à un ordonnancement des catégories sémantiques

des mots. D'une façon générale, il n'existe pas de preuves selon lui pour conclure que les singes peuvent assembler des symboles pour créer de nouveaux sens (p. 900).

Suite aux travaux de Terrace, et malgré les réponses parfois passionnées des chercheurs incriminés, les travaux avec les grands singes vont connaître une certaine désaffection. L'intérêt scientifique et médiatique ressurgira cependant dans les années 1990, avec les exploits du célèbre Kanzi.

Les expériences d'apprentissage du langage aux grands singes constituent un champ d'étude fascinant, puisque tout comme pour les créoles ou l'émergence de la langue des signes au Nicaragua décrits plus haut, elles permettent d'assister à l'émergence de capacités "linguistiques"¹⁴. Nous souhaitons souligner l'importance des travaux de Roger Fouts, qui démontrent comment une fois installé, un langage simple peut persister dans une communauté de chimpanzés et être transmis de génération en génération (phénomène de **bootstrap**) :

"once introduced, sign language is robust and self-supporting, unlike the systems that depend on special apparatuses such as the Rumbaugh keyboards or the Premack plastic tokens." [Gardner and Gardner, 1989] (p. 25)

Ces travaux posent la question suivante : si un langage rudimentaire à base de signes peut être utilisé et subsister dans une communautés de chimpanzés, pourquoi ce phénomène ne s'est-il pas produit dans la nature ? Nous reviendrons sur cette question par la suite.

Il semble acquis aujourd'hui que les grands singes ne peuvent maîtriser qu'un langage rudimentaire (bien que leur compréhension semble meilleure que leur production). Les recherches semblent cependant indiquer qu'ils ont ou peuvent acquérir des capacités fondamentales pour cette activité : capacités d'ordonnancement sériel et mémoire à court terme déjà performante [Terrace, 2000], acquisition de signes et de symboles (y compris pour des classes de concepts) [Premack, 1971], maîtrise de relation abstraite entre symboles (comme le caractère identique ou différent), compréhension méta-linguistique (avec un jugement sur la relation référé-référent) [ibid] (p. 810-814), capacité d'attribution d'intentions à autrui [Premack and Woodruff, 1978] ... Un point important mis en évidence est le caractère ego-centré des productions, que l'homme dépasse très facilement lors de ses interactions. Quoi qu'il en soit, les grands singes, en captivité comme en liberté, exhibent une grande richesse d'interactions avec leurs congénères, avec des stratégies d'alliance et d'opposition complexes et toujours en évolution. Les observations de Frans de Waal, qui suit la vie et les relations quotidiennes d'une communauté de chimpanzés au Arnhem Zoo, renforcent l'idée que de nombreux comportements sociaux complexes (coalitions, ruses, disputes, réconciliations, ...) sont déjà à l'oeuvre chez nos proches cousins :

"Among chimpanzees, power politics are not merely "bad" or "dirty". They give to the life of the Arnhem community its logical coherence and even a democratic structure." [De Waal, 1998], p. 208)

L'épouillage en particulier joue un rôle majeur dans la préservation de la hiérarchie sociale : les fourrures des animaux ne nécessitent pas toute l'attention que les primates y accordent, et les participants occupent souvent des rangs sociaux bien définis (différents selon les contextes). Dun-

¹⁴Les simulations informatiques constitueront une troisième voie d'approche de ces phénomènes émergents.

bar a proposé une origine sociale du langage dans le prolongement de l'épouillage des primates. En mettant en évidence une corrélation entre taille du néo-cortex et taille des groupes d'animaux [Dunbar, 1993], Dunbar émet l'hypothèse qu'avec l'augmentation de la taille des groupes dans l'espèce humaine, l'épouillage est devenu insuffisant pour le maintien des liens sociaux (car il prend trop de temps). Le langage serait venu combler cette lacune en permettant un tissage plus riche et efficace des relations sociales [Dunbar, 1996].

1.3.2 Génétique

La génétique rencontre les thématiques de l'origine du langage et des langues en plusieurs points.

Bases génétiques de la faculté de langage

Elle s'intéresse tout d'abord à la question de l'origine de la faculté de langage dans la phylogénie humaine. Elle offre pour ceci en particulier de comparer les génomes des grands singes et de l'homme pour une évaluation de la distance génétique et évolutive. Ces estimations permettent ensuite d'aller dans le sens ou non de certaines hypothèses faisant intervenir les génotypes et phénotypes, comme celle de la macro-mutation ayant conduit à l'apparition du *Language Acquisition Device* (le patrimoine du chimpanzé est ainsi à 99% identique à celui de l'homme).

La récente *neuro-génétique* (*neurogenetics*) s'intéresse à l'expression des gènes au niveau cérébral, et pourrait donc démontrer dans un futur proche comment un petit nombre de gènes peut induire de profonds changements dans l'organisation cérébrale. Plus généralement, elle peut aborder des questions comme la spécialisation hémisphérique et la prédominance de l'hémisphère gauche pour le traitement langagier, le développement des aires profondes et du néo-cortex en phylogénèse comme en ontogénèse et leur lien avec l'évolution des capacités cognitives... Cette révolution est déjà en marche et les tentatives se multiplient, comme en témoigne les récentes études portant sur la découverte de "gènes du langage" liés spécifiquement à un désordre langagier (gène *fork'head*) [Lai et al., 2001] et la présence ou l'absence d'une partie de ces "gènes du langage" chez l'homme et les autres grands singes (variation de deux molécules sur 715 du gène *FOXP2* par rapport aux grands singes, qui serait à l'origine de la capacité langagière chez l'homme, bien que les fonctions de ce gène présent chez tous les mammifères soient encore inconnues) [Enard et al., 2002].

La recherche de "gènes du langage" n'est pas si récente, et une telle découverte validerait bien sûr les idées de Noam Chomsky. Les différentes études sont néanmoins loin d'avoir fait l'unanimité, et la question reste posée. Pour certains, la recherche de tels gènes est une absurdité, ou tout au moins très suspicieuse : les gènes identifiés peuvent ainsi servir de régulateur à d'autres gènes. En outre, si l'absence d'expression d'un gène détruit une région cérébrale entière, plusieurs fonctions cognitives qui s'appuyaient sur cette région sont handicapées. Certaines peuvent alors, par plasticité et réorganisation fonctionnelle, compenser en s'appuyant sur d'autres aires cérébrales, d'autres non. Plus spécifiquement, le gène "*fork'head*" mis en évidence dans l'étude de Lai et al. est présent chez toutes les espèces de mammifères à mâchoire, et joue un rôle important dans le développement cérébral de ces espèces. Son rôle pour le langage est donc à supposer avec précaution. [Philippe Vernier, audition des projets OHLL (CNRS), 7-8 Septembre 2002].

Relations entre gènes et langues

La génétique tisse en outre une relation très riche avec la linguistique par l'analyse des correspondances entre langues et gènes dans les populations humaines. Initiée par les travaux de

Cavalli-Sforza, qui mit en relation ses données génétiques des populations humaines avec les familles linguistiques de Ruhlen et Greenberg [Cavalli-Sforza et al., 1994], elle a démontré une bonne correspondance entre distributions génétiques et linguistiques, ce qui est *a priori* étonnant puisque les caractéristiques des langues ne sont pas encodées génétiquement. Ce phénomène peut s'expliquer par les barrières géniques créées par les langues (on choisit le plus souvent un partenaire parlant la même langue que soi), mais aussi par la structure des populations anciennes, beaucoup moins denses et composées de petits groupes de quelques dizaines d'individus (voir chapitre 4) : les diffusions tant génétiques que linguistiques étaient alors plus limitées.

Dans le cadre précédent, la génétique permet aussi d'étudier de plus en plus finement les grandes migrations humaines qui se sont déroulées au cours des dernières dizaines de milliers d'années, ainsi que les événements de spéciation qui ont conduit à notre espèce.

Le premier modèle postule une évolution d'*Homo erectus* vers *Homo sapiens* en un lieu unique, suivie d'une expansion de ces *Homo sapiens* et d'un remplacement des populations plus primitives (Néandertal en Europe, Homme de Ngandong en Indonésie...) par ces formes modernes. Depuis une quinzaine d'années, la théorie *Out of Africa*¹⁵ propose que l'Afrique de l'est soit ce foyer d'émergence, il y a environ 100,000 à 200,000 ans. Cette théorie repose sur l'apparente séparation génétique entre Sapiens et Néandertal en Europe (pas de traces de croisement), et sur un socle de données génétiques établissant les relations entre les populations humaines modernes. Les premières études sur l'ADN mitochondrial ont indiqué que l'Afrique est la source génétique des populations actuelles, avec de plus une plus grande diversité du groupe africain par rapport aux autres grands groupes de populations (européens, nord et sud-asiatiques...). Ceci témoignerait d'une plus grande ancienneté, ayant conduit à une plus grande diversification génétique. Cann & al. ont avancé l'intervalle de [290,000 BP ; 140,000 BP] pour l'apparition des *Homo sapiens*, et l'intervalle de [25,000 BP ; 62,000 BP] pour la séparation entre les deux branches principales de l'arbre génétique des hommes modernes (une branche mène uniquement à de l'ADN mitochondrial de populations africaines, tandis que la seconde mène à des populations africaines et non-africaines [Cann et al., 1987]. A la suite de cette étude pionnière, de nombreuses autres recherches sur l'ADN mitochondrial mais aussi sur d'autres marqueurs génétiques (AND nucléaire autosomal, ADN du chromosome Y, micro-satellites...) ont confirmé la plus grande diversité génétique du continent africain, et la séparation entre certaines populations africaines et le reste de la population terrestre. Bien que des scénarios alternatifs, comme une population initiale plus importante en Afrique, puissent rendre compte de la plus grande diversité génétique sur ce continent, le fait que les lignées non-Africaines trouvent leurs racines en Afrique supporte fortement le scénario *Out of Africa*.

Le second modèle, dit de **continuité régionale**, postule une évolution par sauts évolutifs *locaux* des populations d'*Homo erectus* vers les *Homo sapiens*. Des évolutions locales devraient normalement conduire à des espèces différentes, mais des flux géniques entre les différentes populations humaines aurait permis la préservation d'une seule espèce. Développé principalement par Wolpoff, Templeton et Thorne [Thorne and Wolpoff, 1992], ce scénario s'appuie principalement sur des évidences archéologiques, à savoir des ossements crâniens empruntant des caractères à la fois aux *Homo erectus* et aux *Homo sapiens*, que ce soit en Chine, en Europe ou en Australie. Il s'appuie aussi sur des études génétiques : le modèle s'appuyant lui aussi sur une origine africaine d'*Homo sapiens* mais il y a deux près de deux millions d'années, la seconde base du modèle *Out*

¹⁵... ou plutôt *Out of Africa 2* si l'on pense à la première sortie d'*Homo ergaster* il y a près de 2 millions d'années.

of Africa, c'est à dire la plus grande diversité des populations africaines, est expliquée par une plus grande taille de population. L'examen de plusieurs types de marqueurs différents ont également conduit certains généticiens à remettre en doute un bottleneck génétique et une spéciation récente en Afrique (voir chapitre 4).

Malgré cette opposition toujours vive, l'hypothèse *Out of Africa* est venue corroborer la majeure partie des données archéologiques. Parallèlement aux grandes migrations hors d'Afrique (on distingue aujourd'hui une première vague de migration vers l'Asie, suivie d'une migration vers le Proche-Orient puis l'Europe, avant d'autres vagues plus récentes), les chercheurs tentent de mettre en valeur des expansions plus localisées et plus récentes, qu'ils sont à même de comparer à la répartition des familles linguistiques actuelles. L'expansion des populations bantoues en Afrique vers 5000 BP à partir du sud-est du Niger ou du nord-ouest du Cameroun est un exemple de telles recherches, où se mêlent des questions sur les routes de migrations, sur les facteurs environnementaux ou socio-économiques, sur les zones de convergences de langues. . . [Van der Veen and Hombert, 2001] Toutefois, certains n'hésitent pas à remonter plus loin dans le temps, et il est tentant comme le fait Merritt Ruhlen de relier les macro-familles linguistiques aux premières grandes migrations. Il est ici intéressant de souligner que l'apport de l'anthropologie et de la génétique à la linguistique est sûrement plus pertinent que l'apport réciproque. L'étude de l'ADN mitochondrial (ADN des mitochondries, héritées quasi exclusivement par descendance maternelle (moins de 1 chance pour mille de contribution paternelle), évolution de 5 à 10 fois plus rapide que l'ADN nucléaire [Stoneking and Wilson, 1989]) et de l'ADN du chromosome Y (héritage exclusivement paternel) permettent par leurs caractéristiques particulières (plus grand rythme de mutation et/ou filiation paternelle ou maternelle) de confirmer les données obtenues avec l'ADN autosomal ou d'autres marqueurs (rhésus, GM, HLA, micro-satellites, . . .), et aussi de différencier les migrations des hommes de celles des femmes [Underhill et al., 2000] [Cann et al., 1987] [Pennisi, 2001]. Ceci ouvre d'intéressantes perspectives pour des régions où les schémas de mariages et de lignées (parfois sur de grandes distances) permettent des échanges linguistiques complexes. On pensera ici par exemple aux schémas d'exogamie linguistique des populations aborigènes australiennes [Evans, 1999].

La Nouvelle Synthèse est le nom parfois donné à la théorie qui s'articule sur l'émergence de l'homme moderne en Afrique de l'est à l'issue d'un goulot d'étranglement génétique, puis sur sa conquête du globe au cours de laquelle se seraient diffusés à la fois ses gènes et ses langues.

Paléo-anthropologie, physiologie et archéologie

L'archéologie, par l'étude des restes humains, des sites qu'ils ont occupés, et des outils ou artefacts qu'ils ont produits, permet à la fois une approche de la phylogénie humaine et du développement des capacités cognitives humaines. Elle est en cela très proche de la paléo-anthropologie, qui étudie l'évolution ancienne des hommes et qui va s'appuyer sur les découvertes des archéologues (la paléo-anthropologie cognitive se centre elle tout particulièrement sur le développement de la cognition humaine).

Ces deux disciplines sont bien sûr concernées par l'origine du langage, comme elles le sont d'une façon générale par les éléments culturels. Le langage, avec l'art et la religion, occupe une place à part dans le développement des cultures, de par les possibilités qu'il offre dans l'enrichissement des échanges entre individus¹⁶. Le développement de la capacité symbolique est au cœur

¹⁶Le langage n'est cependant pas nécessaire à la culture, comme l'indique le terme de *culture animale*.

des débats, puisqu'elle est souvent considérée comme le précurseur indispensable des activités précédentes.

Il n'existe que peu de certitudes quant aux dates de l'émergence du langage et de la capacité symbolique à partir des données archéologiques, et les propositions sont nombreuses. Il est possible toutefois de noter une certaine évolution au cours du temps des conceptions de la majorité des chercheurs. Les paragraphes suivant présentent quelques grands courants de pensée.

Evolution humaine et émergence du langage

L'émergence du langage, quelle que soit la définition retenue, est souvent inscrite dans le développement général des ancêtres de l'homme moderne, comme résumé par les exemples suivants¹⁷ :

- redressement et apparition de la bipédie, libération consécutive de la main et transformation de la mâchoire et de la face (avec en particulier la descente du larynx) ;
- accroissement de la masse cérébrale (de quelques centaines de cm^3 à plus de 1500 cm^3) et développement du néo-cortex et en particulier du lobe frontal chez *Homo sapiens* ;
- report d'une partie de la croissance cérébrale à un stage post-natal pour permettre la parturition (rendue difficile par la transformation de la configuration des os du bassin liée au redressement) ; passage d'un mode précocial (temps de gestation long, nouveau-né généralement unique, grande taille, développement moteur et sensoriel très avancé à la naissance) à un mode altricial secondaire spécifique aux humains (longue gestation, nouveau-né généralement unique, organes des sens rapidement fonctionnels mais développement moteur très faible et absence d'autonomie [Jean-Jacques Hublin, audition des projets OHLL (CNRS), 7-8 Septembre 2002]) ;
- augmentation de la taille des groupes d'individus (corrélée au développement du néo-cortex, et donc des capacités cognitives [Dunbar, 1993]).

L'ensemble de ces transformations forme une mosaïque de phénomènes qui sont vus comme participant à l'accroissement massif des capacités cognitives et techniques (développement des techniques de taille, de chasse...), à la complexification des structures sociales, et au développement du langage, bien qu'il soit difficile de démêler les causes et les conséquences de ces changements.

Les conceptions à propos de la lignée humaine évoluent avec le temps et la découverte de nouveaux fossiles. Sans rentrer dans le détail des nombreuses espèces qui nous ont précédé, on assiste toutefois depuis quelques années à une transformation de l'arbre évolutif en "buisson" : de nombreuses espèces auraient ainsi constitué des "culs-de-sac" évolutifs, et l'incertitude plane sur les filiations entre elles. L'arbre de la figure 1.4, d'après [Conroy, 1997a], représente une proposition particulière. Les points d'interrogation traduisent bien l'incertitude actuelle quant aux liens exacts entre les différentes espèces, et les branches autres que la nôtre montrent que des espèces d'hommes ont pu exister puis disparaître, comme les célèbres hommes de Néandertal en Europe. Ce schéma d'évolution non linéaire, commun dans le cadre évolutif général des espèces,

¹⁷L'attribution du caractère d'humanité demeure également floue. Quand peut commencer à parler d'homme dans la lignée évolutive conduisant à notre espèce ? L'anthropologie, par la désignation du genre *Homo*, désigne *Homo habilis* comme la première espèce d'homme.

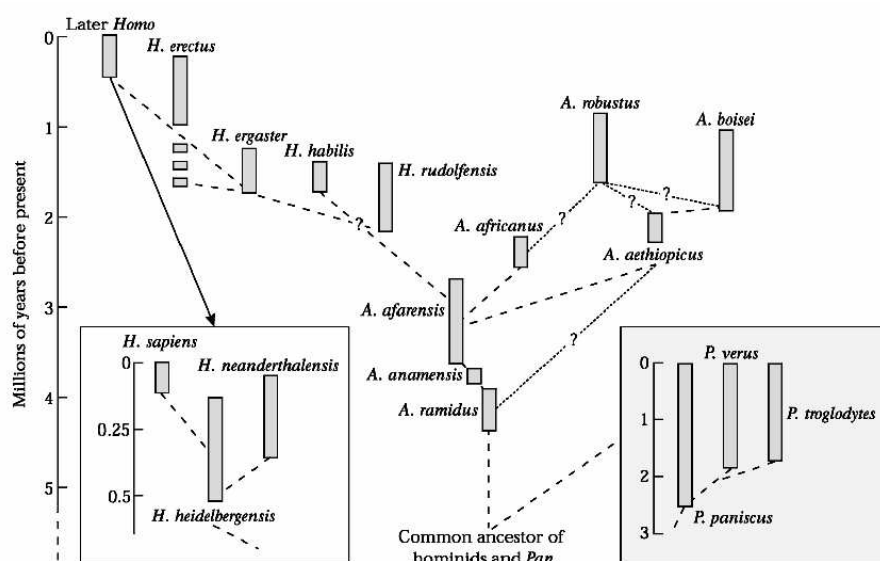


FIG. 1.4 – Une proposition de phylogénie des espèces humaines, selon Conroy [Conroy, 1997]

était quelque peu oublié pour la phylogénie humaine, où prédominait auparavant une succession directe d'espèces, menant en droite ligne des premiers Australopithèques aux *Homo sapiens*, en passant par les Australopithèques graciles, *Homo habilis* (ou *Homo ergaster*) et *Homo erectus*. Les notions d'isolation géographique, de spéciation et de transfert de gènes sont au cœur des débats.

La problématique de la phylogénie humaine peut *a priori* paraître sans lien avec le débat de l'origine du langage. Toutefois, si certaines des espèces disparues possédaient un langage sophistiqué, l'avantage évolutif souvent accordé à celui-ci est minimisé, alors que dans le cas inverse, il est encensé. L'hypothèse d'une disparition des *Homo neanderthalensis* en état d'infériorité devant des *Homo sapiens* équipés d'un meilleur système de communication va dans le sens de la seconde proposition.

Outils et langage

Une première position, développée en particulier dans les travaux de Leroi-Gourhan (1911-1986), s'articule autour de la relation entre outils et langage. Leroi-Gourhan insiste sur le lien fondamental entre outils, langage et structure sociale :

“Il y a possibilité de langage du moment où la préhistoire livre des outils, puisque outil et langage sont liés neurologiquement et puisque l'un et l'autre sont indissociables dans la structure sociale de l'humanité.” [Leroi-Gourhan, 1964] (p. 164)

Les plus anciens outils de pierre retrouvés datent de plus de 2 millions d'années, et sont attribués à *Homo habilis* sur le site de Hadar (industrie de type Oldowayen, jusqu'à 2.5 - 2.6 millions d'années pour les artefacts de Kada Gona) [Klein, 1999] (p. 158 ; 184). Le langage aurait donc pu être l'attribut de cet ancêtre lointain. Leroi-Gourhan insiste de plus sur la proximité physiologique et morphologique de celui-ci avec *Homo sapiens*, en particulier par comparaison aux

Australopithèques. La position redressée et la libération des mains jouent bien sûr un rôle essentiel pour la création et la manipulation d'outils. L'apparition de la symétrie (bifaces), à la transition entre industrie de type Oldowayen et industrie de type Acheuléenne il y a environ 1.7 millions d'années [Klein, 1999] (p. 231), est un pas tout à fait significatif, puisque le tailleur doit vraisemblablement pouvoir se représenter l'objet fini et sa caractéristique avant et en cours de réalisation. Cette possession d'un certain concept de symétrie est vue par certains comme le début de la capacité à manier des symboles.

La position de Leroi-Gourhan est aujourd'hui contestée, et de nombreux chercheurs pensent que la taille d'outils (tout au moins dans les premiers temps) ne nécessitait pas de langage développé. Rien ne permet d'affirmer selon eux de façon certaine que le développement technique s'est accompagné d'un développement linguistique, et la maîtrise même de concepts comme la symétrie ne signifie pas nécessairement l'existence d'un langage permettant de les exprimer. Ces affirmations sont toutes implicitement liées aux conceptions que l'on peut se former sur la représentation cognitive des concepts, et le degré de dépendances de ces représentations au langage, question toujours sans réponse à l'heure actuelle. La citation de Winn rapportée dans [Ronen, 1998] résume la question :

“the tools themselves cannot answer this question. . .the evidence for language must come from elsewhere.” (p. 441)

Pour conclure, un point intéressant liant langage et outils concerne la transmission d'une génération à une autre des techniques (de taille, de chasse, de pêche...). Une transmission efficace laisse entrevoir la capitalisation d'un savoir, acquis dès lors beaucoup moins péniblement à chaque nouvelle génération. Le langage apparaît à première vue comme un très bon médiateur, mais certains posent toutefois la question de la transmission la plus efficace de savoirs comme celui de la taille de la pierre. L'observation seule peut constituer une meilleure méthode qu'une explication par la parole (l'alliance des deux ne peut-être que plus profitable). L'analogie citée est souvent celle du laçage des chaussures : il est difficile d'expliquer à un enfant comment lasser ses chaussures, mais joindre le geste à la parole aide à l'apprentissage. L'évocation d'événements passés, et la création de mythes, destinés par exemple à éviter les conflits, est un exemple où l'avantage du langage semble plus tangible [Victorri, 2000].

Les Néandertaliens étaient-ils dotés de la parole ?

D'une façon générale, l'archéologie et la paléo-anthropologie semblent se diriger dans le sens d'une origine plus ancienne du langage qu'elle ne l'était postulée il y a encore peu. Alors que l'émergence de la capacité symbolique et celle du langage pouvaient traditionnellement être attribuées à la période dite de “révolution culturelle” (ou révolution symbolique) il y a environ 45,000 ans [Klein, 1999] (p. 348), la situation semble évoluer aujourd'hui. Le débat porte principalement sur *Homo neandertalensis* et sur l'attribution d'une capacité langagière sophistiquée à cette espèce disparue. Différents travaux de physiologie humaine ont orientés leurs conclusions dans un sens ou dans l'autre. Toutefois, il est important de rappeler que l'existence d'une capacité (comme celle de produire un langage articulé) n'implique pas son existence : *l'organe ne fait pas la fonction*.

En 1971, Liebermann avance l'hypothèse que la descente du larynx lors de l'évolution phylogénétique de l'homme a joué un grand rôle dans l'émergence du langage [Lieberman and Crelin, 1971].

En s'appuyant sur des reconstructions effectuées à partir de squelettes de Néandertaliens, il émet l'hypothèse que la position basse de leur larynx ne pouvait leur permettre d'articuler les sons des langues actuelles, la langue ne pouvant atteindre des positions extrêmes, comme celles nécessitées par les voyelles [i], [a] ou [u]. Cette hypothèse est aujourd'hui réfutée par plusieurs arguments :

- les reconstructions du larynx de Néandertal étaient vraisemblablement erronées, comme suggéré par [Honda and Tiede, 1998]. La découverte d'un os hyoïde de Néandertal à Kebara en Israël ne montre pas de différence avec *Homo sapiens* ;
- il est possible, même avec un larynx abaissé (comme c'est le cas des jeunes enfants), de produire les voyelles extrêmes du triangle vocalique [Heim et al., 2002] ;
- même avec un triangle vocalique raccourci, il est toujours possible de bâtir des langages complexes, sans parler des possibilités comme les langues des signes¹⁸.

En 1998, trois chercheurs de l'université de Duke publient un article mettant en valeur une corrélation entre la taille du canal hypoglosse, l'orifice permettant le passage du nerf crânien numéro XII innervant la langue à travers les os du basi-crâne, et le diamètre de ce même nerf [Kay et al., 1998]. Mettant de plus en correspondance la taille du nerf et le développement du contrôle moteur de la langue, les auteurs proposent que la mesure du canal sur des squelettes ancestraux permettrait de se faire une idée du développement du langage articulé. Différentes mesures sur des singes et des squelettes humains montrent que le diamètre du canal chez les hommes modernes est beaucoup plus large que chez les grands singes, chez les Australopithèques et chez *Homo habilis*. Le canal de l'Homme de Néandertal est lui de taille comparable à celle du canal d'*Homo sapiens*, même sur des squelettes datés de plus de 400,000 ans, ce qui suggère pour les auteurs des capacités linguistiques à cette époque reculée. Cette position a été critiquée, tant sur la corrélation établie (faible nombre de sujets) que pour les mesures sur les espèces humaines plus anciennes [DeGusta et al., 1999].

Dans la même veine que l'étude précédente, l'américaine Ann MacLarmon a mise en évidence un diamètre plus important de la moelle épinière dans la région thoracique chez l'homme moderne par rapport à d'autres espèces. Ces nerfs innervent les muscles contrôlant le débit d'air, et un diamètre plus important serait corrélé à un meilleur contrôle du débit d'air, paramètre important pour la production du langage articulé. Comparant comme ci-dessus différents représentants du genre *Homo*, elle place de nouveau Sapiens et Néandertals dans un groupe différent de celui des hommes plus primitifs, et aussi des grands singes.

Parallèlement aux travaux en physiologie, la disparition des Néandertals lors de l'arrivée en Europe des Sapiens laisse supposer une infériorité des premiers face aux seconds lors de la compétition pour l'accès aux ressources (ou même dans des situations de conflits). La plus grande influence du climat lors du Moustérien sur les Néandertals par rapport à celle qui s'est exercée sur les Sapiens au cours de l'Aurignacien et des périodes ultérieures (Gravettien, Magdalénien...) va aussi dans le sens d'un avantage des populations d'*Homo sapiens* [Bocquet-Appel and Demars, 2000] [Jean-Jacques Hublin, audition des projets OHLL (CNRS), 7-8 Septembre 2002]. Toutefois, un avantage (par exemple démographique) même très faible a

¹⁸Notons ici que les grands singes ont également un larynx en position basse. Néanmoins, plus que cet aspect, c'est à un niveau cognitif qu'il semble raisonnable de se reporter pour expliquer l'absence de langage chez ces espèces.

pu être suffisant, comme le montrent des modélisations informatiques où deux populations sont en compétition pour l'accès aux mêmes ressources [Zubrow, 1989]. Dès lors, il n'est pas possible de conclure à une *large* infériorité technique et sociale des Néandertals. Il est par exemple difficile de trancher sur l'origine de l'industrie Châtel-Perronienne des derniers Néandertals (par exemple sur les sites de Saint-Césaire ou Arcy-sur-Cure) : copie de l'industrie Aurignacienne des nouveaux arrivants dont elle est très proche (par processus d'acculturation), ou simple coïncidence de deux inventions indépendantes [D'Errico et al., 1998]. La simple copie d'une industrie Sapiens serait déjà ici à mettre au crédit des Néandertaliens.

De leur côté, les partisans d'une émergence du langage chez les Sapiens repoussent également la date d'apparition de la culture et du langage : les travaux de Francesco d'Errico et Christopher Henshilwood aux grottes de Blombos en Afrique du Sud feraient remonter l'émergence du langage il y a plus de 70,000 ans. Pour cette affirmation, les chercheurs s'appuient sur la découverte de fragments d'ocre, et aussi d'un os gravé vraisemblablement utilisés dans un but symbolique [D'Errico et al., 2001].

L'utilisation domestique du feu à partir du Paléolithique Inférieur a été considérée comme une preuve de l'existence d'un langage symbolique, par le biais de la planification requise pour son entretien, la coopération globale qu'il requiert entre les individus, et la capacité cognitive de déplacement ("*displacement*") qu'il peut nécessiter chez les individus [Ronen, 1998]. Mais ce sont surtout les premières sépultures qui sont considérées comme de bons révélateurs d'un langage sophistiqué. Celui-ci soutiendrait en effet la pensée métaphysique ou religieuse d'individus concevant une vie après la mort. L'existence de sépultures est attestée chez les hommes de Néandertal au Moustérien sur plusieurs sites (La Ferrassie, Kebara. . .) mais la rudimentarité de ces sépultures et surtout l'absence de présence indiscutable d'offrandes (les traces retrouvées peuvent être expliquées par des fouilles d'animaux après l'enterrement et l'intrusion de corps étrangers, comme peut-être le pollen présent dans la grotte de Shanidar) peuvent faire douter des conceptions symboliques des hommes d'alors : les corps auraient simplement pu être enterrés pour qu'ils ne restent pas dans l'aire d'habitation (la position fœtale des individus enterrés aurait alors pu simplement épargner les efforts pour creuser) [Klein, 1999] (p. 467-470).

En comparaison, nombre de sépultures du Paléolithique Supérieur dues à *Homo sapiens* présentent des preuves indiscutables de rites funéraires et d'offrande aux morts, comme sur le site Sibérien de Mal'ta [Klein, 1999] (p. 552-553). La relation des sépultures avec un possible langage symbolique, si elle peut-être envisagée avec confiance chez les Sapiens, reste discutable chez les Néandertaliens.

Les certitudes sont donc rares, malgré l'abondance de sites, de restes humains ou de matériel lithique. Nous verrons toutefois plus tard comment des données sur les populations préhistoriques peuvent nous être utiles pour formuler des hypothèses sur les conditions linguistiques à ces époques reculées.

1.3.3 Psychologie et neurosciences cognitives

La psychologie cognitive, ainsi que les neurosciences cognitives, s'intéressent aux processus cognitifs humains, ainsi qu'à leur localisation dans le cerveau¹⁹. Le langage constitue bien sûr l'un de ces processus cognitifs, et peut être envisagé en rapport avec d'autres grandes fonctions

¹⁹La psychologie cognitive seule ne se préoccupe normalement que des processus et des fonctions, et non de leur réalisation neurale.

cognitives comme la mémoire ou les perceptions sensorielles.

Nous avons déjà mentionné les travaux de Broca et Wernicke et la découverte des premières régions cérébrales prenant part au traitement langagier. Pendant des décennies, l'étude des régions cérébrales a reposé uniquement sur des méthodes invasives, ce qui limitait considérablement l'étude des processus cognitifs (ce qui a en partie conduit à la naissance du courant béhavioriste) : techniques de sidération, étude de patients décédés, stimulations intra-cérébrales à l'aide d'électrodes (notamment pour les patients épileptiques), cas rares de patients survivant à des lésions importantes (comme le célèbre Phileas Gage, au lobe frontal endommagé par un grave accident [Coolidge and Wynn, 2001])...

Depuis une décennie, la révolution des techniques d'imagerie cérébrale a ouvert la voie à une nouvelle approche de la cognition, et permet de corréliser mécanismes cognitifs et activité neuronale du sujet. Différentes approches offrent chacune leurs avantages et leurs inconvénients :

- potentiels évoqués (*ERP* : *event-related potentials*); besoin de nombreuses répétitions, mesure d'ondes positives ou négatives (P400, N600...);
- magnéto-encéphalographie; mesure de l'activité neuronale par l'intermédiaire du champ magnétique engendré par l'activité électrique des réseaux neuronaux; très bonnes résolutions temporelle et spatiale, mais difficulté de mesurer les champs parallèles à la surface de la tête et d'interpréter les tâches complexes;
- tomographie par émission de positons (*PET* : *positron emission tomography*); observation de l'activité neuronale à partir de l'évolution du débit sanguin, utilisation d'un traceur radioactif; bonne résolution spatiale et accès aux zones profondes du cerveau, mauvaise résolution temporelle (ordre de la minute), besoin de nombreuses répétitions, moyennes sur plusieurs sujets;
- imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (IRMf); étude de la résonance magnétique nucléaire de l'atome d'hydrogène, utilisation de la différence entre les propriétés de la déoxyhémoglobine et de l'oxyhémoglobine grâce à l'effet Bold (*Blood Oxygen Level Dependent contrast*); très bonne résolution spatiale (quelque millimètres) mais mauvaise résolution temporelle (quelques secondes), faible rapport signal / bruit (5%); difficulté de contrôle des mouvements, difficulté d'interprétation de l'activité détectée (inhibition ou activation), bruit (écho-planar) qui rend difficile l'étude des processus langagiers.

Les travaux à l'heure actuelle se dirigent vers une combinaison des techniques, afin de bénéficier des avantages de chacune, et ainsi obtenir de bonnes résolutions spatiale et temporelle. Une nouvelle méthode est également en cours de développement : la méthode "event-related optical signal" (EROS) (traduction approximative : signaux optiques évoqués), qui s'appuie sur la modification des propriétés optiques des tissus lors de l'activité neuronale. Cette méthode est en cours de développement et elle cumule bonnes résolutions spatiale et temporelle. Elle est cependant limitée aux couches cérébrales superficielles (3 à 5 cm de profondeur), et le bruit généré est assez important [Gratton and Fabiani, 2001].

L'étude de sujets en situations de production ou de compréhension linguistiques a permis de vérifier le rôle des aires cérébrales découvertes auparavant à l'aide d'autres techniques. Elle a aussi conduit à la découverte de régions spécifiques pour la mémorisation de différentes catégories d'éléments. Une étude de Damasio [Damasio et al., 1996] propose ainsi les correspondances

de la table 1.4.

<i>Catégorie sémantique</i>	<i>Localisation</i>
Noms de personnes familières	pôle temporal
Noms d'animaux	lobe temporal inférieur
Noms d'objets	lobes temporal inférieur postérieur et occipital latéral antérieur

TAB. 1.4 – Régions spécifiques pour la mémorisation de différentes catégories d'éléments

Nous pouvons noter que cette distinction au niveau cérébral, en particulier entre noms d'objets (artéfacts produits par l'homme) et éléments plus "naturels", semble faire écho aux anciennes propositions d'André Leroi-Gourhan sur l'importance des outils et leur lien particulier avec le langage.

L'étude des fonctions et de leur localisation dans les aires cérébrales chez l'homme moderne peut apporter des indices quant à son évolution passée, et l'on peut ici parler de "psychologie évolutionniste". La comparaison avec nos proches cousins grands singes est ici utile pour déterminer à quel point l'organisation cérébrale de l'homme moderne lui est spécifique. La différenciation hémisphérique pour différentes fonctions cognitives est un point particulièrement intéressant. Elle se manifeste en effet chez l'homme, avec une prédominance de l'hémisphère gauche pour les traitements linguistiques.

L'étude d'endocastes d'Australopithèques et d'*Homo habilis* a montré un développement des aires de Broca chez ce second ancêtre il y a près de trois millions d'années. L'aire de Wernicke, difficile à détecter à partir des endocastes, semble vraisemblablement plus ancienne, et apparaît déjà chez nos proches cousins chimpanzés [Klein, 1999] (p. 348).

Deux possibilités peuvent être émises quant à l'existence de la différenciation hémisphérique pour les fonctions cognitives humaines, et en particulier celle du langage. La première est une apparition tardive de la spécialisation hémisphérique dans notre lignée, et du développement des aires précédentes, accompagnant l'accroissement général de la taille du cerveau. Dans ce cas, il est possible d'envisager un lien étroit entre l'apparition des premiers outils et l'émergence du langage : la spécialisation de l'hémisphère gauche pour le traitement d'actions fines et précises (la taille d'outils) aurait conduit à un développement du langage dans cette aire, puisque ce dernier nécessite lui aussi un contrôle très fin du corps (contrôle du flux respiratoire, du tractus vocal...). Une idée qui vient se greffer sur ce schéma est que la communication orale se serait développée sur les bases d'une communication gestuelle, qui se serait appuyée plus facilement au niveau cérébral sur les structures développées dans l'hémisphère gauche pour le contrôle de la main dominante [Corballis, 2000] (p. 50). Si l'ensemble des individus ne sont pas droitiers (la main droite est contrôlée par l'hémisphère gauche²⁰), la table 1.5 illustre le lien entre le langage et la main, et donc avec l'hémisphère qui la contrôle.

La position précédente a prédominé au cours des années 1960. Cependant, le développement des études sur la spécialisation hémisphérique (ou latéralisation fonctionnelle) semble indiquer que ce phénomène existe également chez l'ensemble des mammifères. [Philippe Vernier, audition des projets OHLL (CNRS), 7-8 Septembre 2002]. Il a été avancé que la différenciation originelle reposait sur une utilisation de l'hémisphère gauche pour le contrôle de la posture, alors que

²⁰Cette inversion entre une partie du corps et l'hémisphère qui la contrôle concerne l'ensemble du corps humain, à l'exception de quelques muscles du bassin.

	Langage HD	Langage HG	Langage HD et HG
Main droite dominante	97%	3%	très rare
Main gauche dominante	60%	20%	20%

TAB. 1.5 – Corrélation entre main dominante et localisation du langage dans le cerveau (HD : hémisphère droit, HG : hémisphère gauche)

l'hémisphère droit et la main gauche se spécialisaient pour la prédation. En outre, certains auteurs semblent aussi avoir démontré l'existence d'une asymétrie de l'aire de Broca (ou tout au moins de l'aire 44 de Brodmann, pour une définition plus physiologique que fonctionnelle) chez les grands singes [Cantalupo and Hopkins, 2001]. Cette latéralisation chez les primates reposeraient selon Cantalupo sur un couplage dynamique entre les systèmes perceptifs et moteurs. Toutefois, il semble qu'une différence fonctionnelle existe entre les aires de nos proches cousins et l'aire de Broca de notre propre espèce, comme nous le verrons par la suite.

Ces résultats inscrivent donc le début de la taille d'outils et l'émergence du langage dans un cadre évolutif plus général, ce qui ne remet pas en cause les théories de l'origine gestuelle du langage, mais affaiblit d'une certaine façon le lien entre langage et taille des outils au niveau neuronal (le premier ne découle pas de la seconde suite à l'émergence d'une différenciation cérébrale).

Différentes théories ont été avancées pour rendre compte plus précisément du passage d'un stade pré-langagier gestuel à un stade langagier.

Une théorie en vogue actuellement repose sur un passage des gestes au langage par le biais des neurones miroirs. L'aire F5 chez le singe (équivalente à la zone de Broca chez l'homme) est le siège de ces neurones qui intègrent des informations pluri-modales : ils répondent en effet à la fois à une action gestuelle spécifique exécutée par un individu, ou à la vision de cette action chez un congénère [Rizzolatti et al., 1996]. Le scénario défendu par Rizzolatti et Arbib est qu'une communication d'abord gestuelle aurait pu se développer sur le support de ces neurones, avant que le système ne se spécialise dans la reconnaissance des sons par la suite [Arbib and Rizzolatti, 1996].

Parallèlement à ce scénario et en le renforçant, Peter MacNeilage a développé une théorie baptisée **Frame-Content** pouvant rendre compte de la spécialisation de l'aire de Broca pour le langage. MacNeilage constate que chez le singe, l'aire 44 de Brodmann et l'aire 6 immédiatement postérieure sont impliquées dans la mastication, alors que le contrôle des vocalisations se trouve dans le gyrus cingulaire antérieur (dans la surface médiale de l'hémisphère). Grâce à un mécanisme d'évolution (néo-darwinien) avec descente, l'auteur suppose qu'un transfert de fonction s'est opérée entre le cortex médial et l'aire de Broca, ce qui est corroboré par un changement de la configuration de surface de l'aire de Broca chez *Homo habilis*. Selon lui, lorsque le contrôle des oscillations mandibulaires fut emprunté à des fins de communication, le contrôle de ces oscillations fut déplacé vers la région cérébrale déjà concernée par les vocalisations, à savoir le cortex médial. Ensuite, dans une seconde étape, l'ensemble des habiletés motrices liées à l'ingestion furent en fait disponible pour la fonction communicative développée dans le cortex médial, et l'aire de Broca pris un rôle important dans la production de la parole [MacNeilage, 1998]. Ces propositions sont renforcées par différentes évidences, que ce soit des études en imagerie cérébrale, des études de pathologies comme l'apraxie langagière ou des études en production chez des sujets normaux.

Les données que nous venons de présenter ne doivent pas masquer la complexité des processus langagiers, qui ne sont pas localisés aussi simplement dans un seul hémisphère. L'étude de langues utilisant des idéogrammes, comme le chinois ou le japonais, montre que l'hémisphère droit joue un rôle dans le traitement linguistique qu'il ne joue pas chez les individus parlant des langues dont l'écriture repose sur un système alphabétique. La comparaison de sujets allemands et japonais lisant des kanji (nom donné aux idéogrammes chinois dans la langue japonaise ; les japonais ont emprunté le système d'écriture chinois vers le VIII^{ème} siècle après Jésus Christ) permet la localisation de processus de traitement sémantique dans l'hémisphère droit chez les personnes japonaises, comme le gyrus fusiforme [Kamada et al., 1999]. En outre, les études en lecture chez des sujets bilingues mettent en valeur les influences de la langue native (L_1) sur la langue seconde (L_2), y compris au niveau des structures cérébrales activées : les régions concernées lors de la lecture des kanji seront différentes pour un locuteur de langue native japonaise et pour un locuteur de langue native anglaise (où les régions de décodage des systèmes alphabétiques traitent également les kanji) [Nakada et al., 2001].

Si les techniques d'imagerie permettent l'étude des processus cognitifs langagiers du sujet "normal", il est également possible de s'appuyer sur les troubles langagiers développés par des sujets après une lésion ou au cours du vieillissement. Un exemple intéressant est cité dans [Tzeng et al., 1994], où l'étude de la dégradation du langage chez des patients aphasiques apporte des informations utiles sur un processus de changement linguistique sur lequel nous reviendrons : la diffusion lexicale.

1.3.4 Théorie de l'évolution et théorie des jeux

Human language is an embarrassment for evolutionary theory.
David Premack.

Nous avons déjà présenté plusieurs scénarios d'émergence du langage, l'un basé sur une macro-mutation génétique, d'autres sur des évolutions mosaïques et entrelacées de différentes caractéristiques morphologiques. . . Il est intéressant de se poser la question de la pertinence de ces propositions vis à vis des théories de l'évolution. Pour tester cette conformité, la théorie des jeux peut être mise à profit. Cette discipline est une approche inter-disciplinaire de l'étude du comportement humain. Les mathématiques, l'économie et d'autres sciences sociales ou du comportement participent principalement à ce domaine développé en particulier sous la houlette de John Von Neumann. Par jeu, il faut entendre une métaphore des interactions humaines (dont le résultat dépend des stratégies mises en œuvre par les participants), et la théorie des jeux cherche à répondre à des questions portant sur les conditions de coopération entre individus (comme dans le célèbre *dilemme du prisonnier*) ou la rationalité de ces agents.

Une partie des chercheurs tente tout d'abord d'insister sur la pertinence évolutive de la dérive de la syntaxe à partir d'un niveau sémantique. Avec l'explosion de complexité sémantique concomitante à l'évolution de notre espèce, des chercheurs comme Thomas Schoenemann insistent sur le fait que de nombreuses structures syntaxiques découlent naturellement de la structuration sémantique des connaissances. En outre, un encodage génétique de caractéristiques syntaxiques ne satisfait pas selon lui les principes de l'évolution :

“The hypothesis that syntax is a separate, species-specific “language module” is highly dubious from an evolutionary perspective. We cannot ignore the fact that language, as with everything else, has an evolutionary history. . . All evolutionary hypotheses are not equally likely. The emergent hypothesis outlined here is consistent with all the basic principles governing the evolutionary process, explains the same facts equally well, and is much more parsimonious than models postulating the evolution of an innate, grammar-specific module. The features of UG which have been so far proposed are so general in nature that they do not resemble rules, but instead are simple descriptions of our semantic conceptualization of reality.” [Schoenemann, 1999] (p. 340-341)

La position de Thomas Schoenemann rejoint celle de William Wang, qui parle d'une *mosaïque* de capacités pré-existantes, assemblées pour former le langage [Wang, 1991]. Un exemple est celui des capacités d'ordonnement sériel, localisées en partie dans le cortex pré-frontal, dont la spécialisation pour cette aptitude est très ancienne (plusieurs dizaines de millions d'années) [Schoenemann and Wang, 1996]. Notons ici que les partisans d'une Grammaire Universelle innée ou d'un *Language Acquisition Device* ont tenté d'améliorer la pertinence de leurs théories vis à vis de l'évolution [Pinker and Bloom, 1990] [Nowak et al., 2001].

D'autres chercheurs se centrent plus spécifiquement sur les conditions d'émergence du langage au niveau évolutif. Jean-Louis Dessalles s'intéresse particulièrement à cette question et va à l'encontre de nombreuses hypothèses classiquement avancées par d'autres chercheurs [Dessalles, 2000].

Pour l'auteur, toute théorie doit en prendre en compte l'absence de langage chez les grands singes, et expliquer pourquoi il n'est pas apparu dans leur arbre phylogénétique comme dans le nôtre. En effet, si le langage est avantageux pour notre espèce de la façon dont le décrivent de nombreuses théories, il devrait l'être également pour nos proches parents. Il aurait dès lors dû apparaître dans leurs lignées sous la pression de sélection.

Jean-Louis Dessalles rejette ainsi de nombreuses théories et en particulier le schéma général orienté menant d'un ancêtre vieux de 5 à 10 millions d'années à l'homme moderne et son langage, avec les étapes du redressement, de la libération de la main. . . Les mécanismes de l'évolution ne sont pas conciliables avec de tels schémas à grande échelle : en reliant la théorie darwinienne de l'évolution, dont les changements graduels sélectionnent des modifications avantageuses, aux théories Gouldiennes, qui mettent l'accent sur l'absence de directionnalité ou de téléologie de l'évolution, Dessalles insiste sur le caractère **localement optimal** de phénomènes comme le langage. Si, localement, les innovations sélectionnées par les mécanismes évolutifs tendent vers une certaine direction et donnent l'impression d'une “amélioration”, le changement de niche écologique qui accompagne ces transformations brise cette directionnalité.

Dès lors, le langage n'est apparu que dans un cadre précis au sein de l'évolution humaine. Ce point est renforcé par son absence dans le reste du règne animal. Ceci tend à prouver qu'il n'est pas nécessaire ou “meilleur” pour une espèce de façon générale, et qu'il n'existe pas de schéma évolutif menant au langage.

Il reste à préciser le cadre local ayant conduit à l'émergence du langage chez l'homme. La raison invoquée par Jean-Louis Dessalles est celle de la formation de coalitions d'individus pour augmenter leurs chances de survie et leurs avantages. Après avoir démontré l'importance des coalitions dans de multiples espèces, et en particulier chez l'homme où l'existence de coalitions

en compétition pour la conquête du pouvoir leur confère un caractère politique, l'auteur postule que le langage est un moyen efficace pour exprimer ses propres qualités et inciter d'autres individus à former des coalitions avec soi [Dessalles, 2000] (p. 316-318).

L'un des points importants sur lequel insiste Dessalles est le paradoxe initial de toute communication, problème qu'il considère comme central pour toute théorie d'émergence du langage. Un individu qui communique de l'information d'une façon ou d'une autre à un congénère perd souvent le bénéfice de la connaissance privée de cette information (on parle de signal coûteux ou "*costly signalling*"). Par exemple, communiquer l'emplacement de nourriture fait aussitôt perdre le bénéfice qui consiste à garder cette nourriture pour soi. Sous ces conditions, il semble dès lors que tout système de communication est désavantageux et ne participe pas au meilleur succès reproductif de l'animal qui le possède, bien au contraire. Ainsi, il ne devrait logiquement pas être retenu par les mécanismes d'évolution [Dessalles, 2000] (p. 295). Dit autrement, il ne devrait pas exister de sélection de groupe des signaux de communication.

Le problème précédent concerne en fait la possibilité d'un comportement altruiste des individus là où la sélection Darwinienne sélectionne les gènes des individus aux meilleurs succès reproductifs. La résolution de ce problème a été abordée en particulier par les biologistes et les théoriciens des jeux, et de nombreux exemples de coopération existent en réalité dans la nature.

Une première solution est celle de la "*kin selection*" ou *sélection de parentèle*. Mise en évidence par Hamilton en 1964, elle se base sur les relations génétiques entre les individus (pourcentage du génome en commun, baptisé "*coefficient of relatedness*") et la notion d'"*inclusive fitness*" pour expliquer comment les individus de certaines espèces peuvent aider leurs proches parents génétiques afin de propager une partie de leur génome. L'aide des parents aux enfants est une manifestation courante, l'existence d'individus stériles dans les communautés d'insectes sociaux un cas extrême (l'évolution a engendré des animaux qui ne peuvent transmettre leurs gènes, mais travaillent tous à la préservation de ceux de la reine sur la base du partage d'une partie de l'information génétique).

L'altruisme réciproque ou symétrique est une deuxième tentative pour expliquer l'existence de coopération entre les individus. L'idée est résumée de la façon suivante par Dessalles :

"if A gives G_1 to B and bears the cost C_1 , the behavior seems altruistic, but if B spends C_2 to return G_2 to A , both participants benefit from the transaction as soon as $G_2 - C_1 > 0$ and $G_1 - C_2 > 0$." [Dessalles, 1999] (p. 144)

Le problème est toutefois que cette réciprocité est très sensible à la possibilité de tricher et/ou de récupérer de l'information sans en émettre soi-même. Ceci est vrai si l'acte de réciprocité n'est pas simultané à l'acte initial, et si la défection de l'acteur B lui permet de s'épargner le coût C_2 tout en gagnant G_1 . La reconnaissance des tricheurs et leur mémorisation peuvent aider à la sélection. Récemment, trois chercheurs du Santa Fe Institute ont cependant détaillé un modèle théorique qui rend possible l'émergence de signaux de communication si ceux-ci servent à exprimer de façon honnête la qualité d'un individu pour certaines actions comme la reproduction ou la coalition contre d'autres individus [Smith et al., 2001].

Amotz Zahavi a proposé enfin deux autres théories pouvant rendre compte d'un comportement altruiste en l'absence de coopération. La théorie du prestige repose sur l'idée qu'un comportement altruiste servira à un individu à prouver son prestige vis à vis des autres membres de sa communauté, ce qui favorisera un haut rang hiérarchique et la possibilité de s'accoupler dans les meilleures conditions. De tels comportements impliquent parfois que l'individu tente d'em-

pêcher toute réciprocité de la part des autres membres, puisque ceci diminuerait son prestige [Dessalles, 1999] (p. 156). C'est sur cette idée (enrichie) que Dessalles s'appuie pour son scénario d'émergence du langage.

Cette théorie est proche de celle du handicap, qui explique que certains animaux auront des comportements *a priori* coûteux pour eux, mais qui en fait serviront à avertir leur adversaire ou leur prédateur de leurs qualités physiques ou de leur capacité à fuir ou prendre l'avantage lors d'un combat. L'antilope qui saute devant le lion alors que ceci diminue ses forces démontre ses qualités physiques. Les cris d'alarmes des singes vervets [Cheney and Seyfarth, 1990] peuvent également être interprétés comme non altruistes : ils serviraient juste à un singe à signifier au prédateur qu'il l'a repéré et peut s'enfuir facilement.

1.4 Premières conclusions

Comme nous espérons l'avoir souligné dans les paragraphes précédents, les théories et les questions sont nombreuses. Nous pouvons cependant tenter de classer grossièrement les positions des uns et des autres :

- émergence ancienne du langage, il y a plusieurs millions d'années, ou émergence plus récente, éventuellement dans notre espèce apparue entre 200,000 BP (*Before Present*) et 100,000 BP ;
- dans le prolongement de la distinction précédente, émergence du langage humain dans le cadre et le prolongement des systèmes de communication des espèces voisines, ou discontinuité ;
- émergence dans le contexte général de l'évolution humaine, ou émergence du langage en tant qu'optimum local ;
- existence ou absence de gènes *spécifiques* au langage, en particulier pour le traitement syntaxique.

L'incertitude importante à l'heure actuelle sur l'ensemble de ces points fait que nombre de positions des chercheurs semblent reposer sur des intuitions acquises au cours de leur travail, dans le cadre spécifique de leur recherche, mais sans la présence d'arguments décisifs. Il nous semble dès lors utile de spécifier clairement les postulats et les hypothèses de travail que nous avons adoptés pour nos études. Nous détaillerons ceux-ci à la fin de la première partie de cette thèse.

Un élément central dans l'exposé qui suivra de nos tentatives de recherche transparaît en filigrane dans l'histoire du questionnement scientifique précédent : la difficulté de tracer une limite claire entre langue et langage, confusion accentuée peut-être par l'utilisation d'un seul mot en langue anglaise pour ces deux termes français (*language*). D'un côté, des milliers, voire des centaines de milliers d'années nous séparent de l'origine du langage en tant que faculté. De l'autre, nombre de chercheurs en linguistique historique s'accordent sur l'hypothèse qu'il n'est pas possible de reconstruire des langues parlées il y a plus de 7,000 ou 8,000 ans.

Suite à ces quelques points, il nous incombe maintenant de mieux définir à la fois la façon dont les langues peuvent évoluer, et de lier ces évolutions aux caractéristiques internes ou sociales du langage. Il s'agit de l'objectif du second chapitre.

Chapitre 2

Approche "systémique" du langage : description et dynamique

*La recherche fondamentale, c'est ce que je fais quand je
ne sais pas ce que je suis en train de faire.*

Werner von Braun.

Les langues sont en perpétuel changement. Ce constat, qui remonte aux premières comparaisons de la linguistique historique, permet d'envisager le chemin parcouru entre les premières langues de l'humanité et les langues actuelles. Cependant, entre une conceptualisation des évolutions des langues et la compréhension fine de celles-ci se dresse la complexité des structures linguistiques et des sociétés de locuteurs.

Ce second chapitre se propose d'introduire une partie des théories avancées pour rendre compte des changements linguistiques. Afin de reprendre, de façon modeste, le courant systémique engagé par Ferdinand de Saussure il y a plus d'un siècle, et de suivre les traces des modélisateurs sur la notion de système adaptatif complexe [Steels, 2000], nous nous proposons d'articuler notre propos selon une description systémique du langage et de ses évolutions. Par approche systémique, nous entendons principalement une conception du langage comme un objet composé, dont les éléments constitutifs sont en interaction, et dont nous tentons de définir les limites, les espaces d'états possibles, les contraintes internes ou externes. . . Par cette démarche, nous espérons au moins partiellement échapper au piège de la subjectivité imposée par une description enracinée dans une discipline particulière.

Nous précisons tout d'abord dans une première partie les principales caractéristiques du "système langage", avant de nous axer plus particulièrement sur les évolutions linguistiques dans une seconde partie.

2.1 Description systémique et dimensions du langage

2.1.1 Une description systémique du langage

Approche "a-disciplinaire" du langage

Le langage est un objet riche et multiforme. Les langues évoluent et se transforment d'une façon complexe. Cette complexité résulte principalement des nombreuses couches et structures entrelacées qui viennent interagir pour définir les notions de langue et de langage.

L'étude de ces dernières est l'objectif de la linguistique, mais les sous-branches de cette discipline, comme peuvent l'être celles de la physique ou des mathématiques, emploient des méthodologies et des outils très différents. Quand la sociolinguistique analyse les productions de nombreux sujets dans des contextes libres, la psycholinguistique se centre elle sur des expériences contrôlées permettant la mesure de différents indicateurs des mécanismes cognitifs langagiers : temps de réaction, jugements divers des sujets. . . Si l'acquisition en tant que discipline linguistique étudie l'apparition des structures linguistiques chez l'enfant, en analysant très précisément un ou quelques sujets, la linguistique historique s'appuie sur des données plus abstraites pour travailler sur les langues, tandis que les modélisateurs créent des "langages" artificiels pour leurs études informatiques²¹. . . En outre, les données extra-linguistiques, physiologiques, neurologiques, génétiques etc., apportent des éclairages encore différents.

L'abondance de points de vue et de méthodologies est indispensable pour une meilleure compréhension d'un objet aussi complexe que le langage. Toutefois, il n'est pas sûr qu'elle soit nécessaire pour l'étude des dynamiques d'évolution et du comportement du langage en tant que *système*. Au contraire, la pluridisciplinarité risque peut-être dans certains cas de masquer des phénomènes spécifiques à l'aspect systémique du langage par l'ajout de caractéristiques non indispensables à la compréhension des contraintes et des phénomènes en jeu. Toutefois, se reposer sur une seule discipline parmi celles qui observent l'évolution du langage peut conduire à l'opposé à l'oubli de certaines caractéristiques importantes.

Dans le cadre assez abstrait de notre exposé, il apparaît donc que tirer parti des différentes disciplines est une nécessité pour percevoir le langage dans son entièreté, mais qu'il est préférable de suivre une trame descriptive plus "a-disciplinaire". Notre approche se voudra donc systémique, c'est à dire une description qui puisse s'échapper du carcan des méthodologies et des points de vue particuliers à une discipline comme la linguistique, la biologie. . . en se focalisant sur les propriétés du langage en tant que système. La notion de système dynamique complexe que nous allons maintenant décrire peut nous aider à progresser dans cette direction.

La notion de système dynamique complexe

Au cours des quinze dernières années, plusieurs chercheurs ont eu recours à la notion de système dynamique (adaptatif) complexe pour décrire le langage. Luc Steels le définit de la façon suivante :

"a complex dynamical system, or complex system for short, consists of a set of interacting elements where the behavior of the total is an indirect, non-hierarchical consequence of the behavior of the different parts. . . In complex systems, global coherence is reached despite purely local non-linear interactions. There is no central control source. Typically the system is open : new

²¹Notons ici que des langages artificiels peuvent également être utilisés pour des expériences de psycholinguistique avec des sujets humains [Christiansen, 2000].

elements are entering and leaving and/or energy is constantly supplied keeping the system out of equilibrium.” [Steels, 1997c] (p. 2)

Cette notion rappelle les principes généraux de la Gestalt des années 1920, et de l'énoncé célèbre :

“There are wholes, the behavior of which is not determined by that of their individual elements, but where the part-processes are themselves determined by the intrinsic nature of the whole.” [Wertheimer, 1925].”

Le terme adaptatif se rapporte quant à lui à la capacité du système à s'adapter aux flux d'énergie ou d'éléments qui le traversent pour conserver sa cohérence.

La notion de système dynamique est très générale, et concerne une multitude de phénomènes du réel. C'est cette abstraction par rapport au contenu d'un phénomène qui semble pertinente pour l'objectif que nous nous sommes fixés plus haut :

“The point of such borrowing is that the terminology is neutral with respect to the ‘content’ of the system; to put it in another way, a general dynamical description is a syntax without a semantics. Such a neutral expository language allows us to talk about the shapes of historical developments without an ontological commitment, and may let us see things that we would not otherwise, or at least see things differently.” [Lass, 1997] (p. 294)

La notion de structure

Une des notions que nous emploierons très souvent par la suite est celle de structure. Le concept est né en linguistique, principalement sous l'impulsion des travaux de Ferdinand de Saussure, mais nous référerons à la définition générale suivante (issue du Trésor de la Langue Française Informatisé) :

“Une structure est un agencement, entre eux, des éléments constitutifs d'un ensemble construit, qui fait de cet ensemble un tout cohérent et lui donne son aspect spécifique.”

Afin de rendre plus manifeste l'aspect cohérent d'une structure, nous pouvons assigner à toute structure un ensemble d'attributs qui la définissent et fondent sa spécificité par rapport à d'autres structures. Un attribut usuel pourra être ainsi la fonction de la structure. Si l'on considère par exemple la structure “voiture”, composée d'un ensemble de composants (les roues, la carrosserie...), un des attributs de cette structure est sa fonction en tant que moyen de transport.

Notons ici que l'attribution des caractéristiques d'une structure, et donc la définition même de cette dernière, repose en partie sur l'observateur à l'origine de la description et le contexte de celle-ci.

Le langage peut être considéré comme une structure, puisqu'il est l'agencement d'éléments constitutifs dont l'assemblage constitue un tout cohérent, un savoir un moyen de communication propre à notre espèce et spécifique par nombre de ses attributs. Nombre de ses éléments sont toutefois eux aussi des structures, et il est donc possible de parler du langage comme une **macro-structure**.

La notion d'item linguistique

Nous référerons souvent par la suite à la notion d'item linguistique. La définition de Nettle pour cet objet est la suivante :

"A linguistic item is any piece of structure that can be independently learned and therefore transmitted from one speaker to another, or from one language to another. Words are the most obvious linguistic items, but sounds and phonological processes are items too, as are grammatical patterns and constructions. . . The distributions of different items in the world's languages need not be statistically independent, and indeed very often are not." [Nettle, 1999b] (p. 5)

Comme le précise Nettle, des interactions peuvent exister entre les items linguistiques, et ce sont ces interactions qui vont conduire à la formation de structures et de sous-systèmes linguistiques.

Si l'on envisage des structures constituées elles-mêmes d'autres structures, nous arrivons logiquement à la conclusion qu'un item peut lui-même être une structure. L'idée à retenir est toutefois qu'il est souvent possible de déterminer différentes couches relativement indépendantes dans un système complexe ; les structures d'une couche correspondront souvent alors aux items de la couche supérieure. Dans le cas du langage, les structures phonologiques constitueront ainsi les items de base pour la composition des morphèmes, et ces derniers les briques des structures syntaxiques.

La notion d'item linguistique est très abstraite, mais elle a l'avantage d'être assez générale pour permettre une approche formelle apte à fournir des résultats quantitatifs (ce que nous ferons au chapitre 6) et qualitatifs (ce qui est le but de ce chapitre).

2.1.2 Trois dimensions pour l'espace linguistique

Il nous paraît utile pour simplifier la tâche descriptive de mettre en valeur les dimensions majeures du phénomène langagier. Le croisement de ces dimensions avec les caractéristiques générales des systèmes dynamiques complexes nous permettra d'adopter un plan plus clair pour notre description.

Nous proposons donc de définir 3 dimensions du "système langage", qui fondent selon nous les spécificités du langage parmi les systèmes dynamiques complexes. Le terme de dimension est à comprendre ici d'un point de vue général, et non selon un sens mathématique plus restreint.

La première dimension englobe les différentes structures ou couches "internes" qui définissent l'activité langagière (ou comme nous l'avons dit plus haut, composent la macro-structure qu'est le langage) et que l'on peut éventuellement considérer de façon indépendante du locuteur : les composantes sémantique, syntaxique, phonologique, morphologique et pragmatique du langage. Ces composantes sont reliées les unes aux autres de différentes façons et interagissent plus ou moins fortement. On notera ici la proposition de Noam Chomsky d'une syntaxe indépendante de la sémantique, et les positions opposées de chercheurs comme Thomas Schoenemann (voir chapitre 1). Nous désignerons par l'adjectif **structurel(le)** cette dimension du langage.

Une seconde dimension relève de l'existence *effective* du langage chez un individu et dans un environnement, dans le sens où le langage n'est pas un système abstrait mais au contraire

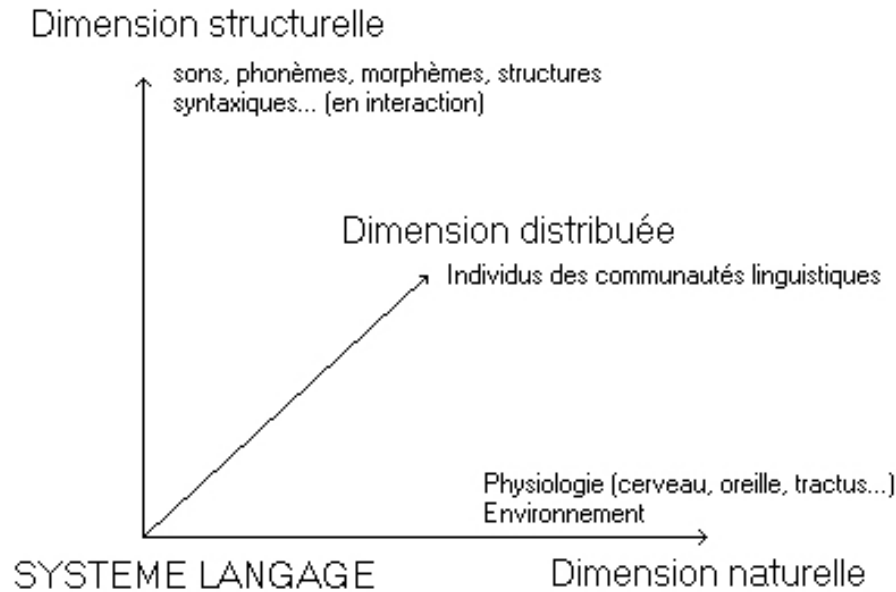


FIG. 2.1 – Les trois dimensions du “système langage”

se réifie par son existence chez des locuteurs et pour décrire le monde qui nous entoure. Cette dimension **naturelle** du langage recouvre les différents facteurs biologiques, psychologiques, évolutifs qui font du langage une activité cognitive humaine, dépendante des locuteurs et de leurs caractéristiques. Elle prend également en compte l’univers sémantique dans lequel évolue ces individus, puisque le langage sert avant tout à énoncer des propositions sur le monde.

Des phénomènes psychologiques comme l’acquisition du langage par l’enfant font partie des phénomènes pris en compte par ce concept de naturalité du langage. Celui-ci permet d’étudier comment le langage est rendu possible mais aussi est contraint par les caractéristiques biologiques et psychologiques de ceux qui l’utilisent.

Enfin, le caractère éminemment social du langage reflète une troisième et dernière dimension que nous qualifierons de **distribuée**. Cette dimension singularise le langage en tant que système dynamique complexe, car celui-ci est en fait composé d’une multitude d’instanciations “dans” les différents membres d’une communauté. Le fait que chaque individu possède un système linguistique qui lui soit propre pose d’emblée la question de la proximité de ces instanciations et des différences inter-individuelles qui peuvent exister dans une communauté.

La figure 2.1 récapitule les trois dimensions structurale, naturelle et distribuée.

Nous sommes conscients de la réduction que représente cette organisation de la macro-structure “langage” en seulement trois dimensions, qui sont en grande partie artificielles et qui de plus interagissent entre elles de façon complexe. Néanmoins, cette approche permettra de faciliter la présentation des principaux phénomènes que nous souhaitons aborder. Elle nous servira également à mettre en valeur les similarités et les dissimilarités entre les deux concepts de structuration et de naturalité pour le langage, qui correspondent respectivement à la première

et à la troisième dimension.

2.2 Description "synchronique" du système linguistique (état statique)

Afin de clarifier notre approche du langage en tant que système dynamique complexe, nous allons tenter tout d'abord de discerner quelques caractéristiques de ce dernier qui soient aptes à exprimer sa nature et ses propriétés. Définir les frontières du système linguistique est une étape préliminaire indispensable pour identifier les flux d'énergie et d'éléments évoqués par Steels.

Un deuxième point concerne l'espace des états possibles du système et les "moteurs" du changement. Tout système dynamique ne peut tout d'abord évoluer dans une certaine direction que si des transformations peuvent apparaître dans sa structure. Il doit donc nécessairement exister différents états possibles (admissibles) du système. En outre, pour que des mécanismes d'évolution puissent être mis en jeu (et nous détaillerons quelques uns de ces mécanismes dans la troisième section de ce chapitre), il faut qu'un certain nombre de contraintes, internes ou externes vis à vis des frontières du système, exercent des forces aptes à déclencher ces mécanismes de transformation.

Afin de disposer de référents, nous tenterons de comparer le langage à d'autres systèmes dynamiques complexes, et en particulier à celui des espèces biologiques souvent cité par les différents chercheurs en évolution du langage. Ceci nous permettra de mieux définir l'évolution linguistique par contraste.

Nous tenterons enfin de souligner les similarités fonctionnelles et topologiques entre les dimensions structurelle et distribuée du langage, en montrant que les phénomènes qui s'y produisent sont souvent similaires.

2.2.1 Les frontières du système linguistique

Considérer un système implique de définir clairement ses limites. Selon les systèmes considérés, de telles limites peuvent être spatiales, temporelles ou même conceptuelles. Leur définition est nécessaire pour identifier les contraintes internes ou externes influençant l'évolution ou la structure du système, ainsi que les flux d'entrée et de sortie en cas de système ouvert.

L'étude des systèmes thermodynamiques permet de bien prendre la mesure de l'importance de cette démarche, puisque certaines règles fondamentales de la thermodynamique, comme celles relatives à l'entropie, ne peuvent s'appliquer qu'à des systèmes fermés. Des problèmes délicats peuvent surgir en cas d'imprécisions, comme nous le verrons plus tard.

Définir les frontières d'un "système langage" est difficile, et plusieurs solutions peuvent être envisagées. Nous pouvons pour aborder ce problème considérer d'abord celui de la définition des langues, qui est un sujet d'étude important de la linguistique. La question est de déterminer ici quels facteurs permettent la différenciation d'ensembles d'idiolectes (l'idiolecte est le système linguistique d'un individu).

En biologie, deux concepts (et deux systèmes différents) sont identifiés par les termes d'*individu* et d'*espèce*. Définir une espèce est un problème plus difficile qu'il n'y paraît, et dépasse l'idée d'une classe de ressemblances phénotypiques, bien que ce critère puisse aussi servir à la définition. Celle adoptée par les biologistes repose en fait sur le critère d'inter-fécondité :

“Species are groups of actually or potentially interbreeding natural populations, which are reproductively isolated from other such groups.” [Mayr, 1944] (p. 120)

Ce critère est cependant délicat à manier pour plusieurs raisons, dont les suivantes :

- l’inter-fécondité englobe différents cas, allant de la génération d’individus non-viables, à des individus stériles ou au contraire sans aucun problème de reproduction ;
- comme le rapporte Daniel Nettle citant les travaux de Mayr, il existe des chaînes d’espèces où deux espèces voisines sont inter-fécondes mais pas deux espèces aux extrémités de la chaîne [Nettle, 1999b] (p. 64) ;
- des dissymétries peuvent exister entre le croisement d’un mâle d’une espèce A avec une femelle d’espèce B, et celui d’un mâle “B” avec une femelle “A”.

Les problèmes rencontrés en linguistique sont très voisins de ceux de la biologie, et la définition des langues est très délicate. De façon isomorphe au caractère d’inter-fécondité, le critère d’inter-compréhension ou d’intelligibilité mutuelle est le plus cité pour distinguer deux langues de deux dialectes. Ces derniers comportent des différences qui n’empêchent pas l’inter-compréhension, à l’inverse des langues. Toutefois, comme pour les espèces, des chaînes dialectales existent où deux dialectes proches seront inter-compréhensibles, mais pas ceux aux extrémités du continuum. En outre, des dissymétries peuvent être mises au jour : les locuteurs arabophones du Moyen-Orient comprennent généralement mieux les dialectes arabes du Maghreb que les locuteurs arabophones maghrébins ne comprennent les dialectes moyen-orientaux.

Pour résumer, l’un des problèmes de base est donc que les relations d’inter-fécondité et d’inter-compréhension ne sont pas *transitives* : Si A et B sont deux langues ou deux espèces, $(A \mathbf{R} B)$ et $(B \mathbf{R} C)$ n’impliquent pas nécessairement $(A \mathbf{R} C)$. Elles ne sont également pas symétriques : $(A \mathbf{R} B)$ n’implique pas $(B \mathbf{R} A)$.

Certains auteurs sont allés jusqu’à refuser la notion de langue, et préfèrent ne considérer que les variations entre locuteurs sans tenter de définir des unités particulières.

Pour tenter de surmonter ces problèmes, il est également possible dans une perspective plus anthropologique de faire correspondre une langue à un certain nombre d’autres traits culturels. Cette option trouve son ancrage dans le fait qu’une barrière linguistique entraîne souvent des limitations dans les échanges d’individus qui ne se comprennent que peu ou pas. Les flux génétiques et culturels sont ainsi influencés par les barrières linguistiques, puisque les individus choisissent le plus souvent pour compagne ou compagnon un individu parlant la (ou les) même(s) langue(s), et également de même culture (bien qu’il existe de nombreuses exceptions).

Nous pouvons citer la distinction proposée par Chomsky entre *I-language* et *E-language* [Chomsky, 1986] : le langage interne ou *I-language* reflète le langage d’un locuteur par le biais de l’ensemble de ces productions, tandis que le langage externe ou *E-language* réfère à la notion courante de langue, et représente en fait le contexte linguistique dans lequel baigne un individu. Chomsky attribue les faveurs d’une étude scientifique au *I-language*, beaucoup mieux défini que le *E-language* par sa circonscription à un unique individu.

Le problème de reporter son intérêt au seul *I-language* est que ceci masque la variabilité qui existe entre différents individus. Ceci correspond d'ailleurs bien à la position innéiste de Chomsky qui pense que les caractéristiques du langage sont à trouver au niveau cognitif d'un locuteur. La perte potentielle d'information est bien illustrée par certaines recherches en imagerie cérébrale PET, où les variations inter-individuelles peuvent disparaître au cours du moyennage des activités des différents sujets [Dehaene et al., 1997] (p. 3809). [Ross, 1979] présente une bonne illustration de la diversité des langages individuels (ou idiolectes), en étudiant les jugements de grammaticalité de locuteurs anglais pour différentes phrases.

Une autre distinction est proposée par Salikoko Mufwene entre langage *individuel* et langage *communal*. Dans le cadre de ses études sur les créoles, cet auteur se penche sur la possibilité de définir le langage au niveau d'une population d'individus et tente de répondre à la question de l'extrapolation des caractéristiques individuelles au niveau communal ("*how and when features of individual idiolects can be extrapolated as characteristic of a language as a communal system?*"). Il pose également la question de la connaissance du langage en tant que propriété au niveau de la population (if "*the knowledge of a language is a property of a population*") [Mufwene, 2001] (p. 2).

Si l'on désire étudier les différentes dimensions du langage, il n'est pas possible de se restreindre à un seul individu. Un système langagier peut donc être défini comme la collection des langages internes d'un groupe d'individus. Cette définition distribuée est une particularité du "système langage", qui a des conséquences bien spécifiques sur la façon dont celui-ci évolue. S'il n'est apparemment pas possible de définir une entité stricte baptisée langue, il est néanmoins possible d'envisager une mesure de distance abstraite entre les idiolectes des différents locuteurs. Une langue (ou un *E-language*) peut être définie *plus soupagement* par le biais de clusters de *I-languages*, où les distances intra-clusters sont moins importantes que les distances inter-clusters. Nous continuerons par la suite à employer le terme de langue, mais selon la définition précédente basée sur la notion de cluster d'individus.

La langue d'un groupe d'individus influence le parler de chacun des membres, alors qu'elle se définit comme la collection même de ces parlers. Cette propriété laisse entrevoir la façon dont un individu peut modifier les idiolectes de ses congénères. On observe ainsi un processus réciproque entre les idiolectes des individus et l'abstraction que représente une langue. Dans la définition de Steels comme dans le principe de la Gestalt, l'impression est celle d'un processus bottom-up des constituants vers la structure globale. Cependant, dans le cas du langage, la structure influence également les composants qui la construisent. Cette propriété n'est pas présente dans tous les systèmes complexes : dans une colonie de fourmis, la structure de la colonie résulte des comportements individuels, mais ne les influence pas en retour. Tout repose donc sur la perméabilité du comportement des individus aux éléments extérieurs, et cette perméabilité est forte dans le cas du langage.

Comme le soulignait Steels, le langage est un système ouvert, et ce sur deux de ses dimensions : les dimensions distribuée et structurelle. La naissance et la mort des individus entraîne un renouvellement des populations de locuteurs, alors que les évolutions des mots, des structures syntaxiques, des phonèmes... contribuent à un renouvellement de la structure interne du langage. Cependant, la fonction générale du langage est préservée, et une langue conserve à chaque instant sa capacité à convoyer de l'information et à lier les représentations cognitives des locuteurs.

Pour conclure, il est possible de considérer le langage lui-même comme une collection de sous-

systèmes dynamiques complexes. Le lexique est ainsi composé d’un ensemble de morphèmes, soumis à différentes contraintes internes et externes, et qui évolue au cours du temps en régime ouvert. Le langage d’un locuteur particulier est également un système dynamique complexe. Ce sont ces très nombreuses structures imbriquées qui sont à l’origine de la grande complexité du “système langage”.

2.2.2 Structures et auto-organisation

La notion de structure ou d’organisation revient souvent au cours de nos descriptions. Le “système langage” se situe à la croisée de multiples structures de nature plus ou moins abstraite, que ce soit au niveau d’un individu ou d’une communauté de locuteurs.

Dans ces deux cas, et dans le cas de toute structure, les composants interagissent entre eux et leur assemblage conduit à des propriétés d’ordre supérieur : *“le tout est plus que la somme des parties”*.

Parmi l’ensemble des phénomènes qui participent à l’émergence d’une structure, l’**auto-organisation** se démarque par sa capacité importante de structuration et sa grande fréquence d’occurrence dans une très large gamme de systèmes. Ce phénomène a en effet été mis au jour dans de nombreux domaines et étudié intensivement au cours des dernières décennies, dans des disciplines allant de l’éthologie à la physique des fluides ou la linguistique.

Définition de l’auto-organisation

[Haken, 1988] définit un système qui s’auto-organise par la condition suivante :

“if it acquires a functional, spatial, or temporal structure without specific interference from the outside”.

En d’autres mots, l’auto-organisation est la capacité d’un système à présenter l’émergence d’un ordre interne (une structuration) de façon intrinsèque, ce qui signifie que cet ordre émergent ne résulte pas et ne trouve pas son origine dans des forces extérieures au système. Néanmoins, ces forces peuvent être présentes et participer à la forme de la structure émergente. Pour éviter les confusions, il est nécessaire de bien distinguer le processus qui mène à l’auto-organisation et les éléments qu’il manipule. Sans ces éléments qui peuvent être externes au système, aucune auto-organisation ne peut apparaître, mais le processus lui-même demeure interne au système.

L’auto-organisation peut être considérée comme une diminution de l’**entropie** du système. Une définition rigoureuse et mathématique de l’auto-organisation reste à établir, et le concept d’entropie peut-être utile à cette fin. Il existe en effet un paradoxe dans la diminution de l’entropie d’un système : la seconde loi de la thermodynamique postule que l’entropie d’un système fermé ne peut décroître, et il est dès lors difficile de comprendre comment un système fermé peut s’auto-organiser. Ce problème souligne la difficulté de bien définir les frontières du système. Il semble en effet que les systèmes auto-organisés échangent de l’énergie (de la chaleur ou du “désordre”) avec l’environnement, ce qui fait d’eux des systèmes ouverts. De tels systèmes qui maintiennent leur organisation en exportant de l’entropie ont été appelés *structures dissipatives* par Nicolis et Prigogine [Nicolis and Prigogine, 1977]. Si l’on considère un système (théorique) plus large contenant le premier système et son environnement, la diminution d’entropie du système initial causée par l’auto-organisation est le plus souvent largement inférieure en valeur

absolue à l'augmentation d'entropie dans le système général causée par les échanges locaux et le caractère aléatoire de ces interactions [Parunak and Brueckner, 2001]. Le second principe de la thermodynamique est bien vérifié.

Les colonies de termites ou de fourmis sont des exemples bien connus et pédagogiques de systèmes auto-organisés [Bonabeau and Theraulaz, 2000] (chapitre 2). Malgré la grande complexité des structures créées par ces insectes (structures des termitières ou des fourmilières, chemins de récolte de nourriture...), il a été prouvé qu'il n'existe pas de contrôle supervisé réalisé par un ou certains membres de la colonie (comme la reine), ni de capacités cognitives qui permettraient aux insectes de concevoir le résultat de leur actions. En lieu et place de mécanismes sophistiqués, des gradients de phéromones et des interactions simples sont les seuls ingrédients requis pour produire une structure d'ordre supérieur [Bonabeau et al., 1998].

Les systèmes auto-organisés sont également très présents dans les sociétés humaines, même si nos capacités cognitives sont bien supérieures à celles des insectes précédents. La complexité spectaculaire des organisations humaines est le résultat d'interactions entre des individus qui n'agissent pas en anticipant le résultat de leurs actions sur la structure totale (d'où de nombreux problèmes financiers, écologiques...). Ces phénomènes réfèrent au concept de **rationalité limitée**, souvent utilisé en économie cognitive pour prévoir la structure d'un marché financier en fonction des comportements simples (imitation, échanges d'informations...) des acteurs [Edmonds, 1999] [Weisbuch and Stauffer, 2000]. Cette rationalité limitée est également à l'œuvre lors de l'évolution des langues, puisque la majeure partie des locuteurs ne contrôle pas son influence linguistique et n'est pas consciente des processus d'évolution linguistique.

Certaines de nos capacités cognitives ou encore le développement du cerveau humain pourraient également reposer sur des processus auto-organisés. Marvin Minsky parle ainsi de société de l'esprit [Minsky, 1987], et les processus de croissance neurale, qui reposent en partie sur de nombreux gradients de substances chimiques, constituent également de très bons candidats à l'auto-organisation.

Une opinion courante est que le résultat global d'un processus auto-organisé n'est pas prédictible à partir de l'observation des interactions locales (nous concevons le résultat d'une façon générique, indépendante des éléments spécifiques manipulés par le processus). Cependant, aucune magie ou phénomène transcendant n'est à la base de l'auto-organisation, et si les conséquences du processus n'étaient pas présentes dans les interactions locales, l'auto-organisation plongerait ses racines dans une réalité intangible. Dit plus simplement, il n'est pas possible que "quelque chose apparaisse de nulle part".

Il ne faut pas voir dans cette affirmation une négation des critiques du réductionnisme. Celui-ci, souvent invoqué dans le domaine des neurosciences, souligne le fait que se restreindre à l'examen des propriétés des neurones ne permet pas de tirer de conclusions au niveau du réseau entier. En effet, l'architecture et les schémas de connexions jouent un rôle important dans les propriétés fonctionnelles du réseau. Toutefois, les interactions locales d'un processus auto-organisé, s'il n'existe pas de contraintes sur leur distribution, contiennent toute l'information pour concevoir l'évolution du système entier. Le problème réel concerne la capacité ou non d'extraire cette information. Il est de nature computationnelle, et résulte de limitations cognitives ou plus généralement de calcul.

Auto-organisation dans les systèmes langagiers

Au cours de la dernière décennie, de nombreux auteurs ont tenté d’appliquer les principes de l’auto-organisation à différents sous-domaines de la linguistique. Le mécanisme de la *main invisible* (“*invisible hand*”) de Keller pour les changements linguistiques partage de nombreuses similitudes avec un processus d’auto-organisation :

“The local, individual actions of many speakers, hearers, and acquirers of language across time and space conspire to produce non-local, universal patterns of variation.” [Keller, 1994]

Dans ses études pour rendre compte de l’émergence d’universaux dans les structures segmentales et de traits de la parole, Björn Lindblom est l’un des premiers à avoir importé le concept d’auto-organisation en linguistique [Lindblom et al., 1984] :

“The interaction of microprocesses and subsystems is seen to give rise to patterns at macrolevels that can be highly complex. Accordingly we should not neglect to observe that the ‘structure-causing’ power of local blind processes can be considerable.” (p. 186-187)

Plus généralement, nous pouvons nous appuyer sur notre distinction de trois dimensions pour envisager les phénomènes auto-organisés d’un système langagier.

L’exemple précédent sur l’auto-organisation des systèmes de sons fait partie des phénomènes auto-organisés qui peuvent se manifester au niveau de la dimension structurelle du langage. La phonétique est de loin la branche linguistique qui a été la plus réceptive au concept d’auto-organisation, et celui-ci est très peu représenté en syntaxe, en morphologie. . . Les phénomènes auto-organisés sont probablement difficiles à identifier, peut-être à cause du fait qu’ils sont loin d’être aussi spectaculaires et frappants que leurs pendants éthologiques (colonies de fourmis, termitières. . .).

La dimension naturelle du langage peut exercer une influence sur la façon dont les structures linguistiques s’auto-organisent. L’acquisition est en particulier une période où les informations de l’environnement linguistique sont perçues et éventuellement intégrées par l’enfant selon un mode qui peut être auto-organisé. Le développement de la catégorisation perceptuelle peut en particulier être défini comme un processus auto-organisé où les différents sons de la langue sont progressivement acquis et réorganisés afin de conduire à l’émergence de catégories. Des modèles dynamiques de l’émergence de ces catégories sont proposés depuis quelques années, et reposent sur les conséquences de l’entraînement de cartes neurales auto-organisées [Guenther and Gjaja, 1996].

D’une façon générale, l’utilisation de cartes neurales auto-organisées comme les cartes de Kohonen [Kohonen, 1990] pour l’apprentissage d’items et de structures linguistiques met l’accent sur le caractère auto-organisé de cet apprentissage. L’utilisation de cartes qui encodent les structures de fréquences de co-occurrences de mots pour définir partiellement leur sémantique est un exemple particulier [Li, 1999], mais les preuves manquent pour déterminer si de tels modes d’apprentissage sont réellement à l’œuvre au niveau de l’appareil cognitif humain. Ceci est peut-être moins vrai au niveau des sons, avec la découverte de mécanismes neuronaux proches des mécanismes abstraits employés dans les simulations informatiques à base de réseaux auto-organisés (voir [Oudeyer, 2001a] pour une définition de la notion de *population vector*, en lien avec les travaux de Georgopoulos, et [Kuhl et al., 1992] pour le concept psychologique de

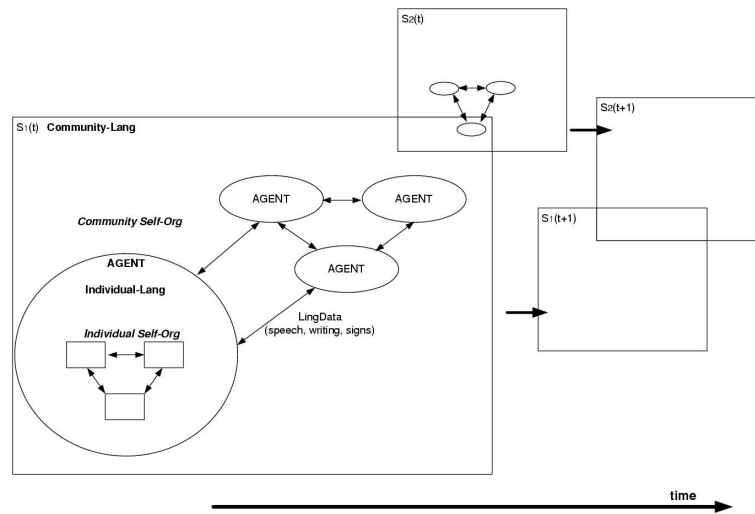


FIG. 2.2 – Différents niveaux d’auto-organisation dans les systèmes langagiers

perceptual magnet effect).

Les phénomènes auto-organisés sont beaucoup plus manifestes au niveau de la dimension distribuée du langage. Le langage externe ou communal résulte des nombreuses interactions entre individus, et des phénomènes auto-organisés conduisent à l’émergence de conventions à un niveau macro-structurel. Martin Ehala évoque cette possibilité pour l’émergence de la grammaire :

“Thus, if people start to use a language, however simple, their communication initiates the process of self-organisation, which, due to grammaticalisation, discourse organising strategies and perhaps other processes governing communication, starts to create more complex grammatical structures.” [Ehala, 1996] (p. 6)

Toujours dans un contexte d’émergence, de très nombreuses simulations informatiques, que nous décrirons plus en détail au chapitre 3, ont mis l’accent sur ce caractère auto-organisé pour l’émergence du lexique, des systèmes de sons, ou encore des structures syntaxiques.

Pour conclure, le schéma de la figure 2.2, élaboré avec Jinyun Ke (*Language Engineering Laboratory, City University of Hong Kong*), tente de récapituler les composants linguistiques systémiques et leur interactions auto-organisées, que ce soit au niveau de la communauté linguistique ou des individus eux-mêmes. Les différents systèmes $S_i(t)$ représentent différents systèmes langagiers communaux (ou langues) à un temps t , en s’appuyant sur la définition souple de ces derniers donnée précédemment. Deux systèmes communaux peuvent interagir par le biais de contacts linguistiques ou de locuteurs bilingues.

Auto-organisation et évolution

L’auto-organisation représente un moyen très puissant pour engendrer des structures complexes à partir d’éléments simples. Un “réglage” particulier des interactions locales entre les composants de base peut conduire par la répétition des interactions et l’influence de l’environ-

nement à des schémas très complexes et des structures très robustes : le caractère distribué des qualités fonctionnelles de la structure est en effet le plus souvent résistant à la défection d’une partie des individus.

Il est fort probable que la sélection naturelle ait favorisé l’émergence dans les systèmes biologiques de nombreuses structures auto-organisées, pour leur robustesse et leur faible “coût de développement”. En effet, elles ne nécessitent pas d’investissement important en termes de mécanismes biologiques, comparativement à d’autres possibilités qui conduiraient au même résultat : par exemple, l’appareil cognitif d’une fourmi est bien plus “simple” qu’un système qui générerait de façon centralisée le fonctionnement d’une colonie entière de plusieurs millions d’individus.

Il est tentant ici de faire le parallèle avec l’émergence du langage, et de se demander si les nombreux sous-systèmes auto-organisés qui composent le système langagier ont pu être sélectionnés génétiquement ou culturellement pour leur caractère auto-organisé. Des mécanismes cognitifs auto-organisés nécessitent un investissement cognitif moindre que des mécanismes de plus haut niveau, de la même façon que pour les mécanismes comportementaux des insectes eusociaux précédents. La question nous semble se poser en particulier au niveau du système phonologique, où l’on peut questionner la pertinence de la définition linguistique des phonèmes au niveau cognitif. Les récents modèles informatiques semblent en effet promouvoir l’idée qu’un processus auto-organisé basé sur des caractéristiques dynamiques des réseaux neuronaux puisse jouer le même rôle [Oudeyer, 2002].

2.2.3 Espaces des possibles

Définition

Les changements n’apparaissent pas *ex nihilo* dans un système complexe dynamique. Puisque ces changements expriment la modification d’un paramètre ou d’une propriété du système, il doit exister d’emblée pour le système un ensemble d’états admissibles que celui-ci peut prendre au cours du temps. Dit autrement et de façon plus triviale, si un système complexe n’admet aucune modification de ses composants, alors il ne peut évoluer. Nous dénommons par **espace des possibles** l’ensemble des états qu’un système peut potentiellement adopter. La question de savoir si ces états sont accessibles au cours d’une évolution particulière est une question que nous n’aborderons pas encore ici.

Dans les théories de l’évolution, trois espaces des possibles peuvent être distingués. Le premier est le génotype d’un individu particulier, composé d’un grand nombre de gènes différents²². Les composants de ces gènes, les quatre briques de base de l’ADN, définissent un ensemble de génomes possibles. Cet ensemble est immense, même si seule une partie très réduite de l’ensemble des génomes possibles conduit à des organismes viables.

Un second espace des possibles est défini par l’ensemble des différences qui peuvent exister entre les individus d’une espèce. Cette variabilité est rendue possible par l’indépendance des génomes des individus. La distinction avec le premier espace est illustrée par la figure 2.3 : si chaque individu possède un génome de 5 éléments, chacun pouvant contenir une des quatre bases de l’ADN, l’espace des possibles “génomiques” sera composé de 5^4 génomes différents pour

²²La définition du gène et le nombre de gènes qui composent le génome humain sont encore sujets à discussion aujourd’hui [Chevassus-au Louis, 2001]

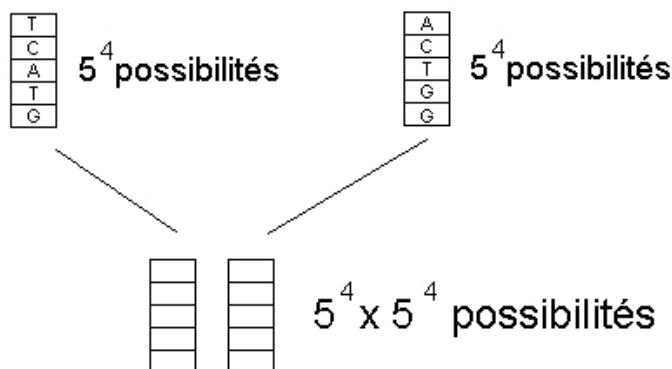


FIG. 2.3 – Espaces des possibles génomiques

un individu. Si l'on considère deux individus, le nombre de génomes qui composent l'espace des possibles pour l'ensemble de ces individus est le produit du nombre de génomes possibles pour un seul individu (puisque pour chaque génome de l'espace des possibles pour un individu, il existe 5^4 possibilités pour le second). Cet espace des possibles engendré par une population d'organismes est important, puisque les contraintes qui pèsent sur lui, sur sa taille etc., vont déterminer la façon dont l'espèce va pouvoir évoluer par croisement de certains individus de la population avec d'autres.

Enfin, un troisième espace des possibles naît de la reproduction sexuée de certaines espèces. La recombinaison du patrimoine génétique des deux parents, par les multiples possibilités qu'elle offre pour composer le génotype de l'enfant, crée un large espace des possibles pour ce dernier, même si une large partie du matériel génétique est toujours identique chez les deux parents. Si un des parents possède par exemple les caractéristiques a_1 et b_1 pour les traits A et B, alors que le second parent possède lui les caractéristiques a_2 et b_2 , alors l'enfant aura sous certaines conditions accès à un espace des possibles formé des quatre combinaisons (a_1, b_1) , (a_2, b_2) , (a_1, b_2) et (a_2, b_1) . Cet espace est une sous partie du croisement des espaces des possibles des deux parents (puisque toutes les combinaisons ne sont pas permises).

La situation linguistique est ici encore très proche de la situation biologique. Trois espaces des possibles pratiquement isomorphes aux précédents peuvent être mis à jour.

Tout d'abord, la structure interne du langage, comme celle du génome, offre un large choix de structures possibles, qui sont dans leur nature beaucoup plus riches que les changements génomiques :

- le très large répertoire de segments, consonantiques ou vocaliques, qui peuvent être mis à profit pour composer l'inventaire phonologique d'une langue ;
- la possibilité de créer si ce n'est une infinité théorique de mots (si l'on admet une absence de longueur maximale pour les mots), tout au moins un nombre très important ;
- les nombreuses structures syntaxiques et plus largement typologiques qui permettent aux locuteurs d'échanger leurs représentations cognitives du monde.

Certains ajouteront ici que le niveau génétique fait également partie de cet espace des possibles d'un locuteur, puisque des mutations pourraient influencer les gènes du langage que nous

avons décrits dans le premier chapitre, et plus généralement aussi la physiologie de l’individu.

L’individualité des langages des locuteurs d’une communauté définit un second espace des possibles. L’ensemble des états possibles pour une communauté linguistique est ainsi défini comme le produit des espaces des états possibles de chaque membre. Nous insistons sur le fait que dans notre cadre théorique, un simple changement chez un individu entraîne un changement d’état de la communauté prise dans son ensemble. Ceci est nécessaire de façon théorique à l’existence de changements communaux, selon des décours particuliers que nous examinerons par la suite.

Là où l’individualité au niveau de l’espèce reposait sur leur génome particulier, l’individualité au niveau linguistique repose sur la dimension externe du langage. Chaque individu est en effet le produit de sa physiologie et de ses capacités cognitives, de son apprentissage et d’une trajectoire sociale particulière, qui le rendent différent des autres individus : spécificité du tractus vocal, du contrôle de la respiration, des organes de perception, de capacités cognitives comme la mémoire de travail. . .

Il est intéressant de constater ici que les comportements des individus biologiques ne rentrent pas dans l’espace des possibles génétiques de la théorie Darwinienne : en effet, il n’existe pas de feedback du comportement d’un animal sur ces gènes au cours de son existence (on parle parfois de “transcription inverse”). Tel ou tel comportement ne contribuent pas à créer des états génétiques différents, comme l’avait en son temps supposé Lamarck. Au contraire, les comportements d’un locuteur influe sur son idiolecte au cours de sa vie, et son dès lors partiellement responsable des évolutions linguistiques.

Enfin, un troisième espace des possibles peut être défini de façon analogue à celui de la reproduction sexuée : il concerne la façon dont l’enfant va échantillonner le système linguistique communal qui l’environne pour bâtir son propre système linguistique. Un espace de choix possibles pour les éléments linguistiques est créé par le mécanisme d’acquisition. Cet espace est constitué d’un sous ensemble du croisement des espaces des états possibles des différents locuteurs qui vont participer à l’apprentissage de l’enfant. Cette vision assez théorique du sujet nous paraît proche de la notion de features pool de Mufwene, puisque l’enfant va pouvoir piocher (mais de façon contrainte) dans les items des différents locuteurs pour construire son langage. Plus ses locuteurs seront caractérisés par des idiolectes différents (comme dans le cas d’un contact linguistique), plus l’espace des possibles sera vaste.

Organisation de l’espace des possibles

Un point très important pour toute la suite (et en particulier pour le chapitre 4) est que l’espace des possibles linguistiques peut présenter différentes caractéristiques qui vont jouer un rôle dans les changements que nous décrirons dans la troisième section de ce chapitre.

Tout d’abord, les états de l’espace des possibles peut être être composé d’éléments continus ou discrets. Dans le cas du génome, les quatre “briques” de base de l’ADN contribuent à définir un espace des possibles discret au sens mathématique du terme. Dans le cas du langage, la situation est plus complexe, puisqu’une majeure partie des structures du langage varie selon un mode discret, mais avec un nombre de possibilités variables (l’ordre des mots, les structures syntaxiques d’une façon générale. . .), et qu’en outre certains items varient de façon continu (le degré d’aperture ou d’antéro-postériorité des voyelles par exemple).

De plus, dans le cas du langage, les éléments qui composent l’espace des possibles sont

organisés selon une hiérarchie complexe.

Une distinction classique en linguistique est celle opérée entre dimensions syntagmatique et paradigmatique du langage. Les formes du langage sont reliées entre elles selon deux axes : l'un est un axe de sélection où l'on opère des permutations entre les formes, et l'autre un axe de combinaisons où l'on opère des permutations. Sur ce dernier axe baptisé axe syntagmatique, les formes sont mises en contexte (par exemple celui de la phrase, où composantes sémantique, phonologique, morphologique, syntaxique, et pragmatique sont combinées) et associées selon des dépendances syntagmatiques. Le premier axe précédent, dit axe paradigmatique, exprime la possibilité de remplacer une forme par une autre le long d'un axe syntagmatique. Cette opposition et distinction entre plusieurs formes s'exprime par exemple au niveau des sons (avec les paires minimales), des mots ou de la phrase.

Nous pouvons reprendre et étendre légèrement ces définitions de la façon suivante : pour chaque structure, un certain nombre d'items doivent être associés pour garantir la cohérence et les attributs de cette structure, mais une certaine liberté peut exister au niveau du choix de ces items qui préserve la structure. Par exemple, une carrosserie, un moteur etc. doivent être assemblés pour composer une voiture. Cependant, différentes carrosseries ou différents moteurs peuvent être utilisés sans que le résultat final soit modifiée, c'est à dire en préservant la structure de voiture. Dès lors, on peut envisager pour chaque structure un axe syntagmatique et une axe paradigmatique pour les différents éléments associés.

Le langage en tant que système complexe constitue une première macro-structure avec un axe syntagmatique que nous avons déjà détaillé plus haut. Les axes paradigmatiques des différentes composantes phonologiques, morphologiques etc., admettent un ensemble de structures qui se décomposent à nouveau en sous-structures. . . Nous aboutissons donc à une hiérarchie complexe et de grande profondeur, qui mène des composants les plus élémentaires, les sons, aux éléments les plus complexes que sont les énoncés linguistiques.

L'espace des états possibles d'un idiolecte est donc constitué des croisements de toutes les possibilités sur les axes paradigmatiques de l'ensemble des structures enchassées dans la macro-structure linguistique.

2.2.4 Forces et contraintes internes et externes

De multiples contraintes pèsent sur le système langagier. Une partie de ces contraintes sont internes au système, quand d'autres sont externes. Toutes contribuent à "former" ou "déformer" les nombreuses structures du langage, et viennent favoriser ou au contraire inhiber certaines possibilités de changement du système.

Quelques exemples de contraintes et de forces internes au système

De multiples forces viennent modeler les structures du langage et leurs items. Les composantes naturelle et distribuée du langage, qui concernent son existence concrète dans le monde et chez les locuteurs, pèsent toutes deux sur les structures de la dimension structurelle.

Au niveau de la dimension naturelle du langage, les contraintes cognitives et physiologiques ont une grande influence sur de multiples sous-systèmes.

Les contraintes physiologiques du tractus vocal et de l'oreille influencent les systèmes de sons dont les éléments peuvent être prononcés et perçus plus ou moins facilement. Les contraintes de perception tendent par exemple à imposer une distance minimale entre les différentes voyelles

de l'espace vocalique, ce que traduit la notion de *contraste perceptif suffisant* introduite par Lindblom [Vallée, 1994] (p. 28-29). Sans que des raisons claires aient été déterminées pour ce phénomène, nous pouvons citer en exemple la rareté du segment [y] dans les langues du monde : ceci peut être dû à une difficulté de perception comme à une difficulté d'associer les deux caractéristiques d'arrondissement des lèvres et d'antériorité. Autre exemple cette fois mieux compris : dans les systèmes vocaliques asymétriques, les voyelles antérieures sont favorisées par rapport aux voyelles postérieures. Ceci s'explique par un meilleur contrôle de l'avant de la bouche et de l'apex de la langue.

Nous pouvons citer d'autres contraintes au niveau consonnantique grâce à l'exemple suivant : parmi les occlusives voisées d'une langue, la première à disparaître (si elle est présente) est l'occlusive vélaire voisée [g]. Les deux traits de voisement et de vélarité s'accordent plutôt mal dans le cas des occlusives, et il arrive que soit [g] se transforme en [k] (où le voisement est éliminé), soit que l'occlusion soit relâchée pour conduire à une fricative voisée comme [X]. Ohala cite une troisième possibilité, qui repose sur la transformation du [g] avec l'ajout de la caractéristique implosive, comme en Sindhi à parti du Prakrit [Ohala, 1996]. L'explication avancée pour ces changements est la suivante : pour que le voisement puisse se produire, il faut que la pression supra-glottique soit supérieure à la pression orale. A chaque vibration, la pression orale augmente, jusqu'à équilibrer la pression supra-glottique ; le voisement prend alors fin. Si l'on compare les différentes occlusives voisées, la vélaire est celle qui correspond à la plus petite cavité supra-glottique. C'est donc dans ce cas que l'équilibrage des pressions sera le plus rapide, et que le voisement s'arrêtera le plus rapidement. La consonne voisée vélaire est ainsi la plus fragile des consonnes voisées, car elle est difficile à maintenir en production. Notons que l'ajout d'une caractéristique implosive, qui entraîne une augmentation du volume de la cavité supra-glottique, permet de retarder l'équilibrage des pressions.

Les contraintes cognitives pèsent sur les structures syntaxiques qui peuvent être plus ou moins aisées à traiter cognitivement, à la fois à l'encodage et au décodage. Elles jouent ainsi en particulier un rôle sur les formes des morphèmes d'un ensemble donné, qui seront acquis plus facilement s'ils suivent certaines règles générales de formation comme des règles morphologiques... Le grand nombre de verbes en anglais qui prennent le morphème -ed pour se transformer en participe passé souligne l'existence d'une règle générale qui facilite la maîtrise et en particulier la mémorisation des participes passés, même si de nombreux verbes irréguliers existent.

Nous pouvons citer ici plus en détail l'exemple des quatre types de relatives en français :

1. relative sujet en périphérie de phrase : “Je regarde l'homme qui fume la pipe.”;
2. relative objet en périphérie de phrase : “Je vois l'homme que tu as rencontré.”;
3. relative sujet enchâssée au centre : “L'homme qui fume la pipe regarde par la fenêtre.”;
4. relative objet enchâssée au centre : “L'homme que je vois fume la pipe.”.

Différentes expériences de psycholinguistique ont été menées pour mesurer la complexité de ces quatre relatives à l'aide de mesures de temps de réaction en compréhension. [Gouvea, 2000] recense différentes expériences, qui ont mis en valeur la plus grande difficulté de traitement des relatives objets par rapport aux relatives sujets, et des relatives enchâssées par rapport aux relatives périphériques (p. 5 ; p. 7 ; p. 10). Afin d'expliquer ces différences, plusieurs auteurs

recourent à la notion de mémoire de travail pour expliquer les temps de traitement plus ou moins longs. Parmi les différents modèles théoriques proposés, celui de Gibson est le plus en accord avec les données expérimentales de Gouvea. Baptisé "Syntactic Prediction Locality Theory", il s'articule selon deux coûts cognitifs principaux : le coût d'intégration d'une part, et le coût de stockage de prédictions syntaxiques d'autre part [Gibson, 1998]. Le terme de localité traduit les faits suivants : 1) plus une prédiction doit être longtemps conservée en mémoire, plus son coût de traitement sera important et 2) plus la distance entre un mot et la tête syntaxique locale à laquelle il se rattache est importante, plus le coût d'intégration de ce mot sera important.

Cet exemple permet de mieux comprendre comment une capacité cognitive comme la mémoire de travail peut faire pression sur le système linguistique : des structures syntaxiques qui demandent la mémorisation d'un nombre important de composants ou qui définissent des relations complexes entre ceux-ci seront défavorisées. On peut ainsi constater que le nombre de relatives qui peuvent coexister dans une phrase et être aisément comprises par un locuteur est limité : "*Le lapin que le chien que l'homme qui fume la pipe avait aperçu poursuit a de longues oreilles blanches.*" est une phrase difficile à décoder rapidement.

Un principe général d'économie cognitive peut ainsi être formulé, qui va dans le sens d'une économie des ressources cognitives (mnésiques, de traitement en temps réel...). Les redondances dans le système linguistique sont évitées de façon générale, et un choix est effectué parmi les différentes possibilités d'exprimer tel ou tel caractère d'une représentation sémantique. Nous pouvons citer plusieurs exemples :

- les langues utilisent le plus souvent soit l'ordre des mots dans la phrase pour identifier les différents composants phrastiques (sujet, verbe, objet...), soit des marqueurs morphologiques (déclinaisons en latin, particules en japonais...);
- certaines langues comme le chinois présentent une morphologie riche (nombreux morphèmes spécifiques pour exprimer les différentes caractéristiques sémantiques), quand d'autres comme le français ou l'anglais sont bâties sur de nombreuses lois morpho-syntaxiques qui modifient de façon régulière des morphèmes en nombre plus limité : marquage du pluriel, des temps...;
- si l'on suit la théorie du liage, la théorie X-barre (voir chapitre 1) peut correspondre à une économie cognitive qui consiste à appliquer la même loi de structuration à toutes les phrases (NP, VP, AP...) qui composent les énoncés linguistiques.

L'efficacité de la communication est bien sûr un élément très contraignant pour les structures linguistiques, puisque l'un des buts premiers du langage est la communication d'informations entre deux individus. Elle rejoint les contraintes physiologiques et cognitives précédentes. Les mots fréquemment utilisés, comme les marqueurs syntaxiques, auront avantage à être courts pour accélérer la transmission d'information. Si l'on prend l'exemple des pronoms personnels en anglais et en français, tous sont monosyllabiques. Le raccourcissement des items grammaticaux lors des phénomènes de grammaticalisation est ainsi très bien attesté.

L'acquisition du langage par les enfants vient exercer une forte contrainte sur les structures linguistiques, en privilégiant celles qui sont les plus faciles à apprendre. Ceci renvoie à la notion de répliqueurs, comme elle a été développée par Simon Kirby [Kirby, 2000] (p. 15-16) : chaque élément linguistique se réplique plus ou moins facilement d'un individu à un autre, en particulier au cours de l'acquisition, mais aussi au cours des interactions en dehors de cette phase spécifique.

Plus la réplication est aisée, plus l'élément a de chances de persister dans le système linguistique. Une pression existe donc en faveur des meilleurs répliqueurs.

Toutes les forces ne s'exercent pas dans les mêmes directions, et de nombreuses oppositions se manifestent à différents niveaux : une plus grande facilité de perception va ainsi parfois à l'encontre de la facilité de production. Il est intéressant de mentionner ici la théorie quantique de Stevens, qui rend compte des voyelles des langues du monde et de leurs traits sur la base de non-linéarités dans le passage de l'articulatoire à l'acoustique, et dans celui de l'acoustique à l'auditif. Nathalie Vallée rapporte comment des régions de l'espace articulatoire jouent le rôle de plateaux “acoustiquement stables”, où de faibles variations articulatoires n'entraînent que des variations minimales au niveau acoustique. Ces régions s'opposent à des régions de transitions, où de faibles changements articulatoires vont au contraire conduire à de fortes variations acoustiques (transitions de nature *quantique*, abrupte). En envisageant ce type de linéarité également au niveau perceptif, Stevens postule que les sons des langues du monde sont en fait définis par les régions de stabilité des deux espaces de production et de perception. Vallée cite Stevens :

“We suggest that this tendency for quantal relations between articulatory and acoustic parameters or between acoustic and auditory parameters is a principal factor shaping the inventory of articulatory states or gestures and their acoustic consequences that are used to signal distinctions in language. The articulatory and acoustic attributes that occur within the plateau-like regions of the relations are, in effect, the correlates of the distinctive features.” [Vallée, 1994] (p. 18-23).

Ainsi, si les contraintes en production et en perception peuvent s'opposer, il est possible de détecter des plages où la réponse à des contraintes en partie opposées est plus satisfaisante : les régions de stabilité mises en évidence par Stevens entrent partiellement dans la composition de ces réponses au niveau de la production, de la perception et des performances de la communication.

Le même type d'opposition peut se manifester de façon générale lors des processus d'encodage et de décodage des énoncés linguistiques : une plus grande facilité à l'encodage linguistique et une utilisation plus marquée du contexte pragmatique entraînera une plus grande difficulté pour décoder le message et l'existence d'ambiguïtés. L'utilisation de pronoms dans une suite d'énoncé où une même personne ou un même objet sont mentionnés plusieurs fois de suite répond à une contrainte d'optimisation de la communication. Néanmoins, l'élément auquel le pronom réfère est parfois répété afin de satisfaire des contraintes cognitives et faciliter un décodage linguistique rendu autrement difficile par le lien de plus en plus distendu à opérer entre pronom et objet référé.

La situation linguistique est ici bien plus complexe que celle des systèmes génétiques des espèces. Les gènes ne changent pas en effet selon leurs relations ou leurs interactions, ni à cause des interactions des porteurs dans la communauté. Il faut toutefois nuancer ce fait par les possibilités de recombinaison ou par le caractère extrêmement non-linéaire du passage du génotype au phénotype, et le développement aux stades embryonnaire et postérieurs vient peser sur l'expression des gènes au niveau phénotypique. La nécessité de stimulations externes pour la mise en place de certaines régions corticales est importante, comme c'est le cas par exemple pour les aires visuelles ou auditives [Sur and Leamey, 2001].

De plus, la complexité des mécanismes linguistiques est qualitativement différente de celle des mécanismes à l'œuvre au niveau génétique ou dans les colonies d'insectes sociaux : là où il

n'existe pas de mécanismes de feedback du tout vers les parties dans les deux derniers cas (les comportements des insectes sont innés, et le Lamarckisme n'est pas une théorie valide de l'évolution), la dimension linguistique distribuée met en interaction l'ensemble des systèmes individuels, et les contraintes chez un individu peuvent théoriquement avoir des conséquences chez tous les autres. La variabilité physiologique et cognitive entre les locuteurs créent des dissimilarités dont les structures linguistiques "doivent tenir compte". Le *motherese*, langue adoptée par la mère pour parler à son jeune enfant et caractérisée par des intonations et des articulations exagérées, de nombreuses répétitions et des formes grammaticales simples, est un exemple d'adaptation aux capacités linguistiques et cognitives encore limitées du jeune enfant. [De Boer and Kuhl, 2002].

Contraintes externes : le poids des aspects sociaux

Certaines forces extérieures au système (langagier ou autre) peuvent avoir une influence sur son évolution et sa structuration tout comme les forces internes précédentes.

Le point n'est cependant pas si trivial. Il est couramment admis en biologie que les espèces évoluent sous certaines contraintes de leur environnement auxquelles elles tentent de s'adapter. Humberto Maturana est revenu sur cet aspect dans sa théorie de *dérive génétique*, en affirmant que seules les contraintes qui sont permises par la structure des organismes peuvent influencer son évolution :

"D'un point de vue biologique, les êtres vivants sont des système structurellement déterminés. Par conséquence, tout ce qui leur arrive, à chaque instant, leur arrive comme part de leur dynamique structurale en cet instant, et est déterminé en elle. Cela implique que les changements structuraux que subit un être vivant par suite de ses interactions avec le milieu dans lequel il se trouve, ne sont pas déterminés par les agents externes que l'observateur voit influencer sur lui, ni ne dépendent de leur nature, mais se trouvent déterminés dans la dynamique structurale propre de l'être vivant." [Maturana and Mpodozis, 1999] (p. 14)

Les facteurs externes sont ici en quelque sorte limités par la structure interne du système.

L'élément externe de loin le plus important en ce qui concerne les évolutions du système langagier concerne les nombreux facteurs sociaux qui règlent les interactions entre individus à un niveau extra-linguistique (dans le sens où si le langage est souvent au cœur des échanges en tant que vecteur de communication, les interactions sociales entre les individus sont au moins partiellement indépendantes de sa forme).

Sociolinguistics is a term including the aspects of linguistics applied toward the connections between language and society, and the way we use it in different social situations.

La sociolinguistique se penche sur les connexions entre le langage et les phénomènes sociaux, et en particulier comment le premier varie en fonction de différents contextes sociaux. Un des courants de cette discipline est représenté entre autres par William Labov, en particulier pour ses études comme celle menée à la fin des années 1960 sur l'île de Martha's Vineyard [Labov, 1972]. Elle s'est en cela très clairement démarquée du courant générativiste qui ne s'intéresse pas aux variations inter-individuelles et à leurs causes.

L'idée principale que nous pouvons retenir ici est que le langage joue un rôle important dans l'affirmation du statut social de l'individu. Ceci peut se faire de façon consciente (par exemple, choix de nouveaux mots, par exemple pour éviter les tabous linguistiques [Comrie, 2000], choix de structures syntaxiques...) mais aussi et le plus souvent de façon inconsciente, comme le montre l'étude de Labov sur l'île de Martha's Vineyard, rapportée par exemple par Trask [Trask, 1980] (p. 275). L'environnement social dans lequel va se trouver un individu et la façon dont ce dernier

va se comporter vis à vis du premier vont donc exercer des contraintes sur le système langagier.

Il nous semble pertinent d’envisager les éléments sociaux précédents dans le cadre des considérations de Maturana citées plus haut. Si l’on reformule la thèse de cet auteur sur les espèces pour tenter de l’appliquer au langage, on pourra se demander si les forces sociolinguistiques peuvent réellement modifier de façon intrinsèque les structures de la dimension interne du langage, ou si elles ne servent que de déclencheurs à des changements qui sont spécifiés par les structures elles-mêmes.

Quelques problèmes relatifs aux contraintes

Le paradoxe Saussurien. En développant son approche structuraliste des systèmes linguistiques, Ferdinand de Saussure rencontra une incohérence profonde quant aux possibilités d’évolution d’un système structuré. Trask résume la situation par les mots suivants :

“If a language is primarily an orderly system of relations, how is it that a language can change without disrupting that system? To put it in another way, how can a language continue to be used effectively as a vehicle for expression and communication while it is in the middle of a change, or rather in the middle of a large number of changes?” [Trask, 1980] (p. 267)

Si la structuration du système langagier impose des contraintes fortes sur les formes utilisées, il est difficile d’envisager tout changement, car toute variation ou fluctuation vient briser la cohérence de l’assemblage structurel des éléments, gêne la communication et devrait donc être réprimée en conséquence.

Le problème de la norme communautaire. Le paradoxe Saussurien qui existe au niveau de la dimension structurelle du langage se transpose au niveau de la dimension distribuée, ce qui souligne le parallèle entre ces deux composantes du “système langage”. En effet, si une norme est établie au niveau d’une population, tout individu qui se démarque de cette norme communautaire voit sa communication devenir moins performante, et le changement a peu de chances de pouvoir subsister. Le problème est encore plus crucial au niveau de l’apprentissage, comme le souligne Daniel Nettle [Nettle, 1999b] (p. 21-23) : les enfants qui acquièrent le langage échantillonnent les productions de nombreux individus, et pas seulement de leurs parents (Mufwene parle de transmission polyplœidique [Mufwene, 2001](p. 18)). Si leur apprentissage tend vers une représentation moyenne de tous ces inputs linguistiques, les variations par rapport à la moyenne auront tendance à disparaître avec le processus d’apprentissage. Dès lors, un changement chez un individu, qui le démarque de la norme, ne sera pas retenu par la génération future de la communauté. Nettle cite ici Sapir (Language, 1921, p. 149-50) :

“If all the individual variations within a dialect are being constantly levelled out to the dialect norm... why should we have dialect differences at all?” (p. 21)

La comparaison avec les systèmes biologiques permet de constater ici les premières différences entre systèmes linguistiques et systèmes génétiques. En effet, le caractère purement aléatoire des mutations et le plus faible nombre de contraintes fortes de la structure génomique sur les mutations des bases d’ADN rend pratiquement inexistant le paradoxe Saussurien au niveau génétique (hormis le cas où une mutation rend l’individu non viable). En ce qui concerne la transmission

d'un individu à un autre, le problème de la norme au niveau de la communauté est également partiellement contourné par la transmission beaucoup plus directe des gènes d'une génération à une autre : dans le cas d'une reproduction sexuée, si un individu possède un gène différent de celui des autres, celui-ci aura 50% de chances d'être transmis à chacun de ses descendants (sans compter les cas particuliers de l'ADN mitochondrial et du chromosome Y). Une diffusion de la mutation dans la population est donc beaucoup plus aisée. De façon analogue aux biais fonctionnels linguistiques, une mutation peut être avantageuse, désavantageuse ou neutre vis à vis du succès reproductif des individus. Une mutation avantageuse aura davantage de chance de se propager dans la population grâce au plus grand succès reproductif de ses porteurs, et inversement pour les mutations désavantageuses. Les mutations qui n'influencent pas le succès reproductif renvoient aux théories d'évolution par mutations neutres et isolation géographique [Kimura, 1983]. Elles peuvent ou non subsister dans la population de façon plus ou moins aléatoire (selon les événements contingents qui surgissent dans la communauté), et à cause de la répartition géographique des individus.

Eléments de résolution des problèmes précédents La résolution des problèmes précédents passe d'abord par la faiblesse des contraintes intra-systémiques structurales et l'existence de différentes possibilités linguistiques pour l'expression d'une même représentation sémantique.

Tout d'abord, un changement peut effectivement déstabiliser une structure, mais ce déséquilibre n'est pas toujours assez important pour être éliminé d'emblée, et en outre des forces externes peuvent contrebalancer les contraintes structurelles, et promouvoir un changement. Ceci revient à dire que les contraintes structurelles ont un impact restreint sur les évolutions linguistiques. En outre, si certains changements peuvent déstabiliser la structure, il n'est pas interdit de supposer que d'autres puissent au contraire la renforcer, en la rendant plus *cohérente* (la cohérence peut être définie comme la réponse des composants de la structure aux contraintes cognitives, physiologiques et communicationnelles). Bien sûr, encore une fois, ces possibilités ne sont envisageables que si la structure n'est pas totalement fixe et rigide.

Le deuxième point concerne la robustesse de l'inter-compréhension entre deux individus face à un changement. Lors d'une interaction entre des individus, la structuration des éléments de la phrase, les mécanismes cognitifs top-down qui corrigent la perception, l'existence d'un contexte pragmatique etc., offrent un grand nombre d'informations qui rendent l'interaction robuste à des différences mineures entre les deux systèmes linguistiques des individus. Dès lors, un écart peut exister dans le code d'un individu sans gêner les interactions avec d'autres locuteurs.

Le paradoxe Saussurien sous sa forme la plus rigide ne semble pas très convaincant eu égard aux changements qui se produisent effectivement sans cesse dans toute communauté linguistique. Par contre, les structures de la dimension structurelle du langage jouent vraisemblablement un rôle dans les évolutions possibles du système (voir chapitre 6).

Le problème de la norme peut également être partiellement résolu à l'aide des processus de correction et de l'impact limité d'un changement que nous venons d'évoquer. Ceci est toutefois plausible hors de la phase d'acquisition, mis plus difficile à appliquer à cette dernière.

Etats "énergétiques" d'un système linguistique

L'ensemble des états possibles pour le langage en tant que système est virtuellement infini. Toutefois, tous les états possibles ne sont pas équivalents en terme de réponses aux contraintes

qui pèsent sur eux.

Considérons l'exemple du système des sons de la langue : notre intuition est que les contraintes physiologiques définissent des sons plus ou moins difficiles à prononcer. Parallèlement à cette contrainte qui tend à favoriser les sons les plus aisés à prononcer, la perception impose également ses contraintes en faveur de sons dont les contrastes sont facilement perceptibles. Il faut enfin prendre en compte le fait qu'un nombre minimal de sons est nécessaire si l'on veut parvenir à exprimer de façon efficace un ensemble de représentations sémantiques à propos de l'environnement (au sens large) : moins il existe de sons différents utilisés par la langue, plus leurs combinaisons et la longueur des mots doivent être importantes.

Si l'on envisage les différentes configurations possibles, il est envisageable, au moins de façon théorique, de définir la pertinence ou la cohérence de chaque configuration par rapport aux contraintes précédentes. Il est ainsi possible, toujours théoriquement, de définir une grandeur numérique, appelons la **énergie**, qui caractérise cette adéquation ou cohérence d'un état vis à vis du jeu de contraintes.

Une structure optimale correspond à l'état d'énergie minimale de l'espace des possibles. Dans cette situation, toute modification d'un composant de la structure conduit alors nécessairement à une moins grande cohérence de celle-ci.

La proposition précédente peut en fait se généraliser de façon significative. En effet, il apparaît que si la cohérence des états possibles, c'est à dire la cohérence des différentes combinaisons possibles d'items linguistiques, se définit vis à vis des contraintes qui pèsent sur le système, alors celles-ci sont (au moins partiellement) définitoires des structures linguistiques. En effet, comme nous l'avons déjà souligné lors de la définition du concept de structure, la définition d'une telle entité repose toujours sur des éléments extérieurs qui viennent définir les attributs pertinents propres à caractériser et donc définir cette construction théorique. Pour les structures linguistiques, les contraintes exercées sur le système sont selon nous les outils adéquats. Ainsi, ce que nous pourrions appeler des contraintes systémiques ou structurelles, sont avant tout des contraintes naturelles ou distribuées qui pèsent sur les interactions d'items.

Cette proposition peut paraître curieuse. Néanmoins, si l'on considère par exemple la structure des systèmes phonologiques, on pourra remarquer que différentes théories explicatives comme la phonologie articulatoire de Browman et Goldstein basent leurs arguments sur des caractéristiques physiques ou physiologiques de l'être humain [Browman and Goldstein, 1989]. De la même façon, la construction de la notion de phonème par le biais d'oppositions deux à deux repose le plus souvent sur des notions de traits, qui correspondent eux aussi à des réalités physique d'un appareillage articulatoire qui vient exercer des contraintes sur le langage.

Notons enfin que s'il est possible d'envisager différents types de contraintes pesant sur le système langage (contraintes issues de la dimension naturelle ou distribuée, contraintes sociales), il est corrélativement possible d'envisager différents espaces énergétiques associés, et différentes caractérisations des structures du “système langage”. Ainsi, des structures comme les systèmes phonologiques naîtront plutôt de contraintes naturelles, quand des structures d'un langage communal pourront provenir de contraintes issues de la dimension distribuée du système. Un point intéressant est néanmoins que les êtres humains sont grossièrement tous soumis aux mêmes contraintes des dimensions distribuée et naturelle, alors que les contraintes sociales sont souvent différentes. Dans toute la suite de notre travail, nous concevrons et utiliserons en fait souvent le concept d’“espace énergétique” pour référer à l'espace énergétique particulier des contraintes naturelles et distribuées, et surimposerons les contraintes sociales sur les idiolectes ou langues évoluant dans cet espace partagé par tous les locuteurs (voir chapitre 6). De la même façon, le terme de “contraintes” employé seul référerà aux contraintes naturelles et distribuées.

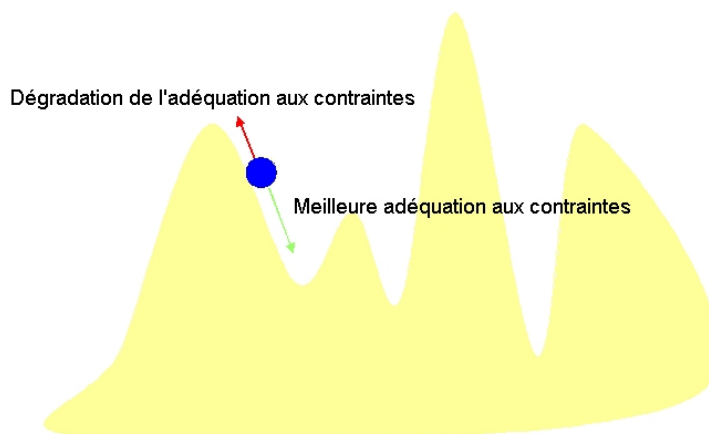


FIG. 2.4 – Evolution d'une masse sous l'action de la gravitation

L'utilisation d'une notion d'énergie permet d'envisager l'évolution de l'état du système dans un **paysage énergétique** (ou **fitness landscape**). Ce paysage énergétique correspond indirectement à l'espace des possibles pour les systèmes linguistiques, en faisant correspondre à chaque état possible son adéquation aux contraintes.

Une analogie très simple mais très efficace est la suivante : considérer une petite bille qui évolue dans un paysage de creux et de bosses. Sous l'action de la gravité, elle tend à se diriger vers les creux (ou puits), car c'est là qu'elle minimise son énergie potentielle de gravitation. Une fois que la bille est tombée dans un creux, il faudra fournir d'autant plus d'énergie pour la faire sortir que celui-ci est profond. Les parois du puits constituent des **barrières énergétiques**, et il faut fournir une énergie suffisante pour pouvoir les franchir (voir la figure 2.4).

Lorsque l'on tente de visualiser la situation, nous imaginons généralement un paysage à deux ou trois dimensions, dont l'une correspond à la valeur de l'énergie (dans la réalité, ceci pourrait correspondre par exemple à un triplet longitude - latitude - altitude). Pour un système plus complexe, le nombre de dimensions est beaucoup plus important, et il est par conséquent très difficile de représenter le paysage énergétique, à moins d'un nombre encore plus important de coupes bi ou tridimensionnelles.

A l'aide de l'analogie avec la gravitation terrestre, on conçoit aisément qu'un paysage énergétique puisse être plus ou moins contrasté, avec des creux profonds et des bosses très hautes, ou au contraire très plat, avec un relief très peu marqué.

Si l'on transpose maintenant ces notions au système linguistique, la question de la topographie du paysage énergétique se pose de la même façon : existe-t-il des minima absolus d'énergie pour certains sous-systèmes, ou existe-t-il au contraire une multitude de minima locaux ? Le relief est-il fortement ou peu marqué ? . . .

Propositions sur la topographie de l'espace énergétique du "système langage"

Il est bien sûr très difficile de répondre aux questions précédentes, puisque la définition d'une quantité énergétique pour un système comme le langage reste très abstraite. Toutefois, l'extrême diversité du langage humain, à travers les quelques 6,000 langues du monde, laisse envisager que

de nombreux états du système sont acceptables.

En outre, il est facile de constater que certaines caractéristiques sémantiques qui sont encodées dans certaines langues du monde ne le sont pas dans d'autres : les marques du pluriel pour les noms sont ainsi parfois absentes, comme en mandarin ou en japonais, de même que les différents temps et aspects distingués dans des langues comme le français ou l'allemand sont beaucoup plus réduits dans d'autres langues. Autre exemple, les systèmes de classificateurs, présents dans de nombreuses langues (langues amérindiennes, dialectes chinois, japonais...) et qui apportent des informations supplémentaires sur les éléments dénombrés (ce qui peut faciliter leur traitement cognitif) sont absents dans d'autres langues. L'existence d'un contexte et de connaissances partagées lors de la conversation entre deux locuteurs permet de limiter la quantité d'informations transmise par le langage, et de nombreuses informations sémantiques exprimées par un élément typologique dans certaines langues ne seraient pas nécessaires à la compréhension du discours. Néanmoins, l'ensemble de ces éléments facilite le décodage du discours en limitant la charge cognitive et le nombre d'inférences à effectuer pour extraire l'information sémantique. Il est possible dès lors de postuler que les langues offrent de façon *globale* plus ou moins le même degré d'indiciage des éléments sémantiques. Par indiciage, nous entendons les indices linguistiques dans les énoncés qui permettent de reconstruire les représentations mentales du locuteur ; par degré d'indiciage, nous entendons l'investissement en structures linguistiques d'une langue pour transmettre les représentations mentales des individus. Si le degré d'indiciage des langues est globalement le même, les langues s'appuient néanmoins sur des caractéristiques typologiques parfois très différentes pour la transmission d'informations : une langue pourra ainsi faciliter la détection de certaines caractéristiques sémantiques et rendre plus ardue la détection d'autres, ce qui équilibrera l'investissement cognitif *moyen*. De nombreuses possibilités existent pour exprimer de façon suffisamment performante les représentations des individus (c'est à dire satisfaire les contraintes communicationnelles).

D'une façon générale, si des contraintes pèsent sur le système, il est possible que leur poids ne soit que modéré et que le système puisse localement aller à l'encontre de certaines contraintes. Le processus d'économie est ainsi souvent mis en défaut : il peut par exemple exister une redondance importante de certains marqueurs sémantiques dans les langues, comme c'est le cas des marques du pluriel ou du genre en français ou en espagnol. Ces marques portent ainsi en français à la fois sur les articles, les noms, et certains adjectifs et formes verbales.

En outre, comme nous l'avons déjà souligné, les contraintes peuvent aller en sens opposés, et dès lors, certaines caractéristiques typologiques du langage seront nécessairement en désaccord avec une contrainte. Les évolutions du système peuvent dès lors “osciller” sous l'influence des différentes contraintes, sans qu'il existe un état beaucoup plus stable que les autres (c'est à dire avec une énergie très faible) qui figerait le système.

Le problème de la topographie énergétique s'applique à la fois au système langagier dans son ensemble, mais également à des sous-systèmes comme celui des sons de la langue. Une question générale est de savoir si les systèmes de sons des langues se simplifient au cours du temps, et s'il existe donc une *directionnalité* des changements. Ceci correspondrait à un relief présentant un minimum absolu (notion à relativiser dans un espace à nombreuses dimensions), et à une trajectoire évolutive des langues récentes progressant sur les pentes du puits correspondant à ce minimum.

Egidio Marsico a attaqué ce problème en comparant les systèmes phonologiques des langues contemporaines avec ceux des proto-langues reconstruites. Si l'on peut argumenter que le pro-

cessus même de reconstruction peut biaiser la réalité des proto-systèmes de sons, les nombreuses statistiques effectuées sur les deux corpus semblent indiquer qu'il n'existe pas de différences qualitatives globales entre les deux ensembles de langues [Marsico, 1999].

Quelle est en conséquence la topographie du paysage énergétique du système langagier ? Il s'agirait d'une topographie peu marquée, et de nombreux **optima locaux** correspondraient aux nombreuses langues rencontrées. Si les contraintes dessinaient un paysage plus contrasté pour certains sous-systèmes, les langages exhiberaient des types structuraux (c'est à dire des ensembles de structures) beaucoup plus voisins et moins diversifiés. L'existence de certains universaux peut toutefois correspondre à ce phénomène, de la même façon que la fréquence de différentes structures en compétition (comme l'ordre des verbe, sujet et objet dans les langues qui y recourent, ou les différents systèmes phonologiques) peut refléter les contraintes cognitives qui pèsent sur le traitement linguistique. L'existence d'universaux implicationnels peut également correspondre à l'existence de contraintes entre les présences simultanées de différentes caractéristiques typologiques.

La question de l'évolution vers des états d'énergie minimale sera abordée dans la seconde partie de ce chapitre.

2.3 Description diachronique du langage : les évolutions du système linguistique

Dans la partie précédente, nous nous sommes attachés à décrire le système langagier en insistant sur l'existence d'espaces des états possibles et sur les forces en présence. Si les premiers sont une première condition pour toute évolution, des mécanismes particuliers sont nécessaires pour produire des transformations du système. Les spécificités du langage en tant que système complexe conduisent à un mode d'évolution particulier, où les changements concernent à la fois un ensemble de structures de la dimension structurelle du langage, et les locuteurs de la dimension distribuée.

Après avoir introduit quelques termes relatifs aux changements linguistiques, nous nous pencherons sur les mécanismes intra- et inter-individuels qui permettent l'expression de transformations au sein de l'espace des états possibles du système linguistique. Nous détaillerons alors les problèmes d'actuation et d'implémentation, ainsi que d'autres thèmes liés aux changements linguistiques.

2.3.1 Diversité, variabilité et évolution

Diversité et variabilité

Afin d'utiliser un vocabulaire précis, il est nécessaire de définir ici quelques termes que nous mettrons à profit dans la suite de notre exposé pour décrire les évolutions d'un système.

Les différentes notions qui permettent d'aborder les transformations d'un système prennent place dans deux contextes distincts : l'un est un contexte synchronique, qui correspond à l'état du système à un instant donné, tandis que le second est un contexte diachronique, où l'on considère les transformations d'un système au cours du temps²³.

²³Par instant donné pour une description synchronique, on peut en fait considérer une période de temps de durée négligeable en comparaison du contexte général de l'étude linguistique

D'un point de vue descriptif, il est possible d'observer des différences entre deux systèmes décrits de façon synchronique. Ces deux systèmes peuvent être en fait un unique système, mais décrit à des périodes différentes, ou deux systèmes différents décrit au même instant ou des instants différents. Il est ainsi possible de comparer le français contemporain et celui du XV^{ème} siècle, l'anglais et le français en 2001, ou encore le français contemporain et le québécois du XV^{ème} siècle (cette dernière comparaison n'est pas nécessairement très pertinente).

Quel que soit le cas considéré, nous pouvons classer ces différences en deux catégories. Si l'on se base sur les notions d'item et de structure linguistiques, il est tout d'abord possible d'observer des différences pour un item donné qui ne viennent pas modifier la **similitude structurelle** qui peut exister entre les systèmes. En effet, au sein d'une structure composée d'éléments qui forment un tout cohérent, des modifications de ces éléments ne viennent pas nécessairement briser les liens qui les unissent au sein de la structure. Pour prendre un exemple concret, il est possible d'utiliser des composants différents pour construire une voiture (des moteurs présentant des différences de fonctionnement, des pneus de conceptions diverses...) sans que la cohérence de l'assemblage de ces composants, qui conduit à la structure de voiture, ne soit remise en cause. Nous utiliserons le terme de **variabilité** pour caractériser cette catégories de différences entre des systèmes.

A l'inverse, des différences peuvent exister entre des systèmes qui mettent en évidence des dissimilarités structurelles entre eux. Dit autrement, ces différences traduisent le fait que des assemblages d'items au sein de structures de même ordre ne sont pas réductibles les uns aux autres. Pour donner à nouveau un exemple quotidien, si changer les pneus d'une voiture ne conduit pas à créer une structure différente de la structure initiale, des véhicules possédant un nombre de roues différent ne sont pas considérés comme des structures analogues : au niveau lexical, ceci se traduit par l'utilisation de termes différents, comme ceux de "voiture" ou de "moto". Nous désignerons par **diversité** le fait de pouvoir observer de telles différences structurelles entre des systèmes, et par "**pattern**" ou **schéma de diversité** la distribution de structures différentes dans un ensemble de systèmes.

Il faut insister sur le fait que la notion d'**analogie structurelle** est délicate. Elle repose en effet sur la description qui est faite des systèmes, et du niveau auquel elle se situe, subjectivité que nous avons déjà mentionnée lors de la définition du terme "structure". La notion de cohérence entre les items qui définit la structure peut-être considérée de différentes façons, par exemple sous un angle fonctionnel. Nous pouvons illustrer cet argument par plusieurs exemples.

Nous pouvons tout d'abord considérer l'exemple de la génétique, et rappeler qu'un certain nombre de mutations génétiques ne conduisent à aucun changement du phénotype. Ces mutations touchent une partie du génome appelée non-codante. Historiquement, la classification des organismes s'est effectuée sur la base de leur phénotype, et des différences ont été observées entre les espèces bien avant la découverte de l'ADN. Cependant, les définitions plus récentes induisent le fait que la diversité des espèces concerne généralement les différences observées entre les espèces, et que la variabilité existe au sein d'une même espèce (selon le principe qu'elle est interne à l'espèce). On voit qu'un décalage existe entre la notion d'espèce et celle de modification du phénotype (en tant que structure). C'est pourquoi la notion de lignée telle quelle est introduite par Maturana, nous semble mieux correspondre que celle d'espèce à l'idée de préservation ou de changement d'une structure phénotypique :

“Si l'être vivant se reproduit, mais que ne se conserve pas le phénotype ontogénique au moyen duquel il se réalisait comme organisme particulier, alors émerge un être vivant différent qui réa-

lise un autre phénotype ontogénique, distinct de celui du premier. Lorsque ceci arrive, surgit un nouvel organisme qui est une variation de l'organisme progéniteur, porteur ou non des entités ou systèmes qui s'entrecoupaient dans la structure de l'être vivant originel. Ceci ouvre aussitôt la possibilité que se constitue une nouvelle lignée, ou qu'en surgisse une depuis une succession de reproductions avec changement de phénotype ontogénique, si le nouveau phénotype ontogénique conduit à la reproduction." [Maturana and Mpodozis, 1999] (p. 28)

Un deuxième exemple repose sur la catégorisation que nous opérons à l'aide du langage et de façon cognitive sur les éléments de notre environnement. L'utilisation de termes lexicaux différents pour les véhicules mentionnés précédemment illustre que nous encodons lexicalement des différences de type "structurel", mais ceci est toutefois relatif à la langue utilisée. La façon dont nous concevons la structure des objets au niveau cognitif semble difficile à analyser.

Au niveau linguistique, nous avons introduit la notion d'axes syntagmatique et paradigmatique. Pour les langues contemporaines, la diversité et la variabilité s'observeront au niveau des axes paradigmatiques des structures, puisque les composantes associatives syntagmatiques sont les mêmes quelles que soient les langues considérées. La variation se traduira par des modifications sur un axe paradigmatique qui ne modifient pas la structure concernée, alors que la diversité traduira des différences structurelles. Au niveau phonologique, la structure du système est définie par les phonèmes de la langue, mais la réalisation de ces phonèmes au niveau acoustique peut varier, et l'on parlera de variation allophonique si les différentes formes correspondent au même phonème, et que l'ensemble des oppositions entre phonèmes n'est pas modifié. Au contraire, la diversité des systèmes phonologiques correspond aux différentes structures phonologiques que l'on peut rencontrer dans les langues du monde.

Il est possible que des items ne puissent pas être modifiés sans entraîner de modifications structurales (dans une ou plusieurs structures). Il n'existera alors pas de variabilité, mais seulement de la diversité vis à vis de cet item et des structures concernées.

Evolution et changements

Entre deux instants donnés, il est possible d'assister au sein d'un système à la modification des structures et des items qui le composent. Un **processus** diachronique, dynamique, est à l'oeuvre, qui est dénommé par le terme d'**évolution**. Ce processus est causé par un certain nombre de mécanismes qui sont spécifiques au système considéré, et que nous aborderons par la suite pour le langage.

Les notions de variabilité, de diversité et d'évolution sont bien sûr reliées les unes aux autres, dans le sens où ce sont les processus d'évolution qui sont à l'origine de la variation et de la diversité d'un ensemble de systèmes linguistiques.

Il nous reste à définir la notion de changement. Cette notion s'inscrit elle aussi dans un contexte diachronique. En lien avec les définitions de variabilité et de diversité, un **changement** correspondra à une modification structurale au cours du temps. Une telle modification conduira à une transformation du schéma de diversité d'un ensemble de systèmes contenant le ou les items concernés par le changement. Dans le cas où une plage de transformations est possible pour un item linguistique, il est possible que ces transformations, après un épisode de variation de l'item, conduisent à un changement structurel dans certaines conditions. Nous détaillerons des exemples dans les paragraphes suivants. Un changement peut bien sûr également apparaître lorsqu'il n'existe pas de plage de variabilité pour un item, c'est à dire lorsque toute modification de cet item sera nécessairement structurelle.

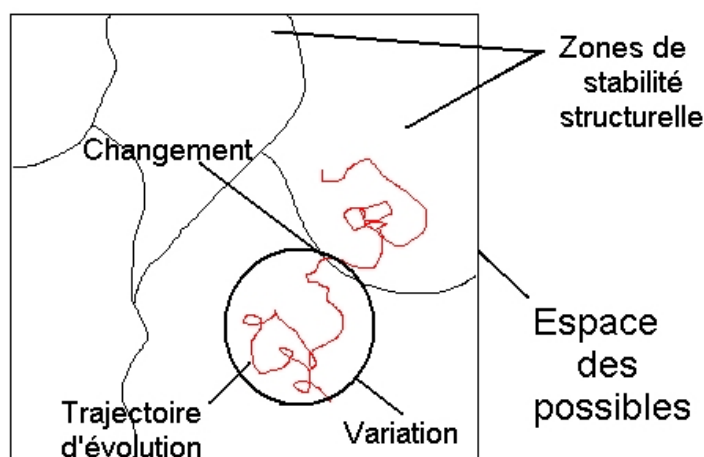


FIG. 2.5 – Variation et changement dans l'espace des possibles d'un système

Comme le montre la figure 2.5, une évolution d'un système correspond à une trajectoire dans l'espace des possibles. Afin de représenter la frontière entre espaces de variabilité, il est possible de façon abstraite de découper l'espace des états possibles en plusieurs régions correspondant chacune à une **zone de stabilité structurelle**. Si une évolution fait passer le système d'une zone à une autre, c'est à dire si un item est transformé de façon à introduire une modification structurelle dans le système, alors un changement s'opérera dans ce dernier. Si les évolutions du système demeurent restreintes à une zone de stabilité structurelle, il s'agit alors seulement de variabilité.

Le concept de trajectoire dans l'espace des possibles pour envisager l'évolution d'un système est une approche théorique et générale qui peut s'appliquer à tous les systèmes complexes. L'évolution de l'idiolecte d'un locuteur se traduira par une trajectoire dans l'espace des états possibles pour cet idiolecte. Pour une communauté de locuteurs, l'évolution du système communal sera représentée par une trajectoire dans l'espace des états possibles *communaux*, c'est à dire dans l'espace résultant du croisement des espaces des locuteurs. Toute évolution chez un locuteur va entraîner un changement d'état du système communal, en modifiant les composantes de ce système qui correspondent au locuteur concerné par la modification.

Cette approche théorique est peu intuitive à manier. L'espace des états possibles pour l'idiolecte d'un locuteur est un concept abstrait et difficile à manipuler, et considérer le système linguistique d'une population nécessite de faire un pas de plus dans l'abstraction en composant un grand nombre d'espaces des possibles idiolectaux. Il existe cependant une approche simplifiée à l'évolution d'un système communal, qui se base sur le fait que l'ensemble des locuteurs possèdent globalement le même espace des états possibles. Nous avons déjà utilisé plus haut cet argument pour réduire l'espace des possibles à celui engendré par les contraintes naturelles et distribuées. Il devient dès lors possible de ne considérer que l'espace des possibles idiolectal, et de représenter l'évolution d'une population par une collection de trajectoires (une par individu) dans cet espace des possibles. C'est à cette possibilité que nous recourons dans le chapitre 6.

2.3.2 Potentialité, fluctuations, fréquences d'occurrence et changements

Les espaces d'états possibles détaillés plus haut conduisent à l'ensemble des changements **potentiels**. Tout état particulier du système langagier offre un certain nombre de *possibilités* d'évolution, qui ne seront pas nécessairement réalisées, et qui sont plus ou moins favorisées par le jeu des contraintes internes et/ou externes. Si certaines potentialités vont à l'encontre d'une partie des forces en action, elles peuvent néanmoins être réalisées grâce à l'opposition entre différentes contraintes et la relative faiblesse des contraintes structurelles déjà mentionnée plus haut.

Alors que nous avons défini les notions de changement et de variation sur la base des structures linguistiques, Martin Ehala recourt à la notion de **fluctuations** pour déterminer à partir de quel moment il est possible de parler de changement dans un système. Ehala définit ce terme de la façon suivante :

"Generally, fluctuations can be defined as random deviations from the system's average state, and they are characteristic of all self-organising systems." [Ehala, 1996] (p. 11)

De nombreuses fluctuations relatives aux différentes possibilités d'évolution du système peuvent se manifester dans les productions de différents individus. Comme le propose Ehala, tant que ces fluctuations conservent un barycentre stable, le système reste dans le même état.

La mesure des fréquences d'occurrence des variations dans les productions d'un individu ou dans une population permet de juger de leur caractère important ou anecdotique. Les exemples abondent dans les travaux des sociolinguistes, comme celui du /r/ vocalique ou non-vocalique rencontré dans la population de Philadelphie [Labov, 2001] (p. 250-256).

Si le barycentre des états fluctuants du système se déplace de façon significative, il est alors possible de parler de réel changement chez un individu ou dans la population. Le système linguistique quitte l'état stable qu'il occupait initialement pour atteindre un nouvel état d'équilibre :

"Every change starts from a fluctuation. When the system is in a stable state, fluctuations cancel each other out; when the stability is lost, one of them expands and introduces the new stable state." [Ehala, 1996] (p. 12)

Pour le paramètre concerné, le changement se traduit le plus souvent par une inversion des fréquences d'utilisation. Comme nous l'avons dit, cette fréquence peut-être mesurée chez un individu, dans une population d'individus de langue commune, mais également parmi plusieurs langues ou dialectes. Si l'on considère l'exemple des consonnes finales des dialectes chinois donné par Wang et Chen, l'étude des différents dialectes chinois contemporains et des données sur le moyen chinois montre une évolution de la fréquence des consonnes finales dans les différentes langues au cours du temps [Wang and Chen, 1975].

L'observation en synchronie d'un schéma de fréquence ne renseigne pas toujours sur les éventuels changements en cours, car il est parfois difficile de déterminer quel est l'état initial et celui vers lequel le système se dirige. Une situation où 90% des locuteurs adoptent une forme **A** et 10% une forme **B** peut ainsi représenter de façon partielle le développement de la forme **B** qui commence à se répandre dans la population, ou sa disparition progressive du système (si le pourcentage baisse en fait au cours du temps).

Rappelons ici que les conclusions des chercheurs sont qu'il existe un très grand nombre de fluctuations en permanence dans tout système linguistique, et que toute langue ou dialecte est

en perpétuel changement. Sapir résume cet état de fait de manière laconique :

“Tout le monde sait que le langage varie.” [Sapir, 1921] (p. 177)

La notion d'état stable citée plus haut est donc à relativiser, et si certains sous-systèmes peuvent être stables à certaines périodes, le système dans son ensemble est perpétuellement en changement. Nous pouvons ajouter ici que les transformations de la dimension structurelle du langage peuvent se manifester au cours du temps d'une façon plus manifeste et fréquente que celle du génome, qui ne varie en dehors des transmissions reproductives que lors de rares mutations. En effet, un locuteur, dans une situation donnée, dispose le plus souvent d'un grand nombre de possibilités pour exprimer un même contenu sémantique : utilisation de différentes structures syntaxiques (mode actif ou passif, subordination, coordination...), choix des mots... Ces possibilités de variation sont limitées en pratique à un certain répertoire, par exemple en fonction du locuteur avec qui se déroule l'interaction, mais ceci est le résultat de **contraintes** qui viennent s'exercer sur les possibilités de variation, et celles-ci n'influencent pas l'espace de variation en lui-même, mais les trajectoires évolutives en son sein. Ajoutons qu'en fonction de différents paramètres, la prononciation du locuteur pourra varier de façon plus ou moins significative sur certains mots.

Les notions de fluctuation et de variabilité semblent assez voisines, mais ne sont pas réductibles l'une à l'autre. Il semble en fait en première approche que les fluctuations soient celles des trajectoires évolutives d'un système dans l'espace des états possibles. En effet, lorsque ces fluctuations disparaissent au profit d'une tendance significative, une trajectoire en conséquence plus linéaire dans l'espace des possibles finit par quitter la zone initiale de stabilité structurelle : un changement se produit.

Zone de stabilité structurelle et bassin d'attraction

Nous pouvons préciser ici le lien qui peut être tracé entre l'organisation de l'espace des états possibles et la topographie de l'espace énergétique.

Comme nous l'avons déjà souligné, l'espace énergétique correspond à la donnée d'une valeur énergétique pour chaque configuration d'un espace de paramètres qui est en fait l'espace des états possibles pour un système (pouvant évoluer selon les variations de ces paramètres). Nous avons en outre décrit la topographie de l'espace énergétique à l'aide des notions d'attracteur, de bassin d'attraction ou encore de barrière énergétique. Un parallèle peut être fait entre les régions de stabilité structurelle de l'espace des états possibles et les bassins d'attraction de l'espace énergétique. L'idée est qu'un minimum du paysage correspond à une configuration des paramètres à l'origine d'une structure particulièrement en adéquation avec les contraintes qui pèsent sur le système, contraintes qui sont à l'origine de la fonction d'énergie. Autour de cette configuration (c'est à dire une combinaison d'items) particulièrement adéquate, le bassin d'attraction caractérise des états du système moins en adéquation avec les contraintes que le minimum, mais où la structure est néanmoins préservée (ses différents attributs, par exemple sa fonctionnalité, restent intacts). Ceci correspond à la notion de zone de stabilité structurelle, et une projection peut dès lors être établie entre l'espace des états possibles et l'espace énergétique.

Les bassins d'attraction sont généralement séparés par des barrières énergétiques plus ou moins importantes à franchir. Franchir un tel obstacle est relatif à l'énergie (et celle-ci peut-être quasi-nulle si la barrière est pratiquement inexistante) qu'il faut fournir pour passer d'un bassin d'attraction à un autre, c'est à dire d'une structure à une autre. Le système évolue jusqu'aux

limites de stabilité structurelle d'une structure initiale, et s'il peut franchir la barrière énergétique, on assiste alors à une ré-organisation des items qui conduit à une nouvelle structure, dotée de nouveaux attributs, et dont la forme optimale correspond à l'attracteur du nouveau bassin d'attraction.

L'évolution d'un système se traduit par une trajectoire dans l'espace des états possibles et sa projection dans l'espace énergétique. Si cette trajectoire reste au sein d'un même bassin d'attraction, la structure que représente ce bassin est préservée, et l'on observe le plus souvent des fluctuations de l'état du système autour de l'attracteur. Il s'agit alors de variabilité. Au contraire, lors d'un changement linguistique, c'est à dire lors du franchissement d'une barrière énergétique, on observe une trajectoire qui échappe pendant une période au régime fluctuant autour de l'attracteur initial. Notons bien ici que cette trajectoire peut cependant toujours présenter des aspects stochastiques lors de ce régime de transition. Suite au franchissement de la barrière et à la stabilisation du système autour d'un nouvel attracteur, un nouveau régime fluctuant démarre, mais centré autour d'une nouvelle configuration.

2.3.3 Mécanismes des changements intra- et inter- individuels

Les mécanismes d'évolution sont spécifiques à chaque système considéré et permettent l'exploration de l'espace des possibles. Dès lors, selon la décomposition de ce dernier en zones de stabilité structurelle, des changements peuvent apparaître.

A partir de ce que nous venons de voir, il est logique d'examiner maintenant quels sont les mécanismes spécifiques responsables du processus dynamique d'évolution d'un système linguistique.

Présentation de la situation au niveau des espèces

Pour bien rendre compte des mécanismes d'évolution en lien avec les espaces d'états des possibles, nous pouvons reprendre la comparaison avec l'évolution des espèces, et examiner les mécanismes qui conduisent à la modification des génotypes et des phénotypes des organismes.

Si l'espace des possibles génétique est constitué d'un sous-ensemble des combinaisons de bases d'ADN possibles, différents mécanismes sont à l'œuvre pour engendrer effectivement des changements au niveau phénotypique. Si l'on parle souvent de la mutation comme phénomène de base des changements, d'autres mécanismes entrent en jeu en dehors même des phases de reproduction, comme ceux de l'épissage ou de la modification post-transductionnelle des protéines lors du passage du génome au protéome [Chevassus-au Louis, 2001].

Lors de la reproduction sexuée, en plus du mécanisme de recombinaison des deux ADN des parents, les phénomènes de cross-over et de caractères dominant ou récessif des gènes permettent d'aboutir à de nouveaux génotypes et conséquemment à de nouveaux phénotypes.

Enfin, au niveau de la population d'individus, l'espace géographique joue un rôle important dans l'émergence et la préservation de transformations dans un ensemble d'individus. En effet, la répartition des individus sur l'espace et particulièrement l'isolement d'une partie d'entre eux peut conduire à l'accumulation de transformations dans un sous-ensemble de la communauté. Si cette accumulation, causée par les mécanismes précédents, finit par entraîner une modification

structurale du phénotype, alors une nouvelle lignée d'organismes surgira :

“En d’autres termes , l’établissement d’une nouvelle lignée implique que se soit générée une dynamique systémique, organisme-milieu, qui se conservera tant que les variations qui se produisent dans le génotype total n’interfèrent pas avec la conservation du phénotype ontogénique qui définit cette lignée.” [Maturana and Mpodozis, 1999] (p. 36)

Analogie avec les systèmes linguistiques

Dans le cas du système langagier, les éléments de la dimension naturelle du langage permettent de faire émerger des changements de l’espace des états possibles.

La production et la perception des sons de la langue est ici encore une fois un des domaines où les études sur les mécanismes de variation et de changement sont les plus riches. Le bruit d’une part, et les phénomènes de co-articulation d’autre part, modifient la forme sonore des phonèmes de la langue et peuvent conduire les locuteurs à analyser de façon répétée le signal sonore de façon erronée. Une pression existera alors en faveur d’un changement phonétique.

Les phénomènes d’**hypo-correction** et d’**hyper-correction** correspondent respectivement à négliger ou à supposer de façon erronée la présence d’un trait pour un phonème [Ohalo, 1993]. Si l’on prend l’exemple du mot doute ([dut]), l’écoute en isolation du son [u] (en tronquant l’enregistrement du mot entier) conduit les locuteurs à l’identification du son [y]. Un processus *top-down* de correction conduit donc ces mêmes locuteurs à transformer le son [y] en son [u] dans le contexte d’articulation du mot “doute”. Le processus d’hypo-correction consiste ici à ne pas corriger le son dans le contexte d’articulation et à percevoir le mot [dyt]. A l’opposé, le processus d’hyper-correction conduirait à corriger de façon exagérée le son [y] du mot [dyt] (en fait un pseudo-mot en français, ce qui rend l’exemple factice) et à percevoir le mot [dut] alors que le locuteur a bien prononcé [dyt].

Sur la base des processus d’hypo- et d’hyper-correction, la forme des morphèmes de la langue peut dès lors changer, sans toutefois que le passage du mécanisme de changement au changement effectif chez un individu ou une population soit clairement explicite.

Afin d’illustrer les contraintes naturelles qui pèsent sur les formes sonores, et qui peuvent être à l’origine des phénomènes d’hypo- ou d’hyper-correction précédents, nous pouvons considérer les exemples des syllabes [ki] et [du]. Pour la première syllabe, les lieux d’articulation de la consonne et de la voyelle sont respectivement postérieur (vélaire) et antérieur ; pour la seconde, les lieux d’articulation sont respectivement antérieur (dental) et postérieur. Dans les deux cas, la co-articulation est rendue difficile par la distance entre les deux lieux, et des changements auront tendance à apparaître dans ces contextes.

Le [ki] aura tendance à évoluer vers un [ci], avec un phénomène de palatalisation du [k]. Avec une telle transformation, les lieux d’articulations seront rapprochés, puisque [c] est plus antérieur que [k] (il s’agit d’une consonne palatale), et donc plus proche de [i]. Une palatalisation du [k] sera plus fréquente (voire systématique) qu’une postériorisation du [i] vers une voyelle plus centrale.

Dans le second cas, on observera plutôt une antériorisation de la voyelle, toujours afin de rapprocher les lieux d’articulations, et non pas une postériorisation de la consonne.

Ces deux exemples permettent de montrer que lors d’un changement à cause d’une co-articulation difficile, ce ne sont pas invariablement les consonnes ou les voyelles qui sont transformées. Dans les deux cas présentés, on assiste en fait à une antériorisation du segment le plus postérieur. Ceci peut s’expliquer par un meilleur contrôle de l’apex de la langue.

La façon dont un locuteur produit les sons de sa langue et plus généralement choisit les composants de ses phrases (choix des mots, des structures syntaxiques...) est soumise à un ensemble de contraintes qui forment ce que l'on pourrait appeler un **contexte** de production : l'âge, les états émotionnel, cognitif et physique de l'individu, et le locuteur à qui il s'adresse viennent tous agir sur la forme de ses productions. Ces productions variables (fluctuantes ?) pourront à leur tour engendrer des changements, si les formes d'un contexte particulier prennent le pas sur les autres. Dans ce cas, plusieurs items linguistiques qui étaient en interaction (et en compétition) disparaissent au profit d'autres, et une nouvelle structure apparaît en remplacement de l'ancienne (il s'agit d'une dérive structurale au sens de Maturana). L'existence de registres de parole en fonction du récepteur (rang social inférieur ou inférieur, ami, première rencontre...) et de la situation (discours, dialogue informel...) est un exemple de mécanisme qui permet d'observer de la variabilité et éventuellement des changements.

Ce même contexte s'applique également pour la perception et l'analyse des propos d'un locuteur par un autre.

Là où l'isolement géographique pouvait constituer un mécanisme d'évolution des espèces, la répartition des individus dans différentes régions géographiques mais aussi divers groupes sociaux joue également un rôle crucial dans les évolutions d'un système linguistique. Le contact linguistique entre deux (ou plus) populations de langues sensiblement différentes permet l'émergence de nouvelles structures résultant de la rencontre des deux dimensions structurelles des langues considérées.

Mécanismes sociolinguistiques

Nous avons déjà évoqué le poids de la force créée par la volonté de s'intégrer dans un groupe social et d'affirmer son propre statut. Différents mécanismes vont permettre de réaliser cet objectif (donc de répondre à la contrainte), et vont contribuer au changement linguistique. Différentes stratégies individuelles peuvent exister, selon l'environnement social et la personnalité du locuteur. Nous pouvons distinguer ici deux tendances principales, qui consistent à respecter la norme en vigueur dans l'environnement social, afin de s'affirmer au sein de ce dernier, ou au contraire à l'enfreindre pour affirmer son identité en opposition à celui-ci.

Ces grandes tendances peuvent s'appliquer à différentes échelles de la structure sociale et peuvent se compléter à des niveaux différents. Ainsi, un ensemble d'individus pourra s'opposer à la norme générale de sa communauté, alors que ces membres tendront à respecter la sous-norme de leur groupe afin de renforcer leur cohésion sociale et cimenter leur opposition.

Les classes sociales qui scindent les sociétés occidentales contemporaines constituent une première structuration propre à rendre compte de différents changements linguistiques. La notion de réseau social est également mise à profit pour rendre compte de ces derniers. Nous souhaitons rapporter ici la théorie de Milroy, que nous utiliserons partiellement par la suite dans nos simulations informatiques (voir chapitre 6) [Milroy, 1992]. Cet auteur reprend la distinction de Granovetter entre deux types de relations entre les individus : des liens forts et des liens faibles. La force d'un lien entre deux individus est définie de façon abstraite par une combinaison du temps passée entre les deux individus, de l'intensité émotionnelle, de l'intimité et des services réciproques qui caractérisent la relation (p. 178). La notion de force ou de faiblesse des liens est bien sûr relative, et la séparation des liens en deux classes "fort" ou "faible" est pédagogique.

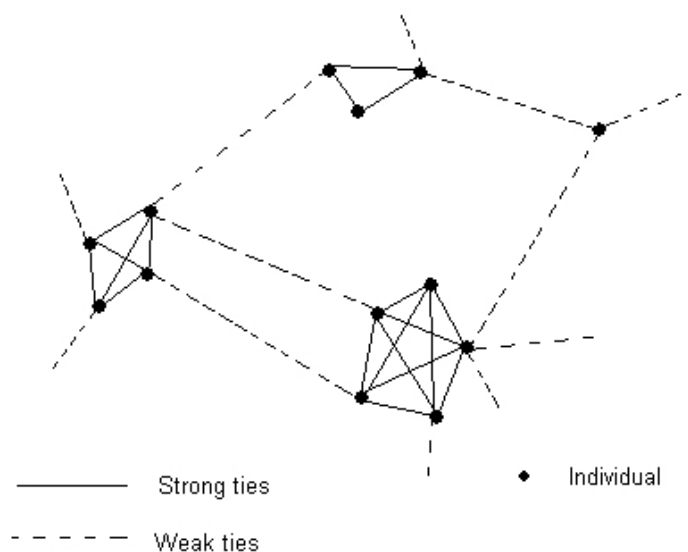


FIG. 2.6 – Réseau social basé sur la théorie de Milroy [Milroy, 1992]

Les individus se regroupent en petits groupes maintenus par des liens forts, et des liens faibles unissent des locuteurs de groupes différents (voir figure 2.6). Milroy rejoint la position de Granovetter sur le rôle des liens faibles qui permettent une diffusion des innovations linguistiques entre les groupes. En opposition à d'autres chercheurs, il défend également l'idée que les liens forts ne participent pas à la diffusion des changements linguistiques, mais au contraire assurent la cohésion des groupes qu'ils construisent et viennent stabiliser leur système linguistique (p. 179-180). La diffusion d'un changement sera dès lors conditionnée par le statut des individus et les afférences des liens faibles vers les différents groupes. Il faudra ainsi qu'une certaine masse critique d'individus qui acceptent le changement soit atteinte pour qu'un groupe entier puisse basculer.

L'émergence d'un changement dans un groupe et sa diffusion à d'autres groupes sont deux problèmes différents. En effet, si un groupe n'acceptera pas nécessairement des changements externes, il sera à même de créer une innovation que ses membres adopteront facilement si cela facilite leur positionnement social.

Pour Labov, certains individus sont plus propices à propager les changements. Ils sont désignés par le terme de *leaders* et les études sociolinguistiques conduisent à la caractérisation suivante :

"... the leaders of linguistic change are people at the center of their social networks, who other people frequently refer to, with a wider range of social connections than others." [Labov, 2001] (p. 356)

Les leaders du changement linguistique sont généralement des femmes, se situent dans des groupes au centre de la hiérarchie socio-économique, possèdent de nombreux contacts intimes à l'intérieur de leur réseau social, qui n'est pas limité à leur environnement immédiat mais possède des liens plus distants avec des individus de différents statuts sociaux qui permettront à un

changement de se diffuser dans les deux directions de la hiérarchie socio-économique [ibid] (p. 360). Les leaders semblent influencés aujourd'hui par les média comme par leurs relations avec les autres, que ce soit entre individus leaders ou avec des individus plus marginaux (p. 363-364).

Une autre proposition de Jean-Marie Hombert [communication personnelle] est que les individus dont l'histoire personnelle les a mis au contact de nombreuses normes dialectales sont les meilleurs candidats à la propagation d'un changement. L'idée est que des mécanismes conscients peuvent intervenir : un individu qui possède un fort accent régional peut tenter de minimiser volontairement cet accent afin de mieux s'intégrer dans une région autre que celle où il a grandi. Des contacts ultérieurs avec des individus de sa région originelle pourront influencer une minimisation de l'accent chez ces individus en réponse au statut social de la première personne. On retrouve un peu ici le réseau très étendu des leaders décrit plus haut.

Acquisition et *imperfect learning*

L'acquisition linguistique est un autre mécanisme qui permet l'apparition de changements, par le biais de ce qui est communément appelé en anglais l'*"imperfect learning"*. Cet apprentissage imparfait peut se manifester à de multiples niveaux, tant au niveau phonologique qu'au niveau syntaxique ou morphologique. Il peut être dû aux bruits qui gênent la perception des sons, à l'effet d'échantillonnage de différents locuteurs qui utilisent des systèmes différents (ce qui peut mener à des incohérences), aux différentes possibilités d'exprimer les régularités d'un ensemble de productions par un jeu de règles cohérentes (on pensera ici aux travaux du logicien Frege sur la syntaxe dans une perspective fonctionnelle [Frege, 1879]).

Si le terme imparfait semble désigner des erreurs de la part de l'enfant, il est plus juste parfois de parler de degrés de liberté accordés par le processus d'acquisition. Ceci est particulièrement visible au niveau des catégories phonologiques, où les processus cognitifs de correction top-down, la perception catégorielle et le contexte du mot laissent une grande liberté pour la prononciation des segments. Une grande variabilité inter-sujets est la conséquence de tels phénomènes, et l'enfant dispose d'un espace assez important pour positionner ces prototypes segmentaux. L'étude menée par Hombert et Puech [Hombert and Puech, 1984] sur les systèmes vocaliques de locuteurs Fang met en évidence la variabilité précédente, illustrée par la figure 2.7.

2.3.4 Actuation et implémentation d'un changement

Le caractère distribué du système langagier (existence d'une instanciation linguistique ou *I-langage* chez chaque individu) contribue à définir un type d'évolution tout à fait particulier pour ce système, qui est en partie parallèle à celui des espèces vivantes. Nous avons déjà abordé le fait qu'un changement puisse être observé dans une communauté ou chez un seul individu. Néanmoins, le changement au niveau de la communauté (ou d'une espèce pour le cas de la biologie) est bâti sur les changements chez les différents membres. En outre, un changement qui touchera l'ensemble de la communauté a peu de chances d'émerger simultanément chez tous les individus, et certains d'entre eux initieront donc le changement. L'apparition du changement chez ces derniers a été baptisée **actuation** du changement. La question est dès lors de savoir comment celui-ci va pouvoir se répandre dans la communauté. Ce problème est celui de l'**implémentation** du changement.

La figure 2.8, préparée avec Egidio Marsico, résume la situation pour un changement phonétique (CP) : depuis l'espace de variation phonétique qui existe dans une communauté, certains

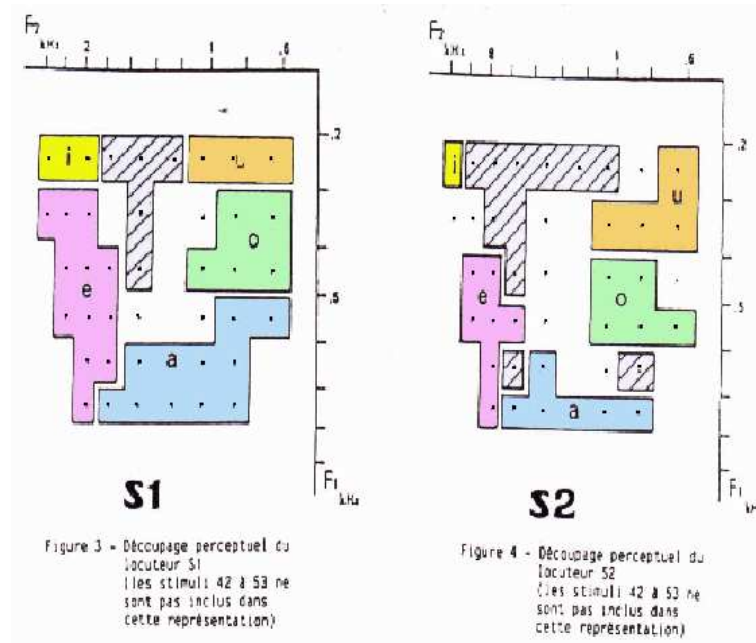


FIG. 2.7 – Catégories phonologiques de deux locuteur Fang, d'après [Hombert & Puech, 1984]

changements émergent chez un ou quelques individus. Ces changements sont qualifiés de potentiels au niveau de la population, car il n'est pas sûr qu'ils s'étendent à l'ensemble de la communauté. Certains changements "potentiels" seront ainsi avortés, alors que d'autres seront bien diffusés à l'ensemble des individus.

Il est intéressant de noter ici que les changements considérés comme tels par la linguistique historique sont les changements qui se sont diffusés avec succès dans toute la communauté. Un postulat plus ou moins implicite est une homogénéité du système linguistique communal, et le fait qu'une variation reste soit "fluctuante" dans celui-ci, soit gagne l'ensemble des locuteurs. Les situations à mi-parcours sont négligées et le langage est uniforme dans la société considérée. Les raisons d'un tel choix ne sont pas évidentes, hormis pour faciliter la tâche du chercheur, et de nombreux sociolinguistes se sont élevés contre cette vision des choses, qui, si elle est parfois

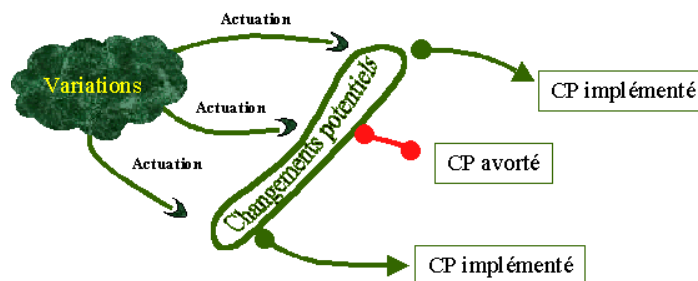


FIG. 2.8 – Emergence et diffusion de changements

profitable, peut aussi quelquefois mener à des incohérences.

[Trask, 1980] donne ainsi l'exemple de la recombinaison d'une opposition entre deux phonèmes à la suite d'une fusion entre eux (*reversal of merge*). Cette situation est théoriquement impossible, puisqu'une fois la fusion entre deux phonèmes réalisée, les locuteurs perdent la connaissance des mots originels et ne peuvent réaliser une fission du phonème résultant pour reconstruire le système initial. Ce phénomène est cependant attesté en anglais au cours du XVI^{ème} siècle, et a posé de grands problèmes aux linguistes avant que la solution suivante soit proposée : si la fusion s'était établie dans les classes sociales supérieures de la société, ce n'était pas le cas dans les classes inférieures. Toutefois, les documents de cette époque provenant surtout des classes les plus hautes, les linguistes ont d'abord considéré que l'ensemble de la population avait été touché par le changement. Un changement dans les valeurs sociales attribuées aux deux systèmes phonologiques en compétition, après une période où le système présentant la fusion était le plus prestigieux, a entraîné le retour du système original dans les classes supérieures [Trask, 1980] (p. 282-283).

Nous avons déjà présenté la façon dont une mutation génétique peut se diffuser dans une espèce par le simple phénomène de réplication lors de la reproduction des individus. A cette diffusion s'oppose le problème de la norme soulevée par Nettle, que celui-ci résout à l'aide de simulations informatiques axées sur le phénomène d'acquisition [Nettle, 1999c]. Le modèle se centre sur l'étude dans une population d'agents de l'existence de deux variants exclusifs p et q que de nouveaux agents dans le système peuvent apprendre des générations précédentes en échantillonnant les variants utilisés par celles-ci (il existe 5 classes d'âge qui se renouvellent). Une structure sociale est projetée sur la population sur la base de la théorie de l'impact social (*Social Impact Theory*), et l'échantillonnage lors de l'apprentissage est biaisé en direction des individus proches au niveau social. Les biais fonctionnels en faveur d'un variant ne permettent pas de reproduire les changements linguistiques réels, dans le sens où une population initialement dans un état homogène (choix d'un même variant par tous les individus) ne bascule jamais dans le second état homogène possible (c'est à dire une situation où la majorité des individus ont adopté le second variant). L'effet de norme exercé par la population globale sur les individus déviants "élimine" ceux-ci lors de l'échantillonnage de l'enfant en phase d'acquisition.

La résolution du problème de la norme passe par l'existence d'individus hyper-influents, capables de faire basculer la communauté entière. Les biais fonctionnels, qui correspondent aux transformations qui déséquilibrent ou renforcent la structure évoquée plus haut, jouent uniquement un rôle dans la fréquence des changements et leur biais vers le variant le plus fonctionnel.

La pression sociale nécessaire pour pouvoir faire basculer la population d'un état prédominant à un autre est très importante. En fait, le degré d'influence nous semble proportionnel à la taille de la population, ce qui est *a priori* gênant si l'on songe aux tailles des populations actuelles par rapport à celles du modèle (quelques centaines d'individus).

Toutefois, si l'on songe aux réseaux proposés par Milroy et présentés plus haut, il est possible d'une part d'envisager des sous-groupes aux liens forts *de taille limitée*, ce qui permet d'appliquer le modèle de Nettle sans que l'hyper-influence soit très importante pour entraîner des changements dans ces groupes. En outre, les liens faibles qui relient une partie des individus appartenant à des groupes tissés par des liens forts différents permettent le passage d'un changement d'un groupe à l'autre et son extension possible à l'ensemble de la communauté. Le statut particulier de ces individus est à mettre en écho des propositions de Labov et Hombert citées plus haut.

Transmission horizontale et transmission verticale

Des chercheurs ont insisté sur le fait que l’acquisition n’est pas la seule à jouer un rôle dans les changements. Les transmissions horizontales sont parfois considérées comme plus prédominantes pour l’évolution linguistique, et il est intéressant de noter que si l’on envisage souvent la transmission des adultes vers les enfants, l’inverse est également possible et même assez fréquent [Mufwene, 2001] (p. 16). Mufwene parle ainsi de transmissions “polyploïdiques” pour désigner les transmissions de caractéristiques linguistiques de plusieurs individus vers le locuteur qui construit son idiolecte [ibid] (p. 12).

Si les transmissions horizontales sont d’importance pour les évolutions linguistiques, le problème de la norme de l’acquisition soulevé par Nettle peut là encore être relativisé. En effet, si des mécanismes sociaux qui touchent les populations adultes sont à même d’entraîner des changements dans la communauté, l’acquisition ne représente plus le seul épisode critique pour l’émergence et la préservation de changements dans une communauté.

Nous pouvons affiner cette proposition en distinguant les items linguistiques selon leurs possibilités d’évolution après la phase d’acquisition. Si le lexique d’un individu peut varier à l’âge adulte, le système phonologique est beaucoup plus difficile à modifier après la période critique d’apprentissage. Le problème de la norme se pose donc avec plus ou moins d’acuité selon les items.

2.3.5 Aspect graduel ou abrupt des changements linguistiques

Différents types de changements

Entre deux états **A** (l’état initial) et **B** (l’état final), différents modes d’évolution peuvent prendre place (voir figure 2.9) :

- une évolution **abrupte**, le système “sautant” directement de l’état **A** à l’état **B** (existence d’une discontinuité) ;
- une évolution **graduelle** entre les 2 états, avec un passage *continu* par une succession d’états intermédiaires. Les changements sont minimaux et graduels tout au long de la transition ;
- une évolution par **équilibres ponctués**, constitué d’une série d’états intermédiaires adoptés par le système de façon *discontinue*.

En ce qui concerne les théories de l’évolution, Darwin, sur la base de ses observations aux îles Galapagos, postula une évolution graduelle des espèces. Cette théorie fut cependant remise en cause par Eldredge et Gould, qui proposèrent une évolution des espèces sur la base d’équilibres ponctués [Eldredge and Gould, 1972]. Là encore, c’est une exploration des variations du vivant qui menèrent aux conclusions, mais elles portèrent cette fois sur l’étude de fossiles. Ce fut la présence de fossiles bien distincts sans aucun chaînon intermédiaire pour les séparer qui guidèrent les auteurs vers leurs conclusions.

Le problème de l’échantillonnage des données, c’est à dire de l’échelle d’observation, est ici crucial. En effet, l’aspect discontinu de l’évolution dans les enregistrements paléontologiques peut être dû à un biais de l’ensemble de données, hypothèse qui est bien sûr rejetée par Gould et ses partisans. Il est en fait plus juste de dire que l’aspect des changements est fonction de

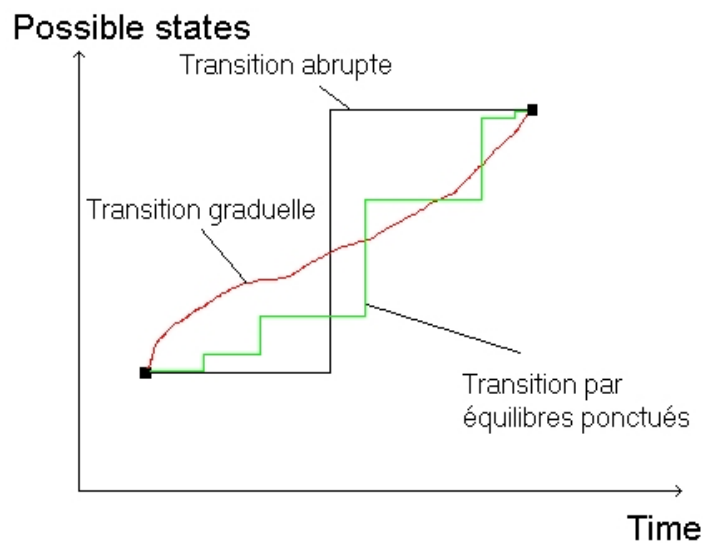


FIG. 2.9 – Modes de changements entre deux états **A** et **B** d'un système

l'échelle d'observation

Ce problème se manifeste également en linguistique, lors de l'étude de textes anciens. Mei Tsulin (séminaire interne du *Language Engineering Laboratory, City University of Hong Kong*, Novembre 2001) fournit un exemple pour l'étude de la syntaxe de la langue vernaculaire chinoise dans les textes anciens (le Zu Tang Ji ou Recueil de la salle des patriarches, qui est un recueil de textes bouddhiques écrit en 952), et pose la question d'une densité suffisante de données pour décider de la nature des changements syntaxiques dans le langage parlé.

Wang a proposé une distinction entre la **micro-histoire**, la **méso-histoire** et la **macro-histoire** pour l'étude des changements linguistiques, afin de définir la fenêtre temporelle utilisée pour les différentes études [Wang, 1978]. La micro-histoire se focalise sur des échelles de temps de quelques années ou décades, et concerne principalement les changements en cours. La méso-histoire s'intéresse aux changements portant sur des centaines ou des milliers d'années, et la macro-histoire s'entend le plus à définir l'évolution phylogénétique du langage.

Sur la base de cette distinction, nous pouvons penser que des événements graduels au niveau de la micro-histoire pourront apparaître comme abrupts au niveau de la méso-histoire. La linguistique historique peut donc dans une certaine mesure négliger le problème de l'implémentation des changements pour ne s'intéresser qu'au résultat sur un intervalle de temps plus long.

La théorie de Dixon d'évolution des langues est à mettre en lien avec le point précédent. Celui-ci émet l'hypothèse que l'évolution des langues se fait de la même façon que celle des espèces dans le cadre des équilibres ponctué formulé par Gould : de longues périodes d'équilibre au cours desquelles les langues évoluent très peu sont entrecoupées de périodes où des ponctuations s'opèrent. Une ponctuation se traduit par des changements importants des systèmes de langues, avec l'apparition et la disparition d'un grand nombre de langues. Elle peut-être causée par des

événements naturels (éruption volcanique, sécheresse, inondations), une expansion humaine dans des régions auparavant inhabitées, des événements socio-politiques tels l'émergence de groupes sociaux ou politiques agressifs ou encore l'apparition d'une nouvelle technologie [Dixon, 1997] (p. 67). L'apparition de l'agriculture est un exemple du dernier cas et caractériserait la ponctuation Néolithique, au cours de laquelle de profonds changements se seraient produits pour donner naissance aux grandes familles de langues actuelles. Après une phase de ponctuation, un nouvel état d'équilibre s'instaure. Au cours de cette période stable, les populations des régions concernées présentent une grande homogénéité en terme de prestige, de taille de population, de style de vie... et les changements, bien que toujours présents, sont qualitativement moins importants que ceux qui prennent place lors d'une ponctuation. L'homogénéité des populations contribue à une convergence des différentes langues en présence. Cette situation est selon Dixon celle qui caractérise le continent Australien (où la famille Pama-Nyungan regroupe la grande majorité des langues de l'île [O'Grady and Fitzgerald, 1997] (p. 342)), et le phénomène de convergence vient graduellement effacer les divergences engendrées par les ponctuations précédentes. Le **stammbaum** ou arborescence des langues permet de représenter la situation lors d'une ponctuation, mais est moins adapté aux périodes d'équilibre. En effet, lors de ces dernières, les phénomènes de transmission horizontale deviennent trop importants et viennent perturber le schéma des transmissions verticales, plus lisible lors d'un événement rapide comme une ponctuation.

L'existence d'évolutions ponctuées des langues n'est pas en contradiction avec des changements graduels des systèmes linguistiques, de la même façon que la théorie de Gould ne s'oppose pas directement à la théorie de Darwin. La différence qualitative entre les échelles temporelles concernées rend possible la superposition des deux théories : des changements graduels sur une courte échelle de temps (la micro-histoire de Wang) peuvent tout à fait conduire à des structures d'évolution ponctuelles sur de larges périodes historiques (il s'agit ici du point de vue de la méso-histoire). Dit autrement, les mécanismes de changement sont toujours les mêmes, et même une période de ponctuation s'appuie sur des changements graduels. Toutefois, une vision globalisante de l'histoire des espèces ou des langues masque la gradualité de ces changements et laisse apparaître des transitions abruptes entre un état final et un état initial.

En ce qui concerne le système langagier, Trask envisage le caractère graduel ou abrupt des transformations pour différentes dimensions de l'activité linguistique [Trask, 1980] (p. 294-295) ; ce caractère peut en effet se manifester :

- au niveau du lexique, où un changement peut concerner d'un coup l'ensemble des mots, ou une part grandissante de ceux-ci ;
- au niveau phonétique, où certains changements peuvent être graduels, comme par exemple la modification de l'aperture ou de l'antériorité/postériorité d'une voyelle, ou abrupts, comme la perte ou l'apparition d'une nouvelle consonne ;
- au niveau individuel, avec un changement qui se produit immédiatement dans 100% des contextes où il s'applique, ou de façon graduelle dans une part grandissante de ces contextes ;
- au niveau de la société, bien qu'ici Trask concède qu'il est très difficile d'envisager un changement abrupt (à moins bien sûr de l'observer sur une grande échelle de temps).

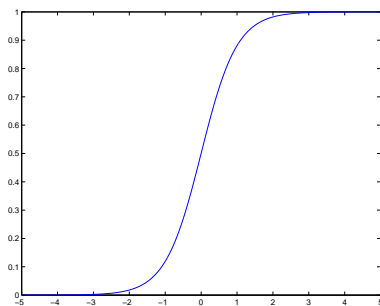


FIG. 2.10 – Courbe logistique

Diffusion lexicale

Une des découvertes les plus importantes de la linguistique moderne concerne le phénomène de diffusion lexicale, mis en évidence par William Wang pour la première fois en 1969. Il concerne les évolutions phonétiques du langage. A l'encontre de l'hypothèse néo-grammairienne de changements phonétiques phonétiquement graduels et lexicalement abrupts, Wang proposa une hypothèse alternative sur la base de changements lexicalement graduels et phonétiquement abrupts. La courbe de "contamination" du lexique prend la forme d'un S (courbe de type logistique, voir figure 2.10), avec dans un premier temps une accélération de la diffusion du changement, suivie d'une décélération après le point d'inflexion [Wang, 1969].

La proposition de Wang est basée sur des considérations comme l'impossibilité d'envisager des changements graduels pour certains types de changements phonétiques, et sur l'étude de changements dans les dialectes chinois grâce à une base de données informatique.

Depuis 1969, de nombreuses études sont venues confirmer cette hypothèse et surtout la gradualité de nombreux changements linguistiques, non seulement au niveau phonétique, mais également pour des structures syntaxiques.

Mei Tsulin met ainsi en évidence la grammaticalisation graduelle de l'aspect résultatif en moyen chinois entre le Vème et le Xème siècle. Une transformation graduelle est attestée au cours du temps et de verbe en verbe, d'une situation (Verbe + Complément résultatif + Objet) à une situation (Verbe + Verbe résultatif + Objet) [séminaire interne du *Language Engineering Laboratory, City University of Hong Kong*, Novembre 2001] [Norman, 1988]. La nature transitive ou intransitive des verbes joue ici un rôle dans le décours de la transition.

Le caractère abrupt ou graduel des changements au niveau du lexique, de la phonétique ou de l'individu soulève la question des représentations cognitives qui sous-tendent l'activité linguistique des locuteurs. Les études à partir de dictionnaires électroniques comme celles de Wang ne permettent pas d'appréhender la dimension distribuée du langage, puisqu'une seule source est disponible pour toute la communauté de locuteurs. On peut se poser la question de savoir si la diffusion lexicale va s'opérer à l'intérieur même du lexique d'un individu, ou seulement par le biais des périodes d'apprentissage des générations successives. Cavalli-Sforza se penche sur ce point, et donne la préférence à la seconde possibilité, sans exclure toutefois la première qui est cependant vraisemblablement un peu moins influente : *"In any case, there is a clearly diffusion from one individual to others, even, though more rarely, among adults"* [Cavalli-Sforza, 1994] (p. 21). Dans le second cas, une modification de la forme phonétique des mots serait donc pos-

sible chez les locuteurs après la phase d'acquisition²⁴. Il existe alors une plasticité résiduelle post-acquisition, que l'on peut supposer différente pour des items lexicaux, des structures syntaxiques ou les phonèmes de la langue. En outre, la relation entre représentations phonémiques et représentations lexicales peut être abordée selon cette perspective : si les mots sont codés par un ensemble de phonèmes, un changement phonémique entraîne le changement de tous les mots où il s'exprime. Il s'agit alors d'un changement abrupt. Si les mots se modifient les uns après les autres, chez un seul individu, c'est l'assemblage des représentations phonémiques pour un item qui peut-être modifié, sans que les phonèmes eux-mêmes soient modifiés.

Cavalli-Sforza postule prudemment une contrainte cognitive de standardisation, qui permet d'expliquer comment le phénomène de diffusion lexicale va pouvoir se mettre en place chez un adulte ou au cours de l'acquisition :

“The simplest explanation is that the brain uses rules as much as possible in producing language, and thus introduces considerable standardization. The major advantage must be economy of labor, but in our present ignorance of the functioning of the brain it is hard to say more.” [Cavalli-Sforza, 1994] (p. 23)

Nous retrouvons donc ici les principes d'économie cognitive évoqués plus haut. On pourra se demander pourquoi des irrégularités comme les formes passées de certains verbes en anglais (*freeze - froze - frozen; see - saw - seen...*) subsistent dans les langues si la contrainte de standardisation est importante. A l'aide de simulations informatiques, Kirby montre cependant comment du bruit et une distribution non uniforme des fréquences de différents items peut conduire à l'émergence d'irrégularités stables. Son modèle, qui utilise des signaux plus ou moins longs pour représenter des concepts (*meanings*), produit spontanément de courts signaux irréguliers et stables si une pression existe pour favoriser les mots de faible longueur [Kirby, 2001]. On retrouve ici des phénomènes proche du processus de grammaticalisation déjà cité plus haut. Les meilleures performances des irrégularités lors des interactions par rapport aux formes régulières permet la préservation des premières. Ceci est un exemple supplémentaire de la compétition qui peut exister entre plusieurs contraintes, ici une contrainte cognitive et une contrainte communicationnelle.

Bidirectionnalité des évolutions

Selon le caractère (abrupt ou graduel) des transformations, les deux dimensions structurelle et distribuée du langage peuvent être différemment concernées par les changements linguistiques. Si l'on veut par exemple pouvoir parler de changement régulier au niveau communal, celui-ci doit s'être produit non seulement au sein de la dimension structurelle du langage, c'est à dire s'être exprimé dans tous les contextes où il le pouvait chez un individu, mais également chez tous les différents individus de la communauté. La régularité des théories néo-grammairiennes est donc un phénomène très déterminé. Les sociolinguistes se sont appliqués à démontrer que le second point est rarement atteint, et l'existence de résidus phonétiques montre que le premier ne l'est pas plus.

Pour les changements graduels au niveau du lexique et des individus, on observe donc une diffusion bidirectionnelle dans deux espaces différents : celui de la structure interne de la langue, et celui de la communauté [Cavalli-Sforza, 1994] (p. 22). Selon les forces en présence dans la

²⁴[Tzeng et al., 1994] montre d'ailleurs que des processus de diffusion lexicale sont à l'œuvre au cours même de cette étape

communauté et au niveau de la structure interne, les diffusions se feront plus rapidement dans l'une ou dans l'autre des dimensions. Nous pouvons ici établir un parallèle avec les schémas de distribution des changements dans les familles de langues proposés par Joseph Greenberg :

"The two factors of probability of origin from other states and stability can be considered separately. If a particular phenomenon can arise frequently and is highly stable once it occurs, it should be universal or near universal. This could be true of front unrounded vowels. It if tends to come into existence often and in various ways, but its stability is low, it should be found fairly often but distributed relatively evenly among genetic linguistic stocks. A possible example is vowel nasalization. If a particular property rarely arises but is highly stable when it occurs, it should be fairly frequent on a global basis but be largely confined to a few linguistic stocks, e.g. vowel harmony. If it occurs rarely and is unstable when it occurs, it should be highly infrequent or non-existent and sporadic in its geographical and genetic distribution, e.g. velar implosives" [Greenberg, 1978] (p. 76).

De la même façon, suivant les dynamiques de diffusion dans les dimensions structurelle et distribuée du langage, et suivant le temps écoulé depuis le début du changement, ce dernier se retrouvera chez de très nombreux locuteurs pour une petite partie du vocabulaire seulement (fin de la dynamique de changement), chez très peu de locuteurs et pour une petite partie du vocabulaire (début du changement), chez de nombreux locuteurs mais pour une faible partie du vocabulaire (dynamique distribuée plus rapide que la dynamique interne) ou chez peu de locuteurs mais pour une grande partie du vocabulaire (dynamique interne plus rapide que la dynamique populationnelle) (par vocabulaire, nous entendons au sens large l'ensemble des mots qui peuvent être touchés par le changement).

Mutations neutres, exaptations et comparaisons linguistiques

Les mutations dans le génotype des espèces ne jouent pas nécessairement un rôle dans le succès reproductif de l'animal. On parle alors de mutations neutres. Une mutation neutre peut être préservée ou non dans une population d'individus par le biais de sa transmission lors du renouvellement des individus suivant des événements en partie contingents. Toutefois, il est possible qu'après un certain laps de temps, une (de) nouvelles mutations permettent d'acquérir à la première une fonctionnalité, et une participation dans le succès reproductif de l'animal. Cette perte de neutralité peut être soit désavantageuse pour la mutation (dans ce cas elle disparaîtra probablement du génotype après une certaine période), soit avantageuse.

Cette situation peut *a priori* être envisagée dans les systèmes linguistiques. Certains changements peuvent en effet avoir un impact très faible sur la cohérence de la structure systémique, et subsister dans la population par le biais de phénomènes sociolinguistiques. Toutefois, des changements ultérieurs possibles peuvent être d'une part influencés par ce premier changement, et inversement celui-ci peut perdre sa neutralité vis à vis de la structure interne du langage à l'apparition de nouveaux changements. Il peut être alors soit rejeté de la structure, soit au contraire y être fixé de façon plus solide, car il participe désormais à la cohérence de l'édifice.

2.3.6 Evolution des systèmes : contingence et directionnalité des changements

Événements contingents et prévision de l'évolution d'un système

Le choix d'un changement possible par rapport à un autre est souvent le résultat d'un ensemble complexe de contraintes et d'événements, dont certains peuvent être *contingents*, parce qu'ils résultent par exemple de contraintes internes ou externes non entièrement spécifiées ou stochastiques. Ces événements contingents, s'ils existent, fondent l'unicité de toute évolution du système. Les relations sociales, extérieures à la sphère purement langagière, en sont un bon exemple.

Tout changement modifie l'état du système, et par conséquent ses possibilités d'évolution ultérieures. [Ehala, 1996] reprend à ce sujet le concept de **bifurcation** de Prigogine et Stengers (p. 2-3), qui correspond à la possibilité d'un système d'évoluer dans des directions différentes à partir d'un même état initial. La figure 2.11 présente les évolutions possibles d'un système selon ce schéma. A partir de l'état initial, l'emprunt d'une suite particulière de bifurcations conduit à un état particulier à une date ultérieure. La trajectoire dans l'espace des possibles d'un système linguistique reflète cette succession de bifurcations.

Comme le montre la figure, des chemins différents peuvent néanmoins conduire à des états ultérieurs voisins.

En cas de phénomènes contingents, à partir d'un état initial, il est impossible de prédire la configuration du système à un instant ultérieur. Dit autrement, il est impossible de savoir quelle série de bifurcations sera empruntée par le système. Notons que les dates des bifurcations en cas d'événements contingents sont également imprévisibles, tout comme il est impossible de prédire combien de temps le système restera dans un état stable.

Il n'existe pas de contradiction entre le fait que l'évolution du système résulte d'événements contingents et la possibilité d'observer des changements réversibles. En effet, une série de bifurcations peut ramener le système dans un état qu'il occupait précédemment.

Il est important de revenir ici sur la notion de prédiction des évolutions d'un système. Si l'ensemble des contraintes et des forces qui pèsent sur le système est connu de façon exacte, il est alors possible théoriquement de calculer de façon déterministe l'évolution du système à partir d'un état initial. Le problème de nature computationnelle qui peut surgir est que la complexité du système rende impossible le calcul de son évolution, même si ce calcul est théoriquement possible.

Cependant, dès lors qu'il existe des contingences, toute prédiction devient impossible. Néanmoins, s'il est impossible de faire des prédictions sur l'état *spécifique* que prendra le système à une époque ultérieure, il est parfois possible de déterminer un *ensemble* d'états possibles qu'il pourra occuper, sans préciser lequel d'entre eux sera effectivement adopté. Cette possibilité de déterminer un ensemble d'états possibles est encore une fois dépendante de la capacité à appréhender la complexité du système. Ceci est en particulier rendu difficile par le caractère éventuellement non-linéaire des relations entre les composants du système, qui fait qu'une petite modification dans les paramètres peut engendrer de profondes transformations. C'est le fameux effet du battement d'aile du papillon, où un simple battement d'aile dans une région du globe peut avoir de profondes conséquences à des milliers de kilomètres de là.

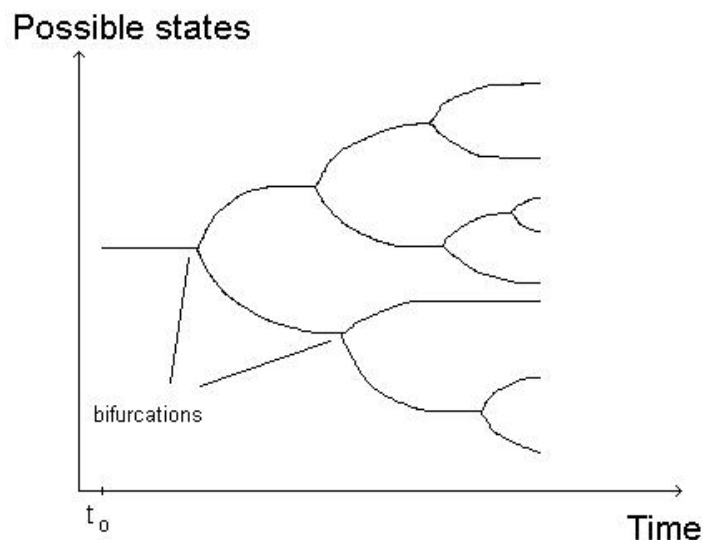


FIG. 2.11 – Evolution d'un système par bifurcations

L'ensemble des concepts précédents rejoint des propositions sur l'évolution des êtres vivants formulées par Maturana et Mpodozis [Maturana and Mpodozis, 1999]. De la même façon que l'état initial d'un système linguistique ne permet pas de déterminer ses états futurs, il n'existe pas de déterminisme génétique pour un être vivant, puisque celui-ci, dans un processus de *dérive structurelle*, dépend de tous les systèmes qui s'entrecroisent en lui, et ne peut pas voir ses caractéristiques dépendre d'un seul et unique de ces systèmes (i.e. un système génétique). Tout caractère d'un organisme découle d'un **processus épigénétique**, qui est une dérive structurelle ontogénétique. Si la structure initiale peut-être déterminée par un système génétique, l'histoire du système, sa dérive structurelle, s'inscrit dans un champ de possibilités de transformations ontogéniques (p. 25). Ce champ est un espace virtuel, et une seule dérive structurelle sera adoptée par le système comme succession moment après moment de ses interactions. Ces interactions qui prennent place dans l'environnement de l'être vivant sont analogues aux événements qui prennent place dans la sphère externe au système langagier.

Détermination des contraintes stables du système et stochasticité des phénomènes contingents

Une conséquence des remarques précédentes est que l'observation de l'évolution particulière d'un système ne permet pas de conclure directement quant aux contraintes qui pèsent sur lui. De part les événements contingents qui pèsent sur elle, l'évolution ne reflète pas exactement le jeu des contraintes. Dès lors, comment approcher et déterminer les contraintes qui pèsent sur les système linguistiques ?

Une seule évolution du système ne permet pas de conclure quant aux contraintes. Intuitivement, pouvoir remonter le temps et observer un grand nombre d'évolutions du système à partir

d'un même état initial ou d'états très voisins permettrait de mieux séparer les contraintes internes et externes stables des événements contingents.

Les nombreuses langues du monde et en particulier les langues d'une même famille permettent justement d'observer différentes évolutions possibles à partir d'un même état initial, comme une proto-langue commune. Une première approche "naturaliste" ou "*in vivo*" consiste donc à comparer les nombreuses langues du monde entre elles, pour tenter de dégager leurs similarités et différences, et à partir de là, séparer l'impact des contraintes internes et externes stables des événements sociaux contingents. Il s'agit de la typologie linguistique.

Une seconde voie de recherche consiste à construire un modèle du système, et de simuler son évolution à l'aide d'expériences informatiques. Cette approche "*in silico*" permet de répéter un grand nombre de fois l'évolution du système à partir d'un état initial et d'observer les différentes évolutions possibles. Ceci est exactement la méthode utilisée pour les prédictions météorologiques, où les éléments contingents sont simulés par du bruit lors de l'évolution du système atmosphérique terrestre. Si de nombreuses évolutions à partir de l'état initial conduisent à des états très voisins après une période de temps \mathbf{T} , alors le temps est prédictible avec un bon indice de confiance (car les événements contingents ou les imprécisions ont peu de chance de perturber l'évolution globale sous contraintes du système). Dans le cas d'une divergence importante des simulations, il est difficile de faire des prédictions et l'indice de confiance sera mauvais. Un autre exemple en biologie théorique est constitué des études de Fontana et Ballati sur les bases fondamentales de l'évolution biochimique : en effectuant de nombreuses simulations à partir d'un état initial simple et d'un moteur d'évolution basé sur des combinaisons aléatoires des molécules entre elles, ils montrent que l'émergence de structures d'ordre supérieur et de répliqueurs sont des caractéristiques stables de l'évolution qui échappent aux phénomènes contingents [Fontana and Buss, 1994].

Compétition entre variantes

De nombreuses fluctuations et des changements sont perpétuellement à l'œuvre dans un système langagier. Parmi ces changements, certains peuvent concerner les mêmes composants linguistiques, et être donc en compétition.

La compétition entre changements linguistiques se manifeste à plusieurs niveaux. Elle est tout d'abord l'un des mécanismes de l'acquisition où différentes hypothèses en compétition sont testées par l'enfant pour déterminer celle qui correspond réellement à la situation linguistique environnante [Yang, 2000].

Les études informatiques sur l'émergence du langage mettent également en valeur la compétition qui peut exister entre différents mots du lexique dans l'"esprit" d'un individu, comme le montre la figure 2.12 reproduite d'après [Steels, 1996]. Lorsqu'un agent doit dénommer un concept ou un objet du monde, il peut parfois choisir entre plusieurs mots qui correspondent au concept en jeu. Au cours du temps (au cours de l'acquisition, ou lors d'une hypothétique émergence d'un lexique), l'utilisation d'un ou quelques mots peut devenir préférable à celle des autres. si l'on représente la probabilité qu'un mot soit choisi au cours du temps, on va dès lors observer des variations de cette probabilité selon les situations. La figure 2.12 propose un exemple où après une période de fluctuation où les mots ont des probabilités voisines d'être choisis, un des mots prend l'avantage sur les autres et devient le seul à être utilisé pour le concept en jeu.

La compétition entre changements est également significative dans la population, où des changements initiés par différents individus ou groupes linguistiques peuvent s'opposer. Si deux

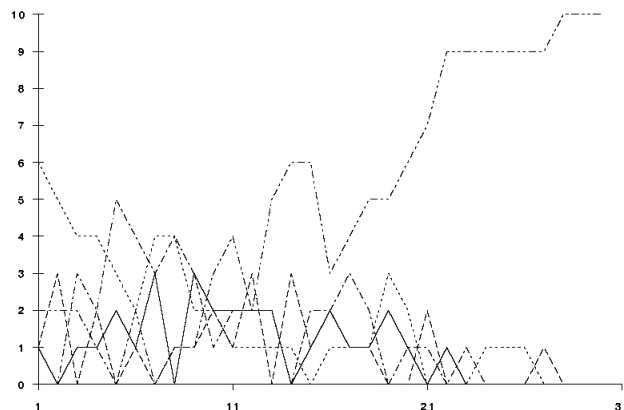


FIG. 2.12 – Compétition entre mots pour l'émergence d'un lexique [Steels, 1996]

variantes existent dans une population par le biais d'une répartition géographique ou d'une structuration sociale, l'une d'entre elles peut finir par prendre le pas et se généraliser à la faveur par exemple d'un changement social ou historique.

Dans le cadre de sa théorie de la diffusion lexicale, Wang a proposé que les irrégularités observées dans les motifs ("*patterns*") de changements phonétiques du lexique soient dues à la compétition entre plusieurs changements [Wang, 1969]. Les théories néo-grammairiennes avaient auparavant toujours buté sur ces irrégularités qui allaient à l'encontre du postulat de la *régularité* du changement. En prenant le problème à contre-pied, Wang a proposé qu'un changement ne soit régulier que s'il est le seul à prendre place pour l'ensemble des morphèmes concernés, et que dans le cas contraire, le processus de compétition puisse entraîner l'arrêt des changements et l'existence de **résidus**, c'est à dire de morphèmes non transformés :

"A sound change is regular if no other changes compete against it. But there are situations in which two (or more?) changes are applicable to the same subset of morphemes at the same time. Such situations leave residues which are the direct consequences of sound changes that were prevented from running their full course." [Wang, 1969] (p. 10)

Directionnalité des changements

Une des grandes questions de la linguistique concerne l'évolution du langage en tant que progrès ou décadence. En plus de la difficulté inhérente à la définition de ces deux notions, Jean Aitchison souligne l'évolution des idées à ce sujet, marquée par les contextes socio-scientifiques des différentes époques [Aitchison, 1985] : déchéance depuis un état primitif parfait au XIXème siècle (on retrouve ici les idées de Rousseau), puis au contraire conception d'un progrès suite à l'inscription des langues dans le paradigme darwinien d'un progrès graduel des espèces et de la survie des organismes les mieux adaptés (p. 224-225).

La question d'une tendance évolutive des évolutions est au centre des débats des théories de l'évolution des espèces. La théorie de Darwin, en mettant l'accent sur le caractère adaptatif des évolutions, a profondément enraciné l'idée d'un progrès des espèces comme vu plus haut. Cette

idée a cependant été remise en question au cours du XX^{ème} siècle.

La notion de niche écologique a été invoquée pour rendre compte du fait que l'évolution des espèces se fait sans direction *a priori* : le changement de comportement d'une espèce peut entraîner un déplacement d'une niche écologique (terme regroupant l'environnement dans lequel l'espèce trouve sa place et est soumise à un certain nombre de contraintes) vers une autre (une modification de l'alimentation par exemple, qui rend l'espèce dépendante d'un nouveau type de nourriture). Certaines contraintes étant propres à un contexte particulier, les pressions évolutives changent à chaque nouvelle niche écologique, et ce qui pouvait favoriser les individus d'une espèce dans une niche particulière peut devenir neutre voire défavorable dans une seconde. Dès lors, la notion d'adaptation se dote d'un caractère local et relatif à un contexte écologique spécifique. On se remémorera ici les propositions de Dessalles sur l'optimalité locale du langage (voir chapitre 1).

Gould s'est élevé avec vigueur contre l'idée de progrès global suggérée par les travaux de Darwin. En mettant l'accent sur l'aspect local des adaptations de la sélection naturelle, et sur les multiples événements qui peuvent influencer les tendances évolutives (un exemple frappant est celui de l'astéroïde qui mit probablement fin à l'ère des dinosaures il y a 65 millions d'années), il rejette l'idée selon laquelle une notion de progrès au sens large dirige l'évolution des espèces [Gould, 1994].

Gould explique en outre l'impression de progrès et de complexification que l'observateur peut avoir par l'existence d'un "effet de mur". Dessalles rend compte de cet effet [Dessalles, 2000] (p. 93-94) : si l'on suppose une variable représentant la complexité d'un organisme et une distribution de la complexité pour un ensemble d'espèces, on peut observer trois scénarios d'évolution de la complexité au cours du temps. Dans un premier cas, la diversification des espèces produit un accroissement de la variance de la complexité et un élargissement de la courbe de distribution (figure 2.13. En cas de tendance, la variance va non seulement augmenter, mais la moyenne va également se décaler dans le sens d'une plus grande complexité moyenne de l'ensemble des espèces. C'est ce second scénario qui représente l'idée d'un progrès (figure 2.14). Gould pense cependant que cette situation ne se présente pas de façon globale dans la nature, et qu'il faut lui préférer selon les cas le premier cas de figure, ou une troisième hypothèse : l'existence d'un "effet de mur", qui contribue à donner l'impression d'une tendance évolutive sans que celle-ci soit réelle. La barrière représente en fait la complexité minimale de tout organisme vivant. Elle implique que l'augmentation de la variance lors de la diversification ne peut se faire que dans la direction opposée à la barrière, c'est à dire dans le sens d'une plus grande complexité (figure 4.22). Dès lors, l'être humain représente un cas extrême de complexité, mais sans qu'une tendance évolutive soit responsable de cet état de fait. Une simple diversification biaisée des espèces est un mécanisme suffisant. Gould ajoute en outre que les formes les plus simples de vie (les bactéries) sont toujours celles qui dominent notre planète, comme l'implique le dernier (ou le premier) scénario :

"This is truly the "age of bacteria" - as it was in the beginning, is now and ever shall be."
[Gould, 1994]

La même question de l'existence d'une tendance évolutive s'applique pour les langues. Comme le rappelle Aitchison, la notion de progrès est difficile à définir : si l'on considère les langues qui expriment le plus d'information avec les formes les plus simples comme les plus performantes, alors les pidgins représenteraient les langues les plus avancées. Cependant, une trop grande simplicité (avec par exemple des mots très courts) se heurte rapidement aux ambiguïtés comme celles

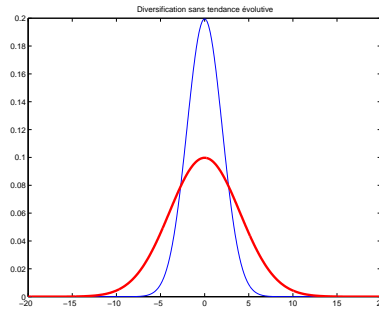


FIG. 2.13 – Evolution par diversification sans tendance évolutive

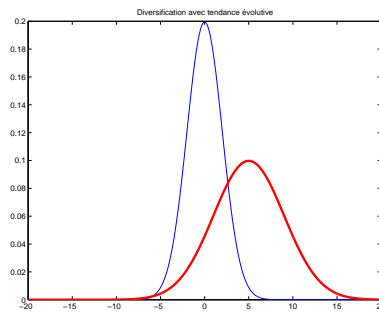


FIG. 2.14 – Evolution par diversification avec tendance évolutive

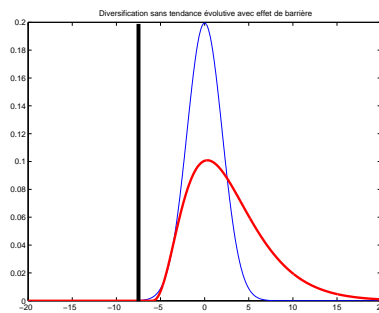


FIG. 2.15 – Evolution par diversification sans tendance évolutive mais effet de barrière

créées par les homophones [Aitchison, 1985] (p. 226). Il est ainsi difficile de définir les facteurs qui rendraient compte d'une plus grande "qualité" des langues. Intuitivement, une parcimonie cognitive à tous les niveaux, une économie en production et en perception doivent être alliées à une grande performance de transmission de l'information. En outre, il est possible d'envisager que des facteurs comme la qualité de la langue comme moyen d'expression de son identité sociale jouent un rôle important (voir chapitre 4 pour une étude détaillée de tous ces aspects).

Les théories de Gould ont été mises à profit en linguistique, que ce soit pour aborder le problème de l'émergence du langage comme l'a fait Dessalles, mais également dans le champ de la linguistique historique pour rendre compte de l'évolution des langues.

Le point principal est qu'il ne semble pas y avoir de tendance évolutive dans l'évolution des langues, et que ces dernières ont toutes qualitativement aujourd'hui la même complexité, comme le rappelle Aitchison :

"Overall, then we must conclude that the evolution of language as such has never been demonstrated, and the inherent equality of all languages must be maintained on present evidence." [Aitchison, 1985] (p. 229)

Comme nous l'avons déjà vu plus haut, l'absence de tendance évolutive générale n'est pas en désaccord avec l'existence de modifications adaptatives locales. Thomason et Kaufman proposent ainsi le terme de "*déséquilibre structurel*" (*structural imbalance*) pour les structures linguistiques, et l'existence de changements motivés par de tels déséquilibres internes au système (*internally-caused*) [Thomason and Kaufman, 1991]. Cette vision des choses est cependant contestée par d'autres chercheurs, comme Mufwene qui prétend que les changements ne proviennent que d'une dérive, et ne se produisent pas pour "réparer" une déficience du système [Mufwene, 2001] (p. 11-12).

2.3.7 Interférences et structure du système linguistique

Nous avons déjà évoqué plus haut à plusieurs reprises la théorie de Maturana et Mpodozis. Selon celle-ci, les êtres vivants sont structurellement déterminés, et ce qui leur arrive est nécessairement déterminé par leur dynamique structurale propre [Maturana and Mpodozis, 1999] (p. 14).

Les deux auteurs proposent également que pour un être vivant dans son champ d'interactions (c'est à dire dans l'environnement où il entre en contact avec d'autres organismes et éléments), on puisse distinguer deux domaines opérationnels distincts : celui de sa dynamique structurale, désignée habituellement par "physiologie", et celui propre à sa dynamique interactionnelle et relationnelle, qui est dénommé par le terme **conduite**. Le déterminisme structurel des êtres vivants implique que ces deux domaines soient opérationnellement disjoints, et non opérationnellement réductibles l'un à l'autre. Il en découle que les conduites surgissent dans le cadre de la dérive structurale, mais ne sont pas causées par elle, et qu'inversement les conduites ne déterminent pas la dynamique structurale de l'être vivant. Toutefois, les conduites déterminent à chaque instant le contexte des interactions de l'être vivant dans sa niche, et si elles ne déterminent pas les changements d'état qui surgissent lors des interactions, elles agissent en tant que **gâchettes** (p. 28-30).

Ces propositions de Maturana et Mpodozis se rapprochent de la perspective structuraliste en

linguistique, même si une transposition directe et absolue est trop abrupte. Si le paradoxe Saussurien dans sa version extrême se révèle incompatible avec la réalité des phénomènes linguistiques, l'idée d'un certain déterminisme structurel des langues reste envisageable. Il se traduirait de la façon suivante : les phénomènes extérieurs au système langagier (tel que nous l'avons défini), tels les événements sociaux, surgiraient dans le cadre de la dérive structurale des langues, mais ne seraient pas causés par elles, et inversement, la dynamique structurale du système ne serait pas déterminée par ces événements. Ceux-ci participeraient cependant à la dérive structurelle en agissant en tant que "triggers". On retrouve ici la notion d'espace d'états possibles, dont la topologie définit l'ensemble des états admissibles d'un système linguistique.

Une telle proposition, si elle était vraie, ne doit pas mener à la conclusion d'un progrès des langues ou plus généralement d'une tendance évolutive. Il s'agit bien d'une dérive, comme le postulent Maturana et Mpodozis ou encore Gould pour les êtres vivants.

Le problème d'un possible déterminisme structurel se pose en particulier pour les situations de contact entre deux communautés de langues différentes. La question qui rend pertinente la problématique précédente est de savoir s'il est possible à partir des systèmes initiaux de prédire partiellement le résultat du contact, *non pas en prédisant la forme qui sera observée dans la réalité, mais en décrivant un champ des possibles pour les structures finales qui soit un sous-ensemble de l'espace des possibles*. Thomason et Kaufman critiquent cette possibilité dans le cadre des contacts linguistiques [Thomason and Kaufman, 1991] :

"From Meillet, Sapir, and the Prague linguists to Weinreich to the most modern generativists, the heirs of Saussure have proposed linguistic constraints on linguistic interference. These constraints are all based ultimately on the premise that the structure of a language determines what can happen to it as a result of outside influence. And they all fail." (p. 13-14)

Les deux auteurs insistent sur le fait que lors d'un contact, toute structure linguistique peut être transférée d'un langage vers un autre, ce qui semble aller à l'encontre d'une quelconque dynamique structurale des langues. L'apparition des clicks dans une partie des langues bantoues à la suite des contacts avec les populations khoïsanés est un exemple de ce phénomène.

Néanmoins, nous pouvons nous poser la question de savoir si l'impossibilité de rendre compte des transformations des langues lors d'un contact vient réellement discréditer l'application des concepts de la théorie de Maturana et Mpodozis aux changements linguistiques. En effet, la non-linéarité des phénomènes et la complexité des interactions linguistiques peuvent rendre difficile la prédiction ou la compréhension des changements qui s'opèrent dans les langues concernées. Le problème est alors plus de nature computationnelle que conceptuel.

En outre, comme nous l'avons déjà souligné, les contraintes internes qui pèsent sur un système langagier sont faibles, et nombre de changements qui ne créent pas de forts déséquilibres structurels peuvent être admis par la structure initiale du système. Si l'examen de très nombreuses situations de contact peut donner l'impression que tout peut être emprunté, il est difficile de prendre en compte un très large ensemble de structures linguistiques simultanément, et il est possible que les schémas d'évolution et de transformations reflètent bien l'impact des structures linguistiques initiales, mais de façon très complexe. La question est surtout ici celle du ratio des influences structurelle et sociale sur les changements linguistiques.

Les racines du déterminisme structurel sont à trouver dans le phénomène d'acquisition de la langue et dans les interactions sociales entre les individus. Dans le premier cas, si un enfant peut apprendre n'importe laquelle des langues du monde à sa naissance, il l'apprend toujours

de locuteurs parlant un ensemble fini d'idiolectes, et les mécanismes d'acquisition s'appuient forcément sur les structures des langues mères s'il n'existe pas de "rupture de transmission". C'est cette continuité, si l'on fait abstraction de quelques transformations dues aux degrés de liberté de l'apprentissage, qui explique qu'un certain déterminisme structurel puisse persister. Toutefois, cette persistance apparaît comme médiée par l'acquisition, et certaines caractéristiques de ce processus peuvent ainsi créer des décalages (*shifts*) dans la préservation structurelle des langues. En ce qui concerne les interactions sociales entre individus, le développement de "lingua franca" ou de pidgins correspond à la nécessité d'établir des liens entre les individus. Le rapprochement au niveau linguistique se fait en piochant parmi l'ensemble des caractéristiques des langues mères (dans le *feature pool* composé par celles-ci, pour reprendre l'expression de Mufwene [Mufwene, 2001], voir par exemple les pages 4 et 5).

2.4 Conclusions

Nous avons tenté de développer dans ce chapitre un point de vue sur l'évolution linguistique qui emprunte aux approches systémique et structuraliste des termes et des notions propres à saisir d'une façon générique l'évolution des systèmes dynamiques complexes.

A l'aide de comparaison avec l'évolution des espèces, nous avons tenté de mettre en valeur différents points de vue, et une orientation générale des chercheurs à ne plus considérer une évolution globale des langues vers des états plus cohérents ou plus performants.

Nous pensons que des changements peuvent être induits par des déséquilibres structuraux et peuvent rétablir ou perturber un équilibre structurel. Cependant, comme pour l'évolution des espèces, cette adaptation est *locale* vis à vis de la structure linguistique entière, et nous pouvons envisager l'existence de "niches linguistiques" constituées par le reste de la structure pour des éléments particuliers de celle-ci. A un niveau plus global, l'opposition entre les contraintes crée un ensemble de niches écologiques pour les systèmes linguistiques, qui peuvent passer de l'une à l'autre de façon contingente. Ceci a pour effet d'annuler les différentes tendances évolutives.

Comprendre l'impact des facteurs sociolinguistiques nous paraît fondamental pour bien assimiler ces phénomènes. Il nous apparaît en particulier très important de bien comprendre comment les transformations motivées par des contraintes sociolinguistiques peuvent faire évoluer les systèmes linguistiques dans une direction ou dans une autre. En fonction d'un paysage énergétique aux reliefs plus ou moins marqués, comment les changements sociolinguistiques vont-ils permettre au système d'évoluer, de passer éventuellement d'un état de faible énergie à un autre, ou de se stabiliser dans l'un de ces états ?

La question est de déterminer si l'absence de tendance évolutive marquée des langues vers des systèmes optimaux en regard de l'ensemble des jeux de contraintes est bien une conséquence de l'ensemble des contraintes en général, ou si au contraire des états nettement plus optimaux que d'autres existent, mais ne sont pas des états stables du fait des forces extérieures au système linguistique. Dans le premier cas, les contraintes peuvent s'"annuler" ou sont trop faibles, et il n'existe pas d'états optimaux : les langues évoluent dans un espace des possibles sans que des états jouent le rôle d'attracteur pour ces systèmes linguistiques, et partagent en conséquence une adéquation semblable aux contraintes. Si l'on repense aux paysages énergétiques évoqués dans la première partie de ce chapitre, ceci correspond à un paysage au relief très peu marqué, sans presque aucune barrière énergétique à franchir pour passer d'un état à un autre (voir figure 2.16). Dans le second cas (figure 2.17, des optima plus importants peuvent exister de façon locale

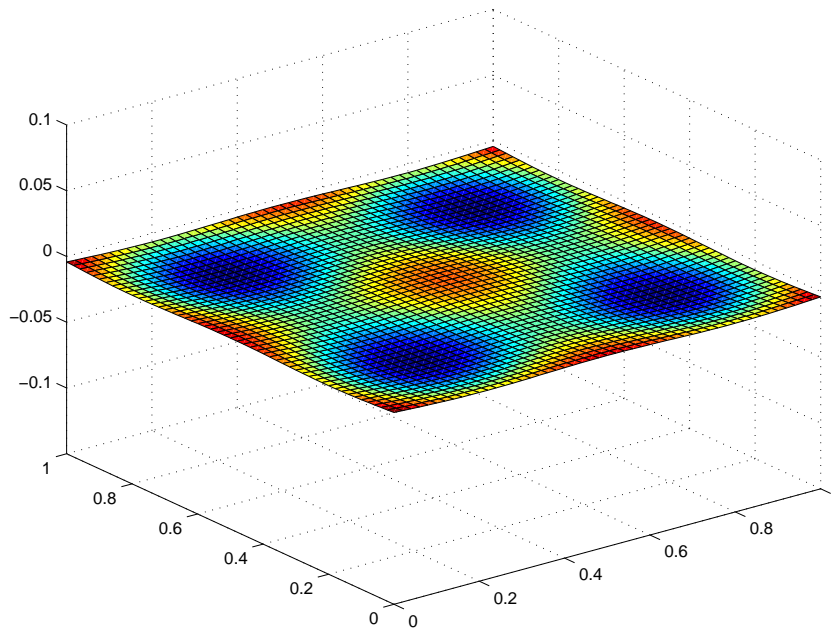


FIG. 2.16 – Un paysage énergétique plat sans états optimaux

(le relief contient un ensemble de puits assez profonds), mais les phénomènes sociolinguistiques rendent la convergence vers ces états difficile, ou les rendent instables.

Répondre aux questions précédentes est difficile à partir des données linguistiques seules. Notre but au chapitre 6 sera d'aborder cette question à l'aide de simulations informatiques. Sans prétendre aucunement résoudre la question, nous espérons pouvoir dégager certains phénomènes dynamiques allant dans le sens d'une hypothèse ou d'une autre.

Vue sous un angle différent, cette question repose le problème du déterminisme structurel des systèmes linguistiques, comme nous avons tenté de l'aborder à l'aide de la théorie de Maturana et Mpodozis. Peut-on considérer les langues comme des systèmes dont l'évolution structurale est opérationnellement distincte des phénomènes sociaux, ou ceux-ci modifient-ils les systèmes linguistiques de façon intrinsèque ?

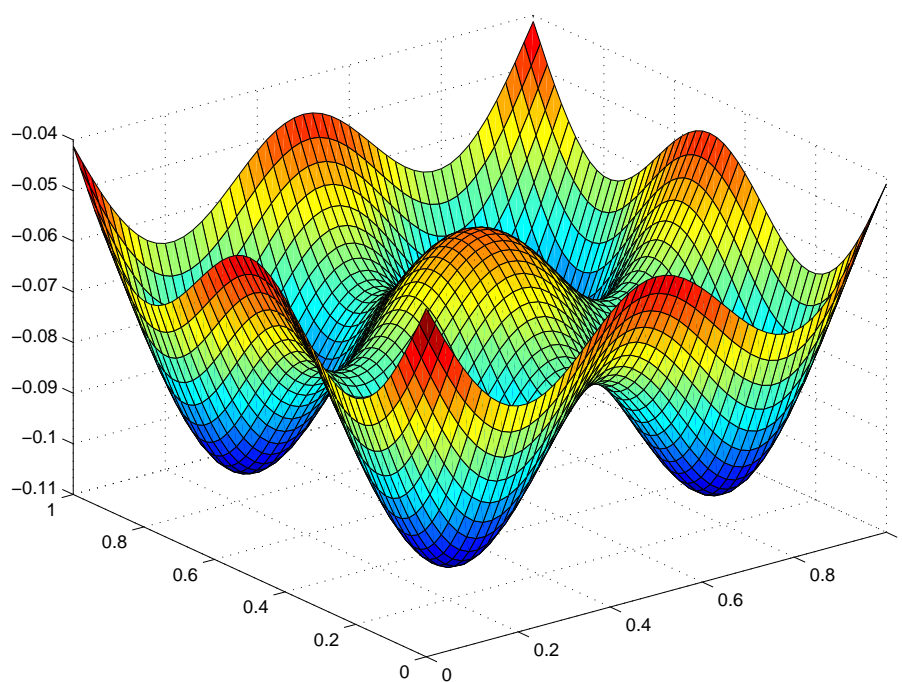


FIG. 2.17 – Paysage énergétique présentant une topographie marquée

Chapitre 3

Modèles, simulations et outils informatiques

If people do not believe that mathematics is simple, it is only because they do not realize how complicated life is.
John von Neumann.

L'informatique et la modélisation (principalement issue à l'heure actuelle de l'intelligence artificielle) constituent un champ en plein essor pour l'étude de l'origine du langage, et de l'évolution des langues dans une moindre mesure. Un bon indicateur de cette tendance est le nombre croissant de “modélisateurs” qui présentent leurs travaux dans le cadre de conférences sur l'évolution du langage.

Face à des questions aux réponses parfois peu intuitives, un modèle et son implémentation informatique représentent souvent un champ d'investigation fructueux. Ils permettent par exemple d'identifier les raisons minimales permettant d'expliquer un phénomène réel, et de simplifier ainsi l'enchaînement des causes et des effets. Les puissances de calcul sans cesse croissantes permettent de simuler des situations appartenant au passé ou échappant à l'expérimentation physique.

Après un très rapide historique de l'évolution des techniques informatiques, nous tenterons de définir ce qu'est un modèle, avant de définir quelques grands paradigmes utilisés pour la recherche sur l'origine du langage, et présenter rapidement les recherches qui ont été menées jusqu'à aujourd'hui. Dans une seconde partie, nous présenterons les outils logiciels que nous avons développés pour nos simulations.

3.1 Panorama des recherches informatiques sur l'origine et l'évolution du langage et des langues

3.1.1 Une brève histoire de l'informatique

De la machine de Neumann aux super-calculateurs neuronaux

L'informatique trouve ses racines dans les premières machines mécaniques des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle : la Pascaline de Pascal en 1643, qui réalisait l'addition et la soustraction, la machine de Leibniz en 1673, qui réalisait elle les 4 opérations de base, le canard mécanique de Vaucanson en 1738, la machine de Babbage en 1833, réalisée initialement pour le calcul de tables numériques pour la navigation et qui intégrait nombres des découvertes précédentes. . .

Le XIX^{ème} siècle verra l'émergence d'une logique dégagée de la philosophie et orientée vers les mathématiques, avec notamment les travaux de Boole (fondateur de l'algèbre de Boole), Frege, Russel ou Hilbert. Cette logique servira de base à l'informatique théorique du XX^{ème} siècle et aux travaux des logiciens de ce même siècle.

A la suite des premières réalisations purement mécaniques, l'invention de l'électricité permit l'apparition des premières machines électro-mécaniques, puis des machines électroniques suite à l'invention du transistor (en 1947 par John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley des laboratoires Bell) et des circuits intégrés (en 1959 chez Texas Instruments).

D'un point de vue technique, l'informatique va surtout se développer pendant la seconde guerre mondiale, avec les besoins de l'armée américaine, en particulier pour des questions de cryptographie (encodage et décryptage de messages secrets), de calculs de tables de tirs ou de localisation de sous-marins. Elle va aussi servir au développement de la première bombe A. Une des premières simulations sera d'ailleurs celle du calcul de la hauteur optimale pour l'explosion de la bombe.

Sur un plan théorique, le milieu du XX^{ème} siècle va consacrer la naissance de l'informatique théorique, avec les travaux de grands mathématiciens, logiciens et ingénieurs comme Kurt Gödel (1906-1978), Alan Turing (1912-1954) (qui a joué un rôle considérable dans la découverte des codes secrets allemands) et John Von Neumann (1903-1957). Le second, en introduisant le concept de machine universelle (la machine de Turing), établit les limites des machines sur les plans philosophique et calculatoire. Von Neumann établit quant à lui l'architecture qui porte son nom, et qui est toujours celle de la très grande majorité des ordinateurs d'aujourd'hui (voir la figure 3.1).

A la fin des années 1940, on assiste également au développement de la cybernétique, initiée par l'américain Norbert Wiener (1894-1964) en 1948, ainsi que de la théorie de l'information, dont les bases sont dues à Claude Elwood Shannon (1916-2001).

D'une façon générale, la seconde partie du XX^{ème} siècle verra ensuite l'accroissement de la puissance des machines parallèlement à leur miniaturisation, et le développement de systèmes d'exploitation (Unix, IBM (34, 38. . .), AS-400, Windows, Linux. . .) et de logiciels toujours plus performants. Un ordinateur de plusieurs tonnes, qui occupait une pièce entière il y a 50 ans, et aujourd'hui remplacé par un portable de moins de deux kilogrammes. . .

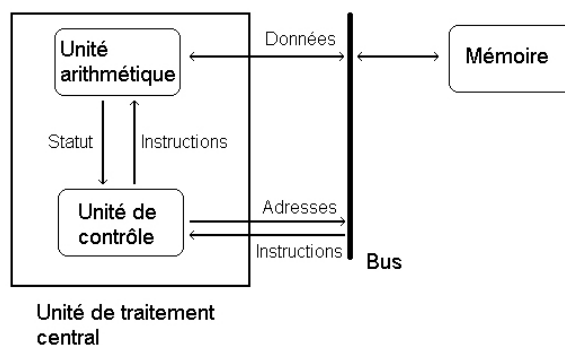


FIG. 3.1 – L'architecture de Von Neumann

Tendances évolutives de l'informatique

La tendance générale de l'informatique depuis plusieurs décennies est une envolée vers toujours plus de puissance : plus de puissance de traitement, mais aussi de mémoire, de capacités de stockage ou encore de techniques graphiques. . . La loi exponentielle qui régit cette progression n'est toujours pas contredite à l'heure actuelle, malgré l'approche des limites de miniaturisation des composants (à une échelle inférieure, les lois de la mécanique quantique viennent troubler le bon fonctionnement de la machine). Les nouveaux composants quantiques ou optiques laissent cependant envisager des gains en puissance toujours plus importants pour le futur.

Cette progression a bien sûr permis et continuera à permettre des simulations toujours plus lourdes. Si une simulation n'est pas toujours "gourmande" en ressources, la répétition d'un grand nombre d'expériences (pour étudier des jeux de paramètres par exemple, ou étudier des phénomènes stochastiques) ou certains phénomènes complexes (simuler un grand nombre de locuteurs par exemple) nécessitent une puissance importante pour ne pas nécessiter des jours ou des mois de traitement.

Parallèlement à cette tendance, on peut aussi noter le développement d'analogies avec la nature et le réel. Ces analogies peuvent se rencontrer au niveau des techniques de modélisation, mais également au niveau du matériel, avec le développement de nouvelles architectures, comme celles à base de processeurs massivement parallèles.

3.1.2 Modélisation et simulations informatiques

Qu'est-ce qu'un modèle ?

Nous pouvons définir un modèle comme une abstraction d'un phénomène qui permet, à travers une simplification du réel, d'appréhender les mécanismes de ce phénomène. Il s'agit en effet de parvenir à éliminer les éléments non pertinents vis à vis du phénomène (le "bruit", la variation aléatoire de certaines grandeurs) pour mieux se consacrer aux paramètres significatifs.

La modélisation d'un phénomène repose sur une "technique de modélisation" qui peut emprunter des formes très variées, selon les caractéristiques du phénomène étudié ou les présupposés du modélisateur. De très nombreuses approches cohabitent pour la modélisation de phénomènes biologiques, physiques, linguistiques. . . Nous pouvons citer pour exemple une approche mathé-

matique très répandue dans de nombreux domaines, les équations différentielles, dans la grande variété qui les caractérise [Murray, 1984] :

- en physique : développement des tâches des robes de nombreux animaux, écoulements d'air ou de fluides ;
- en chimie : évolutions des concentrations lors d'une réaction chimique, cinétiques de réactions (catalyseurs, inhibiteurs. . .) ;
- en biologie : évolution des populations, diffusion d'épidémies ;
- en linguistique : modélisation du phénomène de diffusion lexicale [Wang, 2002a].

Selon la situation à modéliser, les équations différentielles ne sont bien sûr pas forcément judicieuses. Leur emploi suppose ainsi des phénomènes suffisamment réguliers que l'on puisse représenter par des variables (pseudo-)continues.

Notons que la notion de modèle semble proche de celle de théorie, mais à la différence du modèle, il nous semble que la théorie ne s'appuie pas nécessairement sur une réduction du phénomène réel qu'elle étudie.

Rôle de la simulation

*Une somme d'expériences ne peut jamais me prouver que j'ai raison ;
une seule expérience peut n'importe quand me prouver que je me suis trompé.*
Albert Einstein.

Construire un modèle et en disposer est une première chose, tester sa validité en est une autre. Dans certaines situation, ce test peut s'effectuer en comparant les prédictions du modèle à la réalité. Un exemple très célèbre est la vérification de la théorie de la relativité générale d'Einstein lors d'une l'éclipse totale de soleil en 1916 : l'observation d'étoiles à proximité du soleil masqué par la lune confirme la courbure des rayons lumineux par la masse solaire. Toujours dans le cadre de la relativité générale, l'application du modèle aux mesures du périhélie de Mercure permet de corriger les erreurs minimales de calculs qui persistaient avec le modèle newtonien, et de valider ainsi partiellement le nouveau modèle.

Il existe toutefois des cas où il n'est pas possible de tester directement un modèle par simple observation des faits²⁵. L'expérimentation peut alors remédier au problème, et la simulation informatique fait partie des expérimentations possibles. De nombreux modèles sont trop complexes pour qu'on puisse en concevoir immédiatement les effets. Nous pouvons prendre l'exemple de la modélisation de la circulation de Los Angeles : il est possible d'élaborer un modèle de la circulation, mais impossible d'envisager les prédictions de ce modèle sans une simulation informatique, si le nombre de véhicules pris en compte est un tant soit peu important. Des simulations sont donc effectuées, qui permettent de visualiser les résultats du modèle, et d'envisager des solutions pour fluidifier la circulation.

²⁵Il est à noter que la modélisation informatique peut parfois aussi remplacer avantageusement la réalisation d'expériences réelles : explosions nucléaires, "crash-tests" automobiles. . .

Daniel Nettle propose une vue légèrement différente de l'intérêt des simulations informatiques. Plus que de vérifier un modèle, il s'agit ici également de participer à son élaboration. Les simulations servent à éliminer les "ingrédients" du modèle qui ne joueraient pas un rôle indispensable dans l'engendrement du phénomène observé. Il peut en effet être difficile de détecter *a priori* de tels éléments si la complexité du phénomène est importante. La démarche est ici constructive :

"A computer simulation is never a realistic replication of the situation it aims to elucidate. Thus it can very rarely be used to make precise empirical predictions about real world processes. One might therefore ask what the point is of doing it. The answer is that though it is not a total replication of a real world situation, it attempts to take to take the main relationships of a real world situation and explore their general effects across a range of conditions. This is useful because complex iterated processes of the kind found in social evolution can have unlooked-for, complex dynamics which cannot be predicted by simple thought or deduction. A simulation, however rudimentary, is thus an improvement over a merely verbal argument, in deciding what general conditions must obtain for languages to evolve in the way that they do. It is in this spirit that I would like the following simulation to be taken; highly simplistic, but, I hope, interesting as a way of exploring issues surrounding language change which is more systematic and better supported than mere speculation.

Critics of computer simulations often complain that the author has simply built into the model whatever he desires, so when that desideratum results it is not interesting. This is a misunderstanding of what simulations such as this one are for. I will indeed tweak this system until it produces results that resemble real linguistic change in some ways. The interest lies therefore not in what it can be made to do, but rather in what assumptions and initial conditions have to be included to make it behave in the desired way. These assumptions and conditions may give us some general insights into the conditions of real language change." [Nettle, 1999c] (p. 103)

La démarche adoptée par Nettle nous semble la plus judicieuse qui soit. Elle ne prend toutefois pas vraiment en compte, ou ne la mentionne pas explicitement, la possibilité d'observer parfois des événements qui étaient imprévisibles à cause d'une grande complexité computationnelle. Observer des phénomènes imprévus permet souvent de soulever de nouvelles questions, en s'interrogeant sur l'existence du phénomène dans la réalité et sur ses conséquences. La démarche se fait ici plus exploratoire, dans le sens où le but du modèle est alors de mettre à jour des phénomènes complexes à partir d'un jeu de conditions particulier, plutôt que de découvrir les conditions minimales nécessaires à l'existence d'un phénomène donné *a priori*.

Comme le souligne Nettle, une simulation, même rudimentaire, est toujours plus forte qu'un argument verbal. Même dans des situations où les données de la discipline concernée ont abouti à un consensus clair et des théories bien acceptées, des simulations peuvent être utiles pour confirmer ces dernières et éventuellement découvrir des difficultés non suspectées. Toute théorie s'appuie toujours sur un certain nombre de présupposés, et comme dans une démonstration mathématique, les points les plus difficiles sont souvent ceux qui sont considérés comme triviaux. . . . Un examen approfondi de situations complexes peut ainsi mettre au jour des impossibilités et entraîner une réforme des théories. Ce scénario peut être envisagé par le biais de simulations informatiques, mais également à l'aide d'autres outils, et les progrès scientifiques sont le plus souvent accomplis sur la base d'une remise en question des théories bien établies [Kuhn, 1983].

Mathématisation et modélisation

Toute la nature n'est que mathématique.
Galilée.

Nous avons introduit dans la section précédente le modèle mathématique des équations différentielles comme outil possible de modélisation d'un phénomène réel. Il est intéressant de constater que nombre de phénomènes réels ne peuvent être modélisés sous une forme mathématique (ceci n'est d'ailleurs souvent pas le but des auteurs de modèles). D'autres peuvent parfois être représentés à un certain niveau par un système mathématique, mais celui-ci est souvent trop complexe pour pouvoir être résolu par une méthode analytique. Les frontières de résolution exacte de systèmes comme ceux d'équations différentielles sont en fait vite atteintes, et la simulation numérique seule permet une résolution approchée du système. Il est à noter que la simplicité du modèle mathématique ou la possibilité même d'utiliser un modèle mathématique dépend bien sûr du niveau de détail avec lequel se fait la description du phénomène réel dans le modèle, en particulier selon les approximations qui y sont effectuées. On pourra se référer à [Popescu-Belis, 2002] pour juger de ces notions dans le cadre de modèles mathématiques liés à l'émergence de conventions lexicales dans une population d'agents.

Nous venons de présenter quelques points relatifs à la modélisation et à la simulation. Comment s'inscrivent les questions de l'origine et de l'évolution du langage et des langues dans ce contexte ? Parmi les nombreux modèles qui peuvent être échafaudés autour de cette question, un certain nombre se rapportent à des spécificités que nous avons déjà évoquées dans les premier et second chapitres : absence de fossiles linguistiques, dynamique complexe de populations de locuteurs avec une certaine variabilité inter-individuelle. . . Des paradigmes particuliers et des simulations, que nous allons maintenant détailler, peuvent mettre au jour des éléments nouveaux difficiles à découvrir par d'autres approches.

3.1.3 Principaux paradigmes de modélisation

Afin de tenter de faire le tri entre différentes approches, nous pouvons mentionner trois caractérisations du langage qui représentent assez bien les conceptions des modélisateurs, et qui se rapprochent des trois dimensions du langage développées au chapitre 2 :

- le langage est un système distribué dans une population de locuteurs. Il s'agit avant tout d'un outil d'échange d'information, dont les caractéristiques reposent sur les interactions entre individus ;
- le langage est un système dynamique adaptatif complexe. Il est composé de différents niveaux et structures qui évoluent de façon entrelacée et complexe, en s'adaptant aux besoins de communication ;
- le langage est un outil ou système **cognitif**, transmis de génération en génération grâce à des phases d'acquisition.

Ces définitions même appellent différentes questions, qui constituent la base du travail des modélisateurs :

- comment des interactions diadiques entre individus peuvent-elles conduire à l'émergence de conventions partagées par toute une communauté d'individus ?
- quel est l'impact des structures sociales, physiologiques et psychologiques des individus sur la structure du langage qu'ils utilisent, que ce soit au niveau lexical, phonologique, syntaxique... ?
- comment l'acquisition de la syntaxe est-elle possible dans un cadre théorique particulier (théorie des principes et des paramètres, systèmes cognitifs non dédiés au langage...)?
- quels sont les facteurs d'évolution du langage et des langues ?

Afin d'aborder ces questions, différents paradigmes de modélisations, plus ou moins mathématiques, offrent des propriétés intéressantes et "miment" d'une certaine façon les phénomènes réels. Les paragraphes suivants détaillent les plus couramment utilisés.

Les systèmes multi-agents

La notion d'agent est née à la fin des années 1980, dans le prolongement de la notion d'objet que nous décrirons par la suite. Un agent se définit comme une entité autonome, dotée de propriétés, et capable d'interagir avec son environnement, et en particulier avec d'autres agents, éventuellement de même nature.

Comme son nom l'indique, un système multi-agents (SMA) est un ensemble d'agents. La capacité d'interaction qui les caractérise va pouvoir être utilisée à plusieurs fins, par exemple pour résoudre un problème donné de façon décentralisée (on parle d'*intelligence artificielle distribuée* ou *IAD*).

Les deux définitions précédentes se situent à un niveau très conceptuel, et laissent par conséquent une grande liberté dans la définition de l'agent dans un contexte donné. Dans le cadre de la modélisation, le degré de complexité des concepts, phénomènes ou organisations vivantes qui sont retenus pour la "traduction" en agents peut ainsi être adapté en fonction de l'étude. En prenant l'exemple de modélisations des organisations sociales, on pourra ainsi choisir de se placer au niveau des individus qui les composent si l'on s'intéresse à l'impact de leurs relations sur la structure de l'organisation. Si l'on se penche plutôt sur les relations entre ces organisations, alors il pourra être plus judicieux de choisir ces organisations comme agents, munis de propriétés éventuellement complexes traduisant l'ensemble des relations des individus à l'intérieur de ces structures²⁶. Nous reproduirons ces deux démarches au chapitre 6.

Un champ d'application très développé des systèmes multi-agents est celui de la modélisation des phénomènes sociaux, comme par exemple les mécanismes financiers, en particulier dans le cadre de la rationalité limitée des acteurs [Edmonds, 1999]. Il s'agit d'une part de comprendre les caractéristiques du vivant ou des sociétés humaines, en mettant en lumière les mécanismes sous-jacents qui rendent compte de la complexité des phénomènes observés ; d'autre part, éventuellement, d'appliquer ces mécanismes pour résoudre des problèmes dans des domaines différents.

²⁶D'une façon générale, une relation s'établit entre le niveau de *granularité* des SMA (1 agent pour un concept général ou au contraire plus minimal) et la complexité des agents de ce système. Une granularité assez faible (un agent pour un concept "haut-niveau") pourra être contrebalancée par une complexité assez élevée des agents. Au contraire, on pourra définir des agents minimaux et extrêmement simples, comme le sont par exemple les agents purement réactifs, qui ne font que réagir de façon "quasi-automatique" aux modifications de leur environnement (par exemple des fourmis artificielles qui se dirigent vers les sources de phéromones les plus intenses dans leur espace perceptif [Bonabeau and Theraulaz, 2000]). Le choix du niveau de granularité traduit aussi parfois les contraintes en terme de puissance des machines.

Un exemple est celui de l'étude computationnelle des comportements d'insectes sociaux comme les fourmis, qui après avoir fourni des mécanismes explicatifs pour les études éthologiques, a produit des applications très pertinentes dans la gestion du trafic des réseaux comme Internet [Schoonderwoerd et al., 1996].

Les modélisations portant sur l'origine du langage se situent évidemment dans ce dernier cadre. L'isomorphisme entre les agents et les locuteurs est très naturel, et les systèmes multi-agents traduisent fort bien l'aspect distribué du langage dans une communauté de locuteurs.

Certains auteurs, comme Marvin Minsky, ont également proposé d'appliquer ce concept à la cognition dans son ensemble, et ont proposé le terme de société de l'esprit [Minsky, 1987].

Les réseaux de neurones artificiels

Il est possible de représenter la cognition d'un locuteur de façon plus ou moins complexe. Afin de modéliser les capacités d'apprentissage et de généralisation d'un locuteur, une des possibilités est le recours aux réseaux de neurones artificiels.

Ces réseaux, d'inspiration biologique, ont été introduit en 1943 par Mac Culloch et Pitts, qui les premiers proposèrent une abstraction du neurone biologique sous la forme d'un automate à deux états calculant sa sortie booléenne à partir de valeurs d'entrée et d'un seuil d'activation. L'analogie avec le neurone réel, recevant des influx nerveux par ses dendrites et déchargeant en fonction de cette entrée est immédiate, même si la réduction opérée par le modèle est très importante. La mise en commun de neurones artificiels connectés entre eux conduit au concept de réseaux de neurones.

Cette définition, comme pour les systèmes multi-agents, laisse une grande liberté tant pour la topologie des réseaux que pour la fonction d'activation des neurones. De fait, différents types de réseaux existent aujourd'hui, aux propriétés architecturales et fonctionnelles distinctes :

- le caractère supervisé ou non (voir mixte) de l'apprentissage. Dans le premier cas, il est nécessaire pour l'apprentissage de présenter au réseau la sortie qu'il doit faire correspondre à une entrée. Les réseaux non supervisés règlent quant à eux les poids de leurs connexions selon des processus "autonomes", souvent basés sur des principes d'auto-organisation ;
- la typologie de type "feed-forward" ou récurrente. Les réseaux du premier type voient une propagation de l'activation des neurones depuis une couche d'entrée vers une couche de sortie (entre elles se trouvent zéro, une ou plusieurs couches intermédiaires ou *cachées*). Les suivants possèdent au contraire des connexions dans les deux sens, conduisant à des boucles de (rétro-)propagation de l'activité ;
- l'apprentissage et le calcul d'une fonction associant des valeurs de la couche d'entrée à des valeurs de la couche de sortie, ou la construction d'un ensemble de prototypes à partir d'un ensemble d'éléments. Dans le premier cas, suite à une période d'apprentissage, de nouvelles entrées peuvent être présentées, et le réseau calcule la valeur de la fonction apprise pour celles-ci. Dans le second cas, de nouveaux éléments pourront être rapprochés des prototypes dégagés de l'ensemble d'apprentissage ;
- le recours à des lois d'inspiration biologique, comme la loi de Hebb, postulée par Donald Olding Hebb (1904-1985) en 1949 :
"When an axon of cell A is near enough to excite B and repeatedly or persistently takes part in firing it, some growth process or metabolic change takes place in one or both cells such that A's efficiency, as one of the cells firing B, is increased" [Hebb, 1949] (p. 62) ;

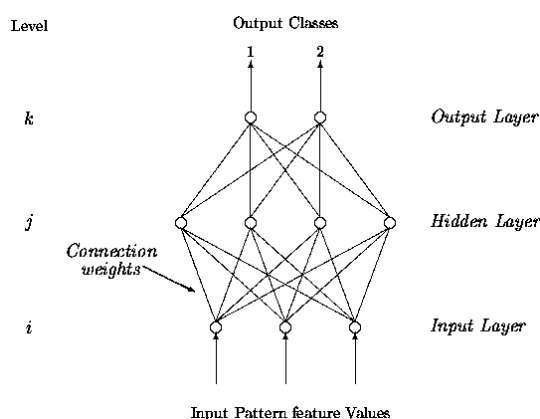


FIG. 3.2 – Schéma d'un perceptron multi-couches

- l'utilisation de processus stochastiques...

Il existe de très nombreux réseaux différents, qui empruntent et combinent les propriétés précédentes. Nous pouvons citer les suivants :

- le perceptron multi-couches ou PMC, réseau de type feed-forward (voir figure 3.2), à apprentissage supervisé, pour l'apprentissage de fonctions. La technique d'apprentissage, baptisée *rétro-propagation de gradient* fut à l'origine du renouveau du courant connexionniste dans les années 1980, suite à une désaffection liée aux capacités limitées des premiers réseaux, et le développement de l'intelligence artificielle symbolique ;
- la carte de Kohonen, due à Teuvo Kohonen [Kohonen, 1990], pour l'extraction de prototypes, non-supervisée. Bien que ce réseau ait été conçu initialement comme un outil d'ingénierie, certaines de ses propriétés se retrouvent au niveau de certaines régions cérébrales corticales [Georgopoulos et al., 1988] ;
- les réseaux de Hopfield, la machine de Boltzmann (utilisant des techniques stochastiques), les réseaux récurrents, ceux gérant les signaux temporels...

Les systèmes d'apprentissage de "haut niveau"

A l'inverse des réseaux de neurones que l'on peut qualifier de systèmes d'apprentissage *sub-symboliques* (puisque'ils ne manipulent que des valeurs numériques et non des représentations plus abstraites), il est possible d'équiper les locuteurs artificiels de systèmes d'apprentissage, de perception et de production linguistiques basés sur des lois et des éléments de haut niveau. Plusieurs exemples de simulations permettront de mieux envisager cette approche dans quelques paragraphes.

Les algorithmes génétiques

Nous pouvons citer pour finir notre rapide tour d'horizon la technique des *algorithmes génétiques*. Développée par John Holland [Holland, 1975], et surtout utilisée initialement pour des problèmes d'optimisation en ingénierie, elle repose sur une analogie forte avec les mécanismes biologiques de la reproduction sexuée. Le mécanisme de ces algorithmes est en effet le suivant :

1. choix d'une population d'éléments initiaux que l'on peut dénommer chromosomes, dotés de différentes caractéristiques ;
2. évaluation de la qualité de chaque élément à l'aide d'une fonction d'évaluation ou "fonction de fitness" ;
3. sélection des chromosomes les plus performants et croisement (crossing-over) de ces chromosomes, accompagné de mutations aléatoires de leurs caractéristiques ;
4. retour à l'étape 2 avec la nouvelle population constituée des chromosomes créés à l'étape 3.

De même que la sélection naturelle sélectionne les caractéristiques qui favorisent le succès reproductif d'un individu, les algorithmes génétiques mettent au jour le jeu de caractéristiques qui répondent le mieux à l'évaluation de la fonction de fitness.

Les algorithmes génétiques peuvent être utilisés pour l'apprentissage de réseaux de neurones artificiels comme les perceptrons multi-couches (à la place de l'algorithme de rétro-propagation). Ils sont surtout utilisés dans les simulations qui nous concernent pour reproduire des mécanismes évolutifs plausibles.

3.1.4 Principaux courants de recherche

Emergence des conventions

Initiée principalement par Luc Steels et Frédéric Kaplan, l'étude de l'émergence de conventions linguistiques s'attaque à la question de l'apparition d'un code partagé dans une population d'agents uniquement sur la base d'interactions répétées entre deux agents. Ce code peut s'établir à différents niveaux.

Au niveau lexical. L'émergence de conventions lexicales ne prend pas en compte l'évolution de la structure interne des mots, mais étudie les possibilités d'apparition d'un système de dénomination pour les éléments d'un univers sémantique. Plus concrètement, des agents évoluent dans un univers peuplé de différents objets ou concepts. Chaque agent peut accéder à ces concepts, qui sont partagés et accessibles à tous. De plus, chacun dispose d'une mémoire capable de retenir des mots qu'il peut associer aux différents concepts de son environnement. Les agents peuvent entrer en interaction deux à deux pour tenter d'adopter les mêmes mots pour les différents objets. La question est de savoir si un système de mots cohérent pour tous les agents peut émerger sur la base d'interactions diadiques. La figure 3.3 présente le déroulement d'un schéma interactif possible, avec les différentes possibilités d'évolution. De nombreuses autres stratégies voisines peuvent être envisagées (voir par exemple [Steels, 1997a] (p. 13) ou [Ke et al., 2002a]), qui conduisent aux mêmes résultats : après une période plus ou moins longue (fonction du nombre d'agents, du nombre de concepts...), les agents finissent par converger vers un système partagé de mots pour décrire les différents objets. La convention est résistante à un renouvellement des agents, à condition que celui-ci ne soit pas trop important (la limite est appelé *flux limite de résilience*) [Kaplan, 2000] (p. 71-75).

L'influence des homophones peut être étudiée en limitant l'espace des éléments permettant de constituer de nouveaux mots : par exemple, si les mots peuvent être composés par combinaison de 3 lettres choisies au hasard dans un ensemble de 4, il n'existera que 64 mots possibles.

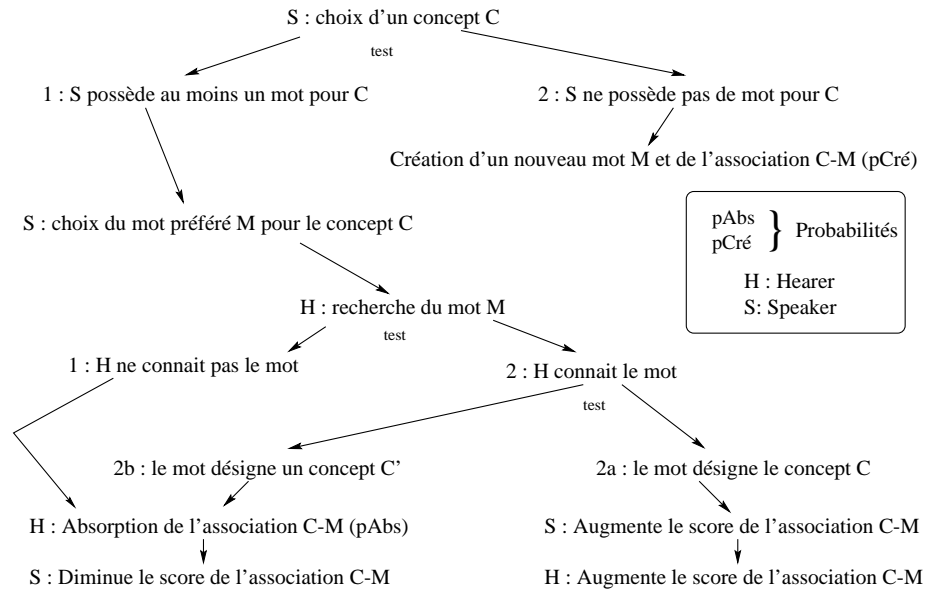


FIG. 3.3 – Interaction lors d'un naming game

Au hasard des créations de mots, des homophones peuvent émerger qui viennent gêner la communication. De même, l'invention de nouveaux mots par des agents différents pour un même concept conduit à l'existence de synonymes.

De nombreux raffinements peuvent être apportés au modèle, qui permettent d'étudier différents aspects du cas général. Un premier exemple est l'ajout d'une dimension spatiale, qui vient introduire une hétérogénéité dans les communications entre agents : plus deux agents sont proches, plus la fréquence de leurs interactions est importante [Steels, 1996]. En formant des clusters d'individus, des systèmes de dénomination propres à chaque cluster émergent, tandis qu'une "lingua franca" s'instaure entre les différents clusters si les interactions entre eux sont suffisantes.

Une autre direction d'étude est celle des conditions de contacts. Steels étudie l'évolution du lexique des agents de trois clusters initialement séparés (avec un nombre d'interactions très réduit entre eux), puis mis en contact (accroissement du nombre d'interactions inter-clusters). Les résultats de ces expériences mettent en évidence une hausse du bilinguisme chez les agents, ainsi qu'un mélange graduel des différentes "langues" initiales pour aboutir à une situation de convergence parfaite [Steels, 1997a].

Avec Egidio Marsico et François Pellegrino, nous avons prolongé le cadre précédent afin d'étudier l'impact des tailles des populations mises en contact, ainsi que l'importance du prestige des agents mis en contacts [Marsico et al., 2000]. L'idée était que des agents plus prestigieux imposaient plus facilement les mots de leur lexique lors du contact. Renforçant ce phénomène ou le minimisant, une plus petite taille de population rendait plus difficile la préservation d'un lexique après le contact. Ces situations sont importantes si l'on songe aux situations de la préhistoire, où les populations humaines étaient distribuées sous forme de groupes de quelques dizaines d'individus (voir chapitre 4). Les résultats montrent qu'au delà d'un certain ratio des tailles de populations, le lexique de la plus petite est totalement remplacé lors du contact linguistique.

Même un écart de prestige important ne peut alors compenser ce déséquilibre. Les courbes des figures 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7 montrent l'évolution des cohérences des deux populations, ainsi que deux indicateurs de l'emprunt lexical pour deux situations de contact : la première figure illustre la situation de deux populations de même taille (30 individus) et même prestige, alors que la seconde met en jeu deux populations de tailles différentes (30 agents pour la population bleue, 40 pour la population rouge). La cohérence est une grandeur numérique entre 0 et 1 qui indique le degré d'agrément des agents sur les mêmes mots pour désigner les (10) objets de leur environnement. En ce qui concerne l'emprunt, les deux courbes (couleur foncée et couleur claire) concernent respectivement le nombre de mots étrangers (venus de la seconde population) connus en moyenne par un locuteur, et le nombre moyen de mots étrangers utilisés de façon préférentielle par un agent.

Si l'on examine les courbes du graphe de la figure 3.4, on observe qu'avant contact (à gauche de la barre verticale), les cohérences des deux populations augmentent jusqu'à atteindre une valeur proche de 1, ce qui signifie que les agents de chaque population atteignent un agrément sur les mots à employer. Peu de temps après le contact, on constate une baisse de la cohérence identique pour les deux populations. Cette baisse traduit une désorganisation des vocabulaires des agents à cause de l'introduction de nouveaux mots dans les interactions. Cependant, on remarque que les cohérences finissent par remonter lentement : les agents des deux populations établissent une nouvelle convention sur un ensemble de mots qui emprunte aux vocabulaires initiaux des deux populations. Les courbes du graphe de la figure 3.5 traduisent ce phénomène : très peu de temps après le contact, on constate que tous les agents connaissent un mot étranger pour désigner l'ensemble des 10 objets de leur environnement. En ce qui concerne le choix des mots qui formeront le vocabulaire final, la proximité des courbes d'emploi préférentiel de mot étranger montre que ce vocabulaire est composé à 50% de mots issus du lexique de la première population, et à 50% de mots issus de celui de la seconde.

Si l'on regarde maintenant les courbes de la figure 3.6 où la situation est asymétrique entre les deux populations, on constate que la plus petite subit de façon beaucoup plus importante le contact linguistique. La cohérence de cette population baisse en effet beaucoup plus fortement que celle de la population de plus grande taille. Celle-ci voit son vocabulaire peu déstructuré, et celui-ci constituera d'ailleurs la majeure partie du vocabulaire après contact et stabilisation. Les courbes du graphe de la figure 3.7 traduisent cet état de fait, et le faible nombre de mots issus de la petite population utilisés de façon préférentielle par les membres de la population de grande taille.

En association avec Jinyun Ke et Feng Wang du laboratoire LEL de la City University of Hong Kong, nous avons également étudié la façon dont les homophones peuvent persister dans un modèle où des interactions existent entre les concepts [Ke et al., 2002b]. L'utilisation dans une interaction des relations sémantiques qu'entretiennent les composants d'une phrase (comme par exemple dans la phrase "*Le chien aboie.*") permet en cas d'ambiguïtés causées par de l'homophonie de faire le plus souvent le choix correct parmi les différents homophones en compétition.

Un espace bidimensionnel torique permet de représenter les sens des objets du monde : chaque sens est identifié par deux coordonnées dans cet espace. Il est possible dès lors d'établir une distance sémantique entre les mots. L'interaction est toujours basée sur le principe du naming game, mais les agents échangent cette fois deux mots. Le nombre limité d'éléments "phonémiques" qui servent à construire les mots conduit à un nombre lui aussi limité de mots distincts. Si le nombre

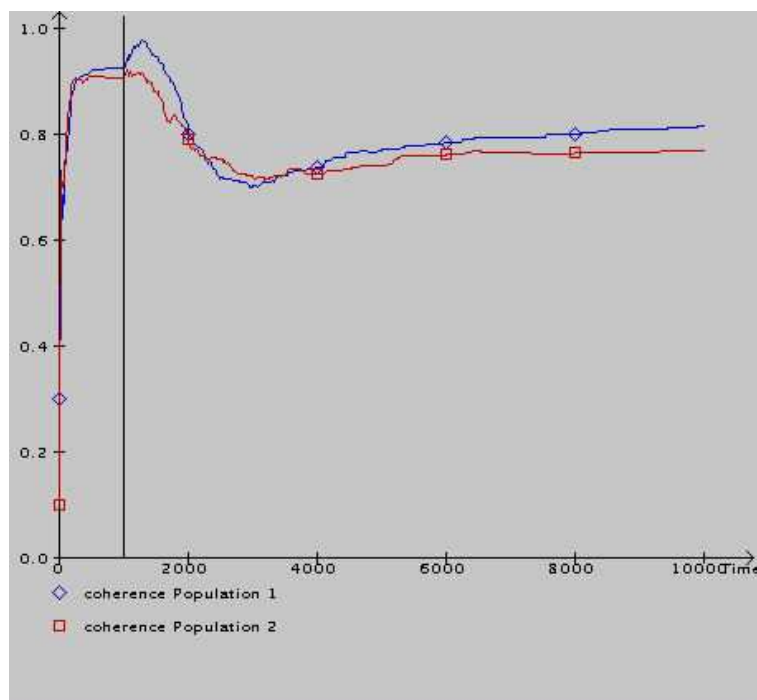


FIG. 3.4 – Evolution de la cohérence de deux populations de taille identique en situation de contact linguistique

de concepts à exprimer dépasse cette limite, des homophones existent inévitablement (et même en dessous de cette limite, puisque les mots sont composés aléatoirement). Lors d'une homophonie au cours d'une interaction, le récepteur envisage l'ensemble des combinaisons possibles entre les mots de l'interaction, et sélectionne le couple de plus faible distance sémantique. En outre, un procédé d'élagage ("*pruning*") permet d'éliminer si besoin les mots qui présentent un succès de communication trop faible (après plusieurs interactions).

Ce procédé permet de surmonter l'homophonie de façon très significative, et des ratios moyens de 3 ou 4 concepts pour une même forme phonémique (un mot) permettent néanmoins un succès de communication important. Les courbes noires des graphes des figures 3.8, 3.9, 3.10 et 3.11 présentent respectivement les situations suivantes : nombre de concepts égal au nombre de mots distincts possibles et interactions à 1 mot, nombre de concepts égal au nombre de mots distincts possibles et interactions à 2 mots, nombre de concepts égal à 3 fois le nombre de mots distincts possibles et interactions à 1 mot et enfin nombre de concepts égal à 3 fois le nombre de mots distincts possibles et interactions à 2 mots. Dans les deux premiers cas, le succès de communication après émergence du lexique est proche de 1. En particulier, dans le premier cas, l'élagage permet à la communauté d'agents de finir par découvrir l'ensemble des mots distincts, et à éliminer l'homophonie du système comme cela est possible.

Dans les deux cas suivants, l'homophonie est très importante. L'absence de contexte sémantique ne permet pas de surmonter ce problème (figure 3.10), et le succès de communication est proche de 33%, ce qui correspond au pourcentage de chance de trouver le mot correct parmi trois homophones. Avec l'aide du contexte, l'homophonie peut-être surmontée, et le succès de communication peut croître (90% sur le graphe).

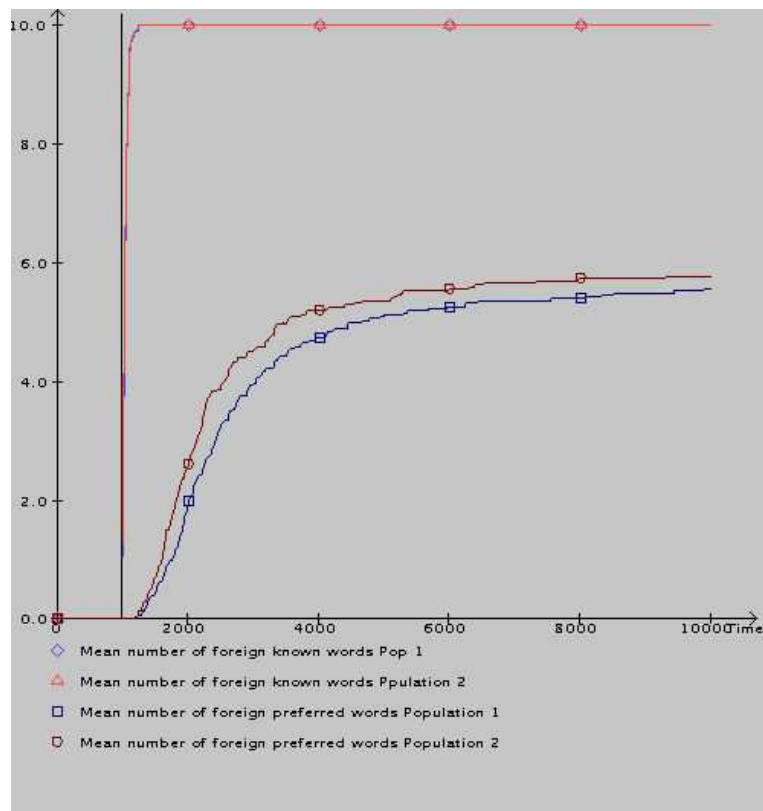


FIG. 3.5 – Evolution du vocabulaire emprunté de deux populations de taille identique en situation de contact linguistique

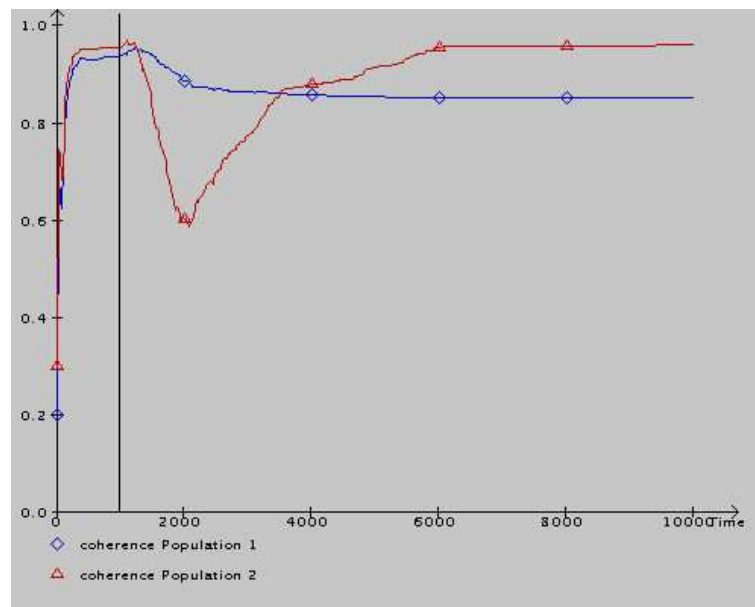


FIG. 3.6 – Evolution de la cohérence de deux populations de tailles différentes en situation de contact linguistique

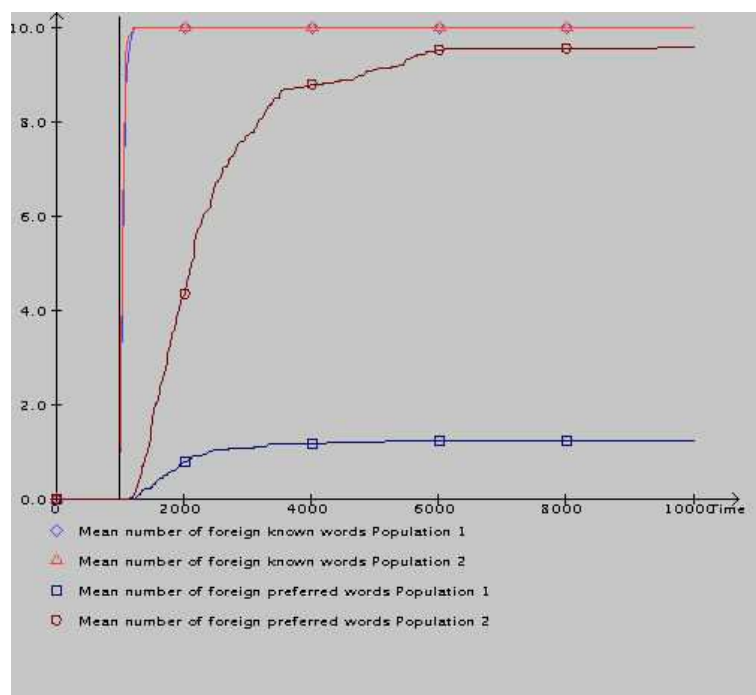


FIG. 3.7 – Evolution du vocabulaire emprunté de deux populations de tailles différentes en situation de contact linguistique

Catégorisation sémantique. L'existence *ad hoc* de concepts est un présupposé important, et Steels a également étudié la façon dont une catégorisation partagée d'un univers sémantique peut émerger dans une population d'agents.

[Steels, 1997b] résume tout d'abord comment une catégorisation progressive d'un espace continu peut émerger chez un seul agent. Le jeu utilisé ici est un jeu de discrimination, baptisé "*discrimination game*". Le but est de parvenir à distinguer un objet ou une situation parmi un ensemble d'autres. Les objets sont identifiables d'emblée, et sont perçus via un ensemble de senseurs qui peuvent acquérir les valeurs d'un ensemble de caractéristiques de ces éléments. Ces détecteurs ont en outre la capacité de fournir des valeurs discrètes à partir d'une plage continue de valeurs. Pour un épisode donné où un agent cherche à distinguer deux objets o_1 et o_2 , l'agent utilise ces capteurs pour extraire deux ensembles de traits discrets relatifs aux deux objets. Si ces deux ensembles sont distincts, le jeu est réussi. Dans le cas contraire, l'agent peut soit raffiner l'une de ses segmentations pour une plage continue de valeurs, soit créer un nouveau senseur pour une caractéristique de l'objet encore non exploitée. Après un certain nombre d'épisodes, une segmentation particulière émerge, qui correspond à un découpage des plages de valeurs continues qui permet (mais pas forcément de façon optimale) la discrimination de l'ensemble des objets.

Il est possible de fusionner "*naming games*" et "*discrimination games*". Comme pour les jeux lexicaux précédents, les agents doivent parvenir à s'accorder sur un vocabulaire pour décrire un ensemble d'objets ou de situations du monde. Lors d'une interaction, le premier agent choisit un objet et le désigne au second agent de façon "non-linguistique". Les deux agents pratiquent

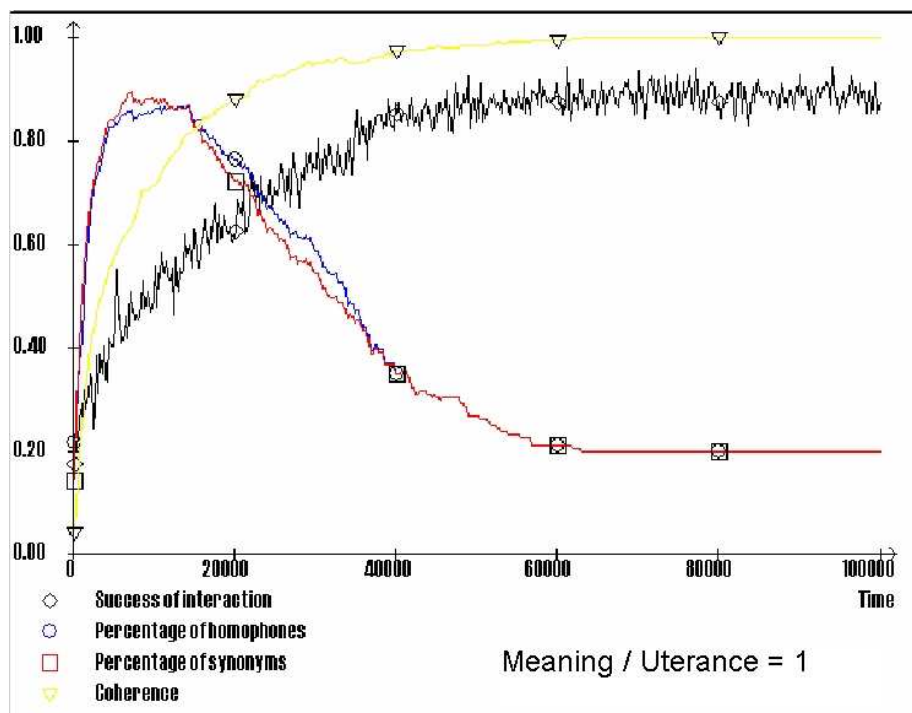


FIG. 3.8 – Impact du contexte sémantique et homophones : interactions à un mot et ratio concepts sur mots égal à 1

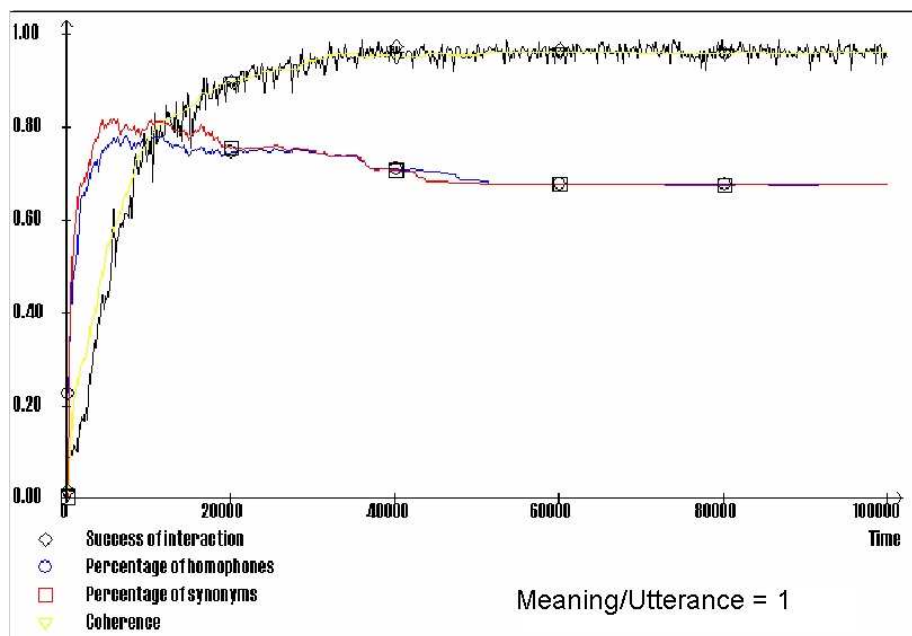


FIG. 3.9 – Impact du contexte sémantique et homophones : interactions à deux mots et ratio concepts sur mots égal à 1

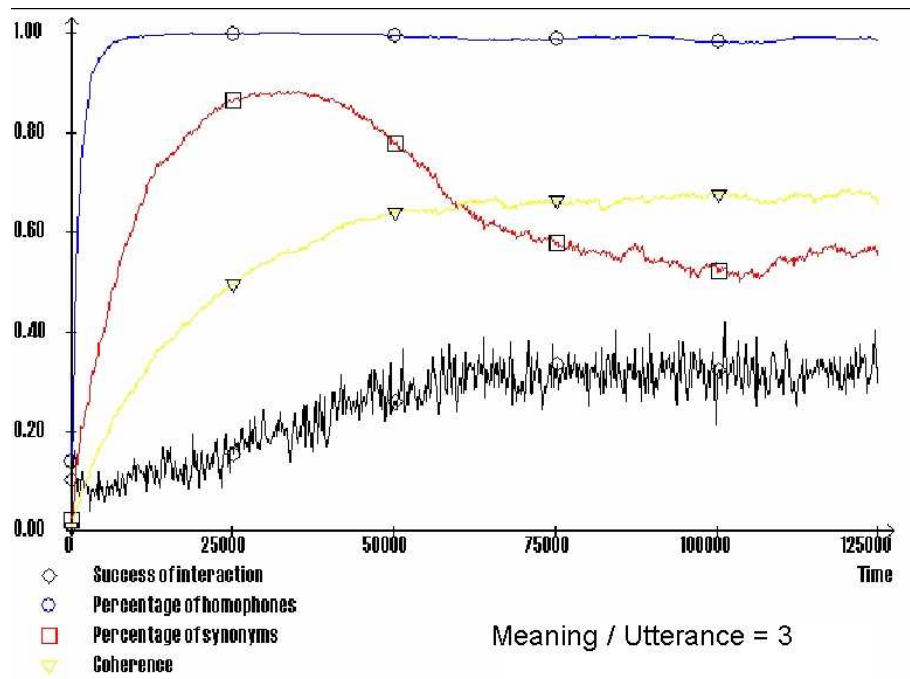


FIG. 3.10 – Impact du contexte sémantique et homophones : interactions à un mot et ratio concepts sur mots égal à 3

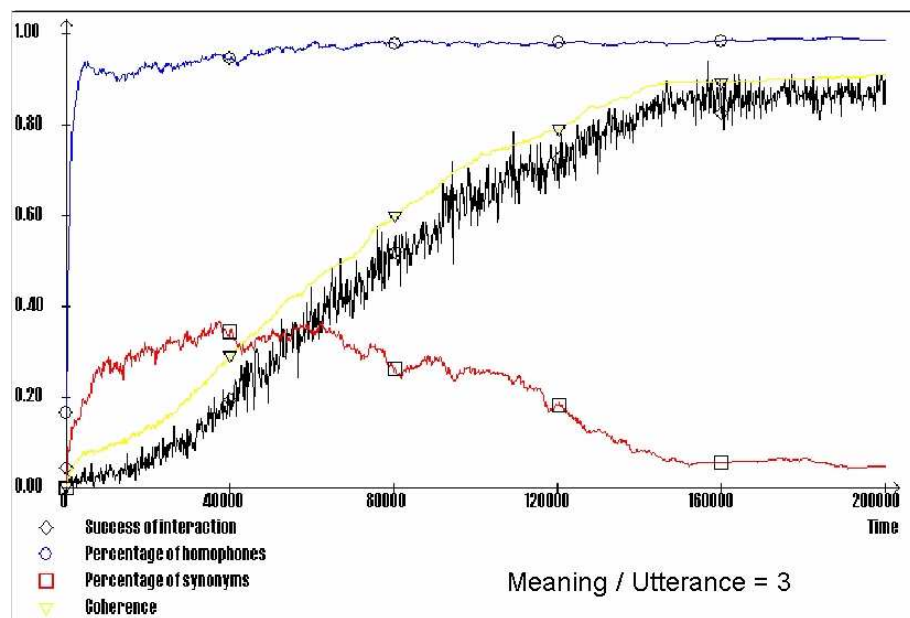


FIG. 3.11 – Impact du contexte sémantique et homophones : interactions à deux mots et ratio concepts sur mots égal à 3

chacun un jeu de discrimination pour l'objet désigné. Le premier agent encode alors les traits extraits à l'aide des mots de son lexique (des mots nouveaux peuvent être créés en cas de manque), et les communique à l'autre agent. Celui-ci examine les correspondances de ces mots dans son propre lexique, et compare les traits extraits de l'input linguistique avec ceux produits par ses capteurs. En cas d'échec, les agents tentent d'accorder leur lexique [Steels, 1997b] (p. 6-7). Après un certain nombre d'interactions, une discrimination partagée par l'ensemble des agents émerge et peut résister à des ajouts d'objets, à un renouvellement des agents. . .

Univers réel et expériences robotiques. L'environnement et les objets manipulés par les agents peuvent être abstraits, comme dans le cadre d'une simulation informatique totalement logicielle. Steels pense néanmoins qu'une incarnation des agents dans un monde physique crée des phénomènes intéressants qui sont passés sous silence dans les simulations logicielles. En effet, la perception de l'environnement tout comme la transmission d'information ne sont pas à l'abri des imperfections de tout système physique, et des erreurs peuvent se produire.

L'expérience *Talking Heads* menée au laboratoire Sony CSL à Paris et dans différentes villes du monde est l'un des points d'orgue des expériences robotiques récentes [Steels, 1999]. Des agents virtuels, qui voyagent sur le réseau Internet, peuvent se téléporter et s'incarner dans des couples de "robots" (en fait constitués de caméras mobiles sur leur pied) présents dans les différentes villes. Une interaction mixte entre *naming game* et *discrimination game* prend place entre les deux agents incarnés au même endroit. Elle est soumise aux conditions particulières de l'environnement (en particulier l'éclairage, les propriétés des différentes peintures utilisées pour dessiner les différentes figures. . .) Comme pour les simulations informatiques "abstraites", les agents finissent par établir une convention lexicale pour les différentes figures géométriques, et ce malgré les variations et les imperfections du monde réel.

Une des rares critiques que nous pouvons citer ici contre ces simulations est le passage sous silence des motivations des agents à communiquer. Un postulat implicite est en effet que les agents souhaitent échanger de l'information et nommer les objets qui les entourent, alors que certains chercheurs estiment qu'il s'agit du problème principal à prendre en compte.

Au niveau phonologique. L'émergence des conventions a également été étudiée au niveau des systèmes de sons, avec bien sûr une abstraction des interactions différente de celle du cas lexical. Les premières expériences, menées par Bart de Boer, reposent sur l'algorithme suivant dénommé "*imitation game*" [De Boer, 1999] (p. 36) :

- choix de deux agents au hasard dans la population, un initiateur et un imitateur ;
- choix d'une voyelle de son inventaire par l'initiateur et prononciation de cette voyelle grâce à un modèle de tractus vocal ; ajout de bruit ;
- l'imitateur analyse le signal et le compare aux voyelles de son inventaire. Il choisit le son le plus proche (avec une distance en barks²⁷) et synthétise le son correspondant qu'il émet en direction de l'initiateur ; ajout de bruit ;
- l'initiateur écoute le son reçu et compare la voyelle extraite à la voyelle émise : si les deux sont identiques, l'interaction est réussie ; dans le cas contraire, l'initiateur communique de façon extra-linguistique à l'imitateur l'échec de la communication.

²⁷Les barks forment une échelle de valeurs qui reproduisent les perceptions vocaliques de l'oreille humaine.

Afin de parvenir à développer des systèmes de sons similaires chez les agents, les mécanismes suivants sont utilisés (p. 36-37) :

- pour chaque voyelle, l'agent retient le nombre d'utilisations et de succès lors des interactions. Le ratio de la première valeur sur la seconde fournit le taux de succès de la voyelle ;
- si une interaction est réussie, l'imitateur déplace la voyelle de son inventaire qu'il a choisie vers le signal reçue par l'initiateur, afin d'augmenter la cohérence de la population. Pour ce faire, et puisque un agent ne manipule que les paramètres de son modèle articulatoire, l'imitateur recourt à un processus de **babillage** ("*babbling*") qui permet d'explorer de façon partielle l'espace articulatoire autour de la voyelle de l'inventaire. Cette dernière est alors remplacée par l'élément de l'investigation par babillage le plus proche du son reçu de la part de l'initiateur. Un paramètre ε permet de définir la taille de l'espace d'exploration du babillage ;
- en cas d'échec de l'interaction, si le taux de succès de la voyelle de l'inventaire est élevé, une nouvelle voyelle est créée au centre de l'espace acoustique, avec pour objectif futur de la rapprocher de la voyelle émise par l'initiateur. Si le taux de succès est faible, la voyelle choisie par l'imitateur sera rapprochée de la voyelle de l'initiateur comme précédemment. Un paramètre θ_s permet de définir la catégorisation des taux de succès.

Les systèmes obtenus grâce à ces algorithmes conduisent à l'émergence de systèmes vocaliques qui sont assez proches des systèmes observés dans les langues du monde, en particulier en ce qui concerne les aspects de contrastes.

Suite aux travaux de Bart De Boer, certains chercheurs ont infléchi le problème en s'attaquant à une instance plus difficile de l'émergence des conventions sonores : l'émergence de systèmes syllabiques, et non plus seulement vocaliques. Les travaux de Pierre-Yves Oudeyer dans ce domaine sont déjà très aboutis, et suivent principalement deux directions. La première consiste à modéliser les phénomènes de co-articulation entre phonèmes à l'aide d'un modèle d'inertie des articulateurs. En comparant une situation où les agents mémorisent des sons complexes de façon holistique à une situation où ils mémorisent au contraire les composants de ces sons, les avantages de la seconde approche sont mis en valeur. Les résultats de Bart de Boer sont reproduits, mais cette fois dans un complexe de sons beaucoup plus riche [Steels and Oudeyer, 2000]. A l'aide de modèles sophistiqués de la cochlée et du tractus vocal (modèle de Cook), Oudeyer a également montré que le modèle dynamique précédent conduit à des systèmes syllabiques proches de ceux rencontrés dans les langues du monde [Oudeyer, 2001b].

Une seconde direction est le recours à des cartes neurales pour rendre compte de l'émergence d'un codage phonémique. Oudeyer pense qu'il est possible de rendre compte de ce codage à l'aide des simples propriétés dynamiques et de classification de cartes biologiquement plausibles, et ce sans pression de sélection [Oudeyer, 2001a].

Les deux approches précédentes sont enfin fusionnées dans les modèles les plus récents, où des cartes neurales dynamiques permettent l'encodage et la mémorisation des trajectoires articulatoires et acoustiques mentionnées plus haut [Oudeyer, 2002].

Pour conclure, citons les travaux d'Emmanuelle Perrone, qui a considéré les liens entre niveaux lexical et phonologique, par le biais de contraintes lexicales (en terme de nombres de mots) sur les systèmes phonologiques [Perrone, 1999].

Au niveau syntaxique. L'émergence de conventions de caractère syntaxique est l'un des domaines les plus récents abordés par les modélisateurs.

John Batali a abordé ce problème grâce au paradigme des réseaux de neurones artificiels, et plus particulièrement en recourant à des perceptrons multi-couches récurrents, qui permettent de traiter et mémoriser des motifs pourvus d'une dimension temporelle [Batali, 1997]. A l'aide de simulations multi-agents où chaque agent est en fait un réseau de neurones, l'auteur étudie la communication de signaux (composés de plusieurs lettres parmi a, b, c ou d) permettant l'expression de structures de l'espace sémantique (ces structures sont sous forme de prédicats à deux arguments; le prédicat comme les arguments sont représentés par des structures de quelques bits : 000, 010, 011...). L'entrée du réseau correspond aux signaux de communication, et la sortie aux composants sémantiques. Le réseau ne pouvant fonctionner que dans un seul sens (de l'entrée vers la sortie), un mécanisme de tests des différentes lettres pour former le signal est utilisé pour déterminer progressivement la séquence du signal (p. 411). Le décodage du signal ne pose par contre pas de problème. Lors d'une interaction, l'agent récepteur a connaissance du prédicat exprimé par l'agent émetteur, et son réseau peut être entraîné à partir du signal de communication et du prédicat. L'auteur montre comment dès lors une structuration *a priori* de l'univers sémantique (sous la forme de prédicats) émerge progressivement de façon réfléchie dans la structure des signaux de communication.

Plus récemment, Batali a eu recours à un modèle symbolique (de haut niveau) pour étudier l'émergence de conventions syntaxiques entre des agents. L'idée est ici que les signaux compositionnels sont produits par l'émetteur en considérant *a priori* la façon dont le récepteur peut les interpréter. Réciproquement, l'émetteur analyse les signaux compositionnels en considérant comment ils ont pu être encodés par l'émetteur [Batali, 2000]. En connaissant à la fois le signal et le sens du message émis, le récepteur tente ainsi de découvrir les conventions linguistiques utilisées par l'émetteur. Une convention syntaxique ("négociée") apparaît après un certain nombre d'interactions, et différentes régularités ou contraintes syntaxiques émergent; elles ressemblent en partie aux structures observées dans les langues du monde.

Steels a critiqué ces modèles en arguant du fait que les individus n'ont pas accès dans la réalité aux contenus de l'esprit des personnes avec lesquelles ils communiquent ("*no mind-reading*"). Il a lui-même tenté de corriger ce biais à l'aide d'un modèle plus complexe [Steels, 2000]. Toujours dans le cadre robotique souvent employé par Steels, ce modèle repose sur une architecture en deux couches. Une première couche est constituée de réseaux de neurones qui réalisent le passage des données extérieures à des données symboliques : certains réseaux servent à comparer des éléments à un prototype, d'autres à comparer une des dimensions des éléments par rapport à une valeur moyenne... Ces dernières données vont ensuite être manipulées par les algorithmes de la seconde couche, qui vont encoder linguistiquement les primitives perceptives. Différentes stratégies (spécifiées par avance) peuvent être envisagées pour cet encodage : une lexicalisation totale des différentes primitives (un mot pour chaque objet, un mot par relation entre objets...), l'utilisation de l'ordre des mots de la phrase, une méthode mixte... Comme les conceptions sémantiques des agents ne sont pas partagées, l'agent récepteur d'un message produit différentes inférences sur le contenu sémantique de celui-ci. Chaque association entre un mot et une primitive possède un score comme pour les *naming games* évoqués plus hauts. De nombreuses hypothèses émergent par le biais des inférences du récepteur, qui tente de privilégier celles qui sont consistantes de façon interne, en accord avec les scores des associations lexicales, et enfin en accord avec les données qu'il peut acquérir sur le monde qui l'environne. Sur la base de l'association la plus probable, le récepteur modifie alors son lexique et sa grammaire. Des

routines existent qui permettent d'apprendre ou de créer des nouveaux mots. Des mots peuvent être utilisés non seulement pour les primitives, mais également pour représenter des structures composées de primitives.

Les premières simulations effectuées avec les stratégies de lexicalisation intégrale, d'utilisation de l'ordre des mots ou encore d'économie dans les expressions, ont conduit à l'émergence d'une convention entre les agents.

Pour finir, Simon Kirby recourt à des méthodes symboliques pour l'étude de l'émergence des structures syntaxiques dans une population d'agents. Le but de l'étude est l'observation de l'émergence de la compositionnalité à partir de signaux holistiques pour l'expression de prédicats [Kirby, 2000]. Le présupposé est ici que les agents tentent de décomposer les signaux holistiques. Les agents entament les simulations sans posséder de mots, mais peuvent créer ceux-ci pour refléter les structures syntaxiques :

“Briefly, the invention algorithm used by the simulation generates strings where the speaker has no grammatical structure, but for meanings that can be partially expressed with a particular grammar will only randomise those parts of the string that are known by the speaker not to correspond to expressible meaning.” [Kirby, 2000] (p. 6)

Le mécanisme d'apprentissage (dit mécanisme d'induction) est le suivant : à la réception d'un couple sens-forme linguistique, le récepteur ajoute dans sa grammaire la correspondance holistique entre la forme et le sens. Une deuxième étape consiste à inspecter la grammaire de l'agent pour voir s'il est possible de fusionner la règle introduite précédemment avec d'autres déjà présentes en mémoire. Ceci permet de compresser l'information en mémoire.

Les agents sont placés sur un anneau et possèdent donc chacun deux voisins avec lesquels ils peuvent communiquer. Lors de l'évolution du système, les agents peuvent être remplacés de façon aléatoire, et la probabilité qu'un agent traite l'ensemble des prédicats possibles est extrêmement faible.

L'observation du système permet de voir qu'après une certaine période où le nombre de prédicats exprimables en moyenne par un agent reste assez faible, ce nombre augmente de façon significative pour atteindre pratiquement la totalité des prédicats de l'espace sémantique. Ceci traduit en fait l'apparition d'agents possédant des grammaires compositionnelles, qui permettent de former l'ensemble des prédicats possibles, même si ceux-ci ne sont pas entendus par l'agent au cours de sa vie.

Modélisation des processus d'acquisition ; interaction entre phylogénèse et ontogénèse

Plusieurs travaux de modélisations portent sur l'acquisition par un système d'un certain nombre de structures syntaxiques. Cette acquisition est parfois examinée en lien avec la phylogénèse, afin de faire ressortir comment une telle étape a pu se mettre en place sous une certaine pression de sélection.

Les travaux de John Batali ont ainsi mis en évidence que la *période critique* pour l'acquisition du langage (et d'ailleurs aussi pour d'autres comportements, que ce soit chez l'homme ou l'animal) peut être expliquée non pas par un processus de maturation exogène, mais par une dégradation des performances d'un réseau neuronal aux poids initiaux spécifiés de façon innée mais soumis à des entrées en désaccord avec sa configuration initiale [Batali, 1994].

A l'aide de réseaux de neurones récurrents devant apprendre à reconnaître les chaînes de caractères générées par un sous-ensemble des grammaires libres de contexte (*context-free grammars*), Batali a simulé une évolution darwinienne en sélectionnant les réseaux les plus performants au cours de l'apprentissage. Le génotype des systèmes, transmis et soumis à des mutations, était constitué des poids initiaux des réseaux de neurones (on retrouve en fait ici une forme dérivée de l'apprentissage pour les réseaux par algorithmes génétiques). Après un certain nombre de générations, les réseaux parviennent très bien à apprendre les régularités des grammaires considérées. Les poids initiaux ont évolué pour correspondre partiellement aux grammaires en jeu. Batali constate alors qu'un entraînement sur des données non structurées puis sur des données structurées par une grammaire en jeu, ou un apprentissage portant d'abord sur une grammaire particulière puis sur une autre conduit à une dégradation des performances. Le réseau perd alors sa capacité "innée" à apprendre correctement les chaînes d'une grammaire. Ainsi, après une période sans données structurées au cours de laquelle le réseau est entraîné sur des entrées sans relation avec le langage cible, la capacité d'acquisition du réseau se dégrade, et celui-ci devient incapable d'acquérir le type de langage pour lequel il était préparé initialement. Ceci peut expliquer l'existence d'une période critique.

A côté de ces travaux échafaudés sur des bases sub-symboliques et ne postulant aucune contrainte formelle innée relative au langage à acquérir, ainsi que parallèlement aux travaux reposant sur une sélection culturelle ou une absence de sélection des structures typologiques, les partisans de la théorie de la Grammaire Universelle tentent également de simuler les processus à l'œuvre dans leurs modèles. L'acquisition est ici basée sur un ensemble de paramètres à ajuster, grâce en partie à des modèles probabilistes qui permettraient à l'enfant de déterminer quelles hypothèses de la Grammaire Universelle sont celles employées dans la langue qui l'environne. Ted Briscoe propose un exemple de ce type d'apprentissage, basé sur un modèle probabiliste de type bayésien (modèle basé sur des probabilités conditionnelles) [Briscoe, 2002].

Toujours dans le cadre des grammaires universelles, Charles Yang refuse les modèles d'apprentissage statistique généraux sans *a priori* sur l'espace de recherche des formes linguistiques, car ils sont d'une part computationnellement très coûteux, et d'autre part ne respectent pas le principe de compatibilité développementale que devrait exhiber tout modèle d'acquisition. Celui-ci devrait en effet montrer un apprentissage temporellement congruent avec celui des enfants [Yang, 1999]. Parallèlement à ce premier refus, l'auteur émet également des doutes sur les modèles transformationnels, qui ne permettent qu'une seule hypothèse grammaticale chez l'enfant à un instant donné, ce qui entraîne une incohérence vis à vis des irrégularités produites par les enfants et de la gradualité de leur apprentissage. Yang propose ainsi un modèle *variationnel* où plusieurs hypothèses grammaticales peuvent coexister et être en compétition pour l'acquisition de la langue cible.

Modèles de diversité et de changements linguistiques

Une partie des simulations, si elles s'intéressent à la façon dont les agents partagent une norme linguistique, axent plus leurs hypothèses et leurs résultats sur des phénomènes qui sont rencontrés dans les langues actuelles que sur des problèmes d'émergence. Ceci peut concerner tant le problème de la propagation d'un changement (son implémentation), que l'existence d'universaux.

Les modèles de Daniel Nettle que nous avons déjà amplement décrits rentrent dans ce cadre. Ils abordent en particulier le problème de l'implémentation des changements dans la commu-

nauté [Nettle, 1999c], en soulignant en particulier l'importance de la taille de la population [Nettle, 1999a] et la question de la diversité linguistique [Nettle, 1999b].

Simon Kirby s'est intéressé à l'émergence de certaines structures typologiques, ainsi qu'à celle de certains universaux implicationnels [Kirby, 1997]. En postulant *a priori* des contraintes cognitives entre ordre du verbe et de l'objet et position de la tête dans les phrases (au sens des théories de la Grammaire Universelle : phrase nominale, phrase verbale...) (voir chapitre 2), l'auteur montre comment des individus placés sur une grille et interagissant avec leurs proches voisins adoptent l'une des quatre possibilités de combinaison. Les simulations font apparaître différentes régions spatiales où les agents adoptent tous l'une des deux combinaisons les plus compatibles avec les contraintes précédentes. Aux frontières entre régions de combinaisons opposées, sous l'action de pressions contraires, des agents adoptent des systèmes moins en adéquation avec les contraintes. Kirby rend compte grâce à ces résultats de l'existence de tendances ou d'universaux dans les langues du monde.

Dans le cadre de la grammaire universelle, Niyogi et Berwick proposent enfin un modèle générique et dynamique du changement linguistique, dont les propriétés reposent sur l'algorithme d'apprentissage utilisé par les enfants pour acquérir la langue cible. A l'aide de distributions de grammaires dans une population et d'algorithmes d'apprentissage particuliers (hérités de théories de type innéiste), les auteurs appliquent leur modèle à des cas de la linguistique historique [Niyogi and Berwick, 1997].

Modélisations de la sélection naturelle pour l'émergence du langage

Un autre type de simulations que nous souhaitons brièvement évoquer ici concerne les modèles de théorie des jeux qui s'intéressent au problème de l'altruisme sous ces différentes formes (voir chapitre 1).

Nombre de ces simulations, comme celles de Jean-Louis Dessalles, s'appuient sur les algorithmes génétiques introduits plus haut, afin de tester si l'évolution darwinienne permet ou non l'émergence de certaines catégories d'individus honnêtes ou tricheurs. Différents coûts numériques sont définis pour les différentes actions que peuvent entreprendre les agents, et le succès reproductif d'un individu est fonction de ses performances : plus ses coûts sont faibles et ses gains importants, plus nombreux seront ses descendants.

Nowak, sans recourir aux algorithmes génétiques, tente de déterminer les valeurs critiques de paramètres permettant le passage d'un stade non syntaxique à un stade syntaxique dans la communication humaine. Ces modèles mathématiques ne permettent cependant pas d'étudier la dynamique des transitions. L'émergence d'un code compositionnel est ainsi étudiée par opposition à un codage par signaux holistiques, et un seuil sur le nombre d'éléments sémantiques complexes à exprimer est déterminé, au delà duquel la sélection favorise l'émergence [Nowak et al., 2000]. De la même façon, Nowak étudie également comment un système de signaux peut être associé à un ensemble d'éléments sémantiques de façon efficace [Nowak and Krakauer, 1999], ou encore les conditions d'existence pour l'émergence d'une Grammaire Universelle au cours de l'évolution [Nowak et al., 2001].

Emergence de la symbolisation

Parallèlement à l'étude de l'émergence ou de l'évolution de conventions linguistiques, certains chercheurs se penchent sur une étape antérieure, à savoir l'émergence de la symbolisation.

Le modèle proposé par Cangelosi et Parisi nous semble l'un des plus intéressants à ce sujet [Cangelosi and Parisi, 1998], puisqu'il semble répondre à la critique mentionnée plus haut sur la motivation des agents. Les auteurs placent un ensemble d'agents dotés de capacités abstraites visuelles et locomotrices dans un univers où ils doivent subsister. Pour ce faire, ils doivent consommer des champignons qui se trouvent répartis dans l'environnement. Une partie de ces champignons est comestible et rapporte des points à ceux qui les consomment, quand d'autres sont au contraire empoisonnés et font perdre des points aux agents qui s'en nourrissent. Le modèle allie réseaux de neurones (de type perceptron multi-couches) pour la gestion du comportement des agents et algorithmes génétiques qui, comme précédemment, servent à sélectionner les meilleurs individus selon leurs performances. Ce sont ainsi des populations de réseaux de neurones qui sont soumises aux lois de l'évolution.

Chaque réseau multi-couches accepte sur sa couche d'entrée un input visuel (composé de 10 unités, permettant de spécifier les différents champignons vénéneux ou comestibles) et un input pour des signaux de communication (3 unités). En sortie, cinq neurones permettent de coder les mouvements que doit effectuer l'agent (pour se rapprocher ou s'éloigner des champignons), et d'autres permettent d'émettre un signal (3 unités).

Chaque agent possède une durée de vie fixe. Il gagne 10 points pour chaque champignon comestible ingéré, et perd 11 points s'il consomme un champignon vénéneux. Une population initiale de 100 agents évolue par phases. A chaque épisode, les agents les plus performants sont sélectionnés pour produire la génération suivante, et du bruit est ajouté à une partie des connexions des réseaux (10%).

Différentes simulations sont menées. Une en particulier oblige les agents à s'appuyer sur les signaux de communication d'autres agents pour savoir si le champignon est ou non comestible et s'ils doivent s'approcher de lui pour le consommer ou non. Pour chaque situation, deux agents sont tirés au hasard, et tous jouent donc un grand nombre de fois les "indicateurs" et les "indiqués". On observe alors l'émergence d'un système de communication honnête, qui permet aux agents qui reçoivent des messages de s'approcher correctement des champignons comestibles. Le langage utilisé permet ainsi d'améliorer les performances des agents. Les raisons de son émergence ne sont toutefois pas immédiates, puisqu'il n'est *a priori* pas nécessaire à l'émetteur des signaux de communication.

L'explication de l'émergence d'un tel système de communication s'explique peut-être par le fait que les agents jouent tour à tour le rôle d'émetteur et de récepteur, et que c'est la même structure qui est utilisée dans les deux cas, à savoir le perceptron multi-couches.

Notons ici que le modèle de Cangelosi et Parisi ne permet pas de conclure à l'émergence d'un altruisme réciproque. En effet, le nombre de champignons est suffisant pour tous les agents, et il n'existe ainsi pas de compétition entre eux. Il nous paraîtrait intéressant de reproduire le modèle et de l'étendre en examinant l'effet de la compétition sur le code de communication partagé (observerait-on des agents qui trompent délibérément leurs prochains pour bénéficier de plus de nourriture?).

Parfois en collaboration avec Cangelosi, Steven Harnad s'intéresse à l'émergence de la symbolisation dans un contexte moins naturel que le précédent. A partir de modèles à base de réseaux

de neurones de type perceptron multi-couches, il développe l'idée du vol symbolique (*"symbolic theft"*), qui correspond à la possibilité d'acquérir de nouveaux concepts à partir de concepts pré-existants, sans qu'une expérience sensorielle directe de ces nouveaux éléments soit nécessaire [Cangelosi et al., 2002].

3.1.5 Discussion

Il nous paraît utile de dégager ici quelques points fondamentaux des débats sur la modélisation informatique de l'émergence du langage. Ils nous permettront en effet de mieux contextualiser nos propres modélisations par la suite.

Accès au sens

En ce qui concerne l'émergence de la syntaxe, un des points importants pour l'apparition de conventions entre agents concerne l'*accès au sens*. Lorsqu'un individu communique de l'information à un autre, il le fait en effet sur la base de représentations sémantiques internes qui ne sont pas accessibles au récepteur, ce que Steels résume souvent par la formule *"no mind-reading"*. Comme nous l'avons vu, certaines modélisations outrepassent parfois purement et simplement cette restriction, mais d'autres insistent sur la possibilité de détecter le ou les concepts manipulés par le locuteur par des moyens extra-linguistiques et le partage de l'environnement. Sans cette possibilité de partage au moins partiel et ambigu des représentations, il paraît difficile de pouvoir construire une convention quelconque.

Pointer un objet du doigt est une façon simple de désigner à un individu un élément particulier sur lequel on va ou l'on a communiqué. Toutefois, il n'est pas toujours évident d'identifier le concept précis : si l'on pointe par exemple un objet composite, comment être sûr que l'on pointe l'objet dans sa totalité ou seulement l'une de ses composantes ? Si le problème semble aisé à résoudre pour des adultes, il est délicat pour le très jeune enfant dont l'espace conceptuel tout comme l'espace linguistique est en construction.

Une façon réaliste de représenter l'accès au sens par le biais de l'environnement est de recourir à des agents incarnés (des robots), dont les senseurs nécessairement non idéaux conduiront à des ambiguïtés lors des interactions (par exemple pour l'identification de plages de couleurs par des capteurs de lumière). Une autre possibilité est de simuler l'imperfection de la transmission sémantique par un "bruit sémantique" incorporé dans le modèle (voir par exemple les notions de portée et de focus sémantiques (*"meaning scope"* et *"meaning focus"*) de Steels [Steels and Kaplan, 1998]).

Il arrive souvent que l'ajout de bruit dans le modèle ne perturbe que peu l'émergence des caractéristiques qui apparaissaient en absence de bruit. Ce dernier est ainsi souvent un indicateur de robustesse du processus d'émergence. Il est dès lors légitime de s'interroger sur l'influence d'un accès au sens imparfait dans les processus d'émergence des conventions. Deux arguments peuvent être invoqués pour légitimer cet aspect : tout d'abord, l'utilisation d'un feedback extra-linguistique plutôt qu'un accès direct au contenu de l'"esprit" du locuteur peut entraîner une modification de la dynamique d'interaction qui, si elle paraît superficielle, peut avoir des conséquences importantes de par la non-linéarité des phénomènes en jeu. Ensuite, la présence de bruit peut venir jouer non pas sur les aspects qualitatifs des processus d'émergence, mais sur des aspects plus quantitatifs : temps de convergence, existence d'ambiguïtés ou de synonymes [Steels and Kaplan, 1998]...

Concluons par l'idée qu'un accès imparfait au sens aura d'autant plus de conséquences que les structures linguistiques manipulées seront abstraites : simples associations entre sens et formes phonétiques, ou au contraire structures d'organisation de la phrase (ordre des mots...) plus difficiles à atteindre *via* un feedback extra-linguistique.

Contraintes et structures

Différentes contraintes physiologiques ou cognitives sont le plus souvent prises en compte dans les modèles que nous avons présentés : contraintes en perception et en production à l'aide de modèles du tractus vocal ou de l'oreille, contraintes mnésiques grâce à des modèles de mémoire limitée... Toutefois, les contraintes structurelles du langage sont rarement prises en compte, si ce n'est dans des cas simples comme la compétition entre plusieurs mots d'un lexique ou plusieurs règles grammaticales pour l'expression d'un sens. Encore une fois, ceci est un constat et non pas un reproche, puisque les simulations ne se préoccupent généralement pas de différentes structures typologiques en même temps. Kirby a toutefois présenté plusieurs modèles mettant en jeu des contraintes entre structures afin d'observer l'émergence d'universaux ou de tendances implicationnels [Kirby, 1997].

Un autre phénomène générateur de contraintes est parfois absent des simulations, surtout dans les situations d'émergence où il n'est pas toujours jugé très pertinent : il s'agit de l'hétérogénéité de la population. Dans de nombreuses simulations dues à Steels, Kirby ou Batali, la population est le plus souvent homogène, et les interactions ont lieu de façon identique entre tous les individus. Ceci conduit en particulier au niveau du lexique à la compétition entre mots pour un même sens, et la sélection d'un seul d'entre eux après un temps plus ou moins long. Une hétérogénéité dans la population peut conduire à la préservation de plusieurs formes différentes, et à des phénomènes dynamiques intéressants. Elle peut-être envisagée de différentes manières : par le biais d'une distribution spatiale des individus comme dans [Kirby, 1997], par une distribution sociale comme dans [Nettle, 1999c], par la simulation de populations en contact comme dans [Marsico et al., 2000]... On constate par exemple qu'avec une distribution spatiale, différentes stratégies linguistiques peuvent co-exister dans une population.

Suivant la structure adoptée pour l'hétérogénéité de la population, les conséquences sur la dynamique d'évolution du système seront différentes. Le modèle le plus courant est celui d'une distance euclidienne entre les agents, qui sera proportionnelle à la force de leur interaction. C'est cette distance qui est adoptée le plus souvent dans les modèles spatiaux (où l'utilisation d'un tore plutôt qu'une grille fermée pour disposer les agents permet d'éviter les effets de bord et donc les dissymétries entre agents), et aussi dans les modèles sociaux de Nettle. Toutefois, de très nombreuses distances peuvent être définies à l'aide de métriques différentes. Différentes hétérogénéités peuvent également être prises en compte simultanément, comme par exemple une distribution sociale et spatiale. Notons ici que ce sujet de l'hétérogénéité d'un ensemble d'éléments fait écho au réductionnisme et à l'auto-organisation tels que nous les avons introduits au chapitre 2.

D'une façon générale, les phénomènes sociaux sont peu pris en compte dans les simulations actuelles sur l'émergence et l'évolution du langage. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, il semble cependant que ceux-ci jouent un rôle fondamental dans l'évolution du langage, et également dans son émergence. Une réflexion sur ce point est nécessaire, avec une définition plus précise du type d'interaction entre les agents (avec par exemple des liens forts ou faibles comme chez Milroy). Il semble ici qu'une métrique euclidienne ne soit pas la plus adaptée pour représen-

ter les situations réelles. Comme nous l'avons déjà souligné, nous pensons que c'est un mauvais choix de distance sociale qui explique les résultats de Nettle et nécessite l'existence d'individus hyper-influents pour observer un changement au niveau populationnel. Nous reviendrons sur ce point au cours du chapitre 6.

Emergence et évolution

Il est important de ne pas confondre modèle d'émergence et modèle d'évolution, même si ceux-ci semblent parfois reposer sur les mêmes mécanismes. La distinction entre les deux est d'ailleurs à rapprocher de l'ensemble des remarques précédentes. Dans le premier cas, il s'agit d'observer l'émergence d'une convention, et les facteurs primordiaux une fois la convention établie sont alors moins pertinents.

Dans les modèles d'émergence, les agents débutent généralement la simulation avec un répertoire de constructions linguistiques vide. Celui-ci se remplit progressivement au cours des interactions des agents entre eux. Un flux d'agents peut être mis en œuvre, et de nouveaux individus arrivent dans un contexte linguistique déjà formé. Néanmoins, ces agents sont identiques à ceux qui ont permis l'établissement de la convention, et ils peuvent créer de nouvelles structures de façon similaire et aussi importante.

Dans un contexte d'évolution, le principe est généralement de partir d'un contexte linguistique déjà formé, et d'envisager les évolutions du système à partir d'un état initial. Un point important à modéliser pour obtenir un modèle réaliste est l'arrivée de nouveaux agents, qui apprennent le langage mais avec une capacité d'innovation plus limitée que celle présente dans les modèles d'émergence. En effet, si les enfants et les adultes peuvent parfois innover, leur apprentissage de la langue cible est généralement assez fidèle et leur but n'est pas autant de faire émerger la convention que de l'acquérir et de la prolonger tout en y intégrant une partie de leur identité sociale. La distinction d'une phase d'acquisition et d'une phase adulte des agents est généralement utile à cette fin, et est souvent absente des modèles d'émergence. L'hétérogénéité de la population déjà évoquée est aussi un facteur important à prendre en compte, et la distinction entre enfants et adultes n'est finalement qu'une de ses composantes.

Mécanismes explicatifs et reproduction de la réalité

Le but d'un modèle est généralement de reproduire des phénomènes réels et par un processus de simplification et d'abstraction, d'en extraire les composantes pertinentes, c'est à dire qui permettent d'expliquer les caractéristiques de ces phénomènes.

Néanmoins, pour un phénomène dans la réalité, il peut parfois exister plusieurs mécanismes permettant de décrire en partie les caractéristiques observées. Dès lors, il faut être prudent lors de la réalisation d'un modèle, afin de ne pas proposer des mécanismes explicatifs qui ne reflètent pas la réalité. Bien sûr, l'erreur est toujours possible, mais certains cas semblent parfois être invalides. Si nous reprenons l'exemple de Steels sur les phénomènes stochastiques qui pèsent sur l'évolution du lexique [Steels and Kaplan, 1998], les synonymes apparaissent et peuvent demeurer stables uniquement en cas de stochasticité sur la forme des mots. La stochasticité peut donc être invoquée ici comme mécanisme explicatif de la stabilité des synonymes, mais il nous paraît plus pertinent de recourir aux notions de registres de discours et de contextes de communication pour expliquer comment différents synonymes peuvent persister dans la population. Ceci est d'ailleurs renforcé par le fait que le modèle de Steels ne rend pas compte de la stabilité des synonymes en cas

de stochasticité et de flux d'agents dans le système. Cette situation, qui devrait être proche de la situation réelle, est qualitativement différente puisque des synonymes parfois nombreux subsistent pour de nombreux concepts.

Conclusions préliminaires

Les modèles et les simulations informatiques ont permis de faire de grands progrès dans la compréhension de l'émergence des conventions linguistiques, à travers des phénomènes comme l'**auto-organisation** ou le caractère stochastique des interactions linguistiques.

Le paradigme est ainsi en plein développement, et l'on peut raisonnablement estimer que des modèles plus sophistiqués apporteront par exemple de nouveaux éléments de réponse sur l'émergence de la syntaxe, en particulier en lien avec des mécanismes cognitifs plus généraux.

Si le problème de l'origine est au cœur des débats, celui de l'évolution des langues est resté jusqu'à présent assez à l'écart des travaux de simulation. Daniel Nettle est l'un des rares à s'être penché spécifiquement sur la question *en tentant d'inclure des données de sociolinguistique*. Sa démarche nous semble importante et pertinente, car s'il est possible de simuler certaines évolutions linguistiques, un ancrage dans les conditions réelles d'utilisation du langage est indispensable pour reproduire et comprendre les mécanismes réels d'évolution. Cette démarche est bien sûr différente et complémentaire de celles visant à établir des conditions *nécessaires* ou *suffisantes* pour l'émergence de conventions ou l'adaptation de systèmes lexicaux ou phonologiques.

Parallèlement à la dimension cognitive du langage (qui s'exprime au travers de phénomènes comme la diffusion lexicale), c'est sur la dimension **sociale** du langage qu'il nous paraît important d'insister. L'utilisation de ce dernier comme outil de positionnement social semble en effet fondamental dans l'évolution des langues, et l'évolution des structures sociales des populations humaines au cours de l'histoire a très probablement joué sur la mise en place des familles de langues telles que nous les observons aujourd'hui. De telles structures sont rarement considérées dans les simulations d'émergence puisqu'elles ne semblent pas être alors au cœur du sujet, mais il semble important de les prendre en considération pour les étapes post-émergence, au vu des nombreux travaux de sociolinguistique qui les placent au centre du débat sur les changements linguistiques. Ceci passe en particulier par une prise en compte des schémas dynamiques liés à une structuration particulière de la population, par exemple en réseaux sociaux, et qui conduisent à des évolutions spécifiques des systèmes linguistiques.

Comme nous l'avons au chapitre 2, les caractéristiques structurelles du langage sont également fondamentales pour les changements linguistiques, et bien que des caractéristiques systémiques soient apparentes dans les simulations précédentes (interactions et auto-organisation des voyelles chez de Boer, interactions entre les mots du lexique pour un même concept...), elles s'inscrivent le plus souvent dans un contexte différent de celui introduit par Saussure et repris par les structuralistes du XXème siècle.

Les modèles que nous développerons au chapitre 6 tenteront d'aborder ces deux points.

3.2 Un outil de modélisation : la plate-forme LEMMingS

*Any rumors that the world is coming to an end just because
I'm about to release a 1.0-version are greatly exaggerated.*

Linus Torvalds (principal concepteur du système d'exploitation Linux).

Afin de réaliser nos simulations, un de nos besoins était un outil performant, tant en termes de puissance de calcul (et donc de rapidité) qu'en termes de traitement et de représentations des données. Plutôt que de faire un choix parmi les offres logicielles existantes, nous avons préféré développer nos propres programmes. Les raisons de ce choix sont d'abord présentées, avant une description plus précise de notre plate-forme.

3.2.1 Langages et outils logiciels

Lors de la description de l'approche modélisatrice dans la section précédente, nous avons détaillé différentes techniques et plusieurs paradigmes pour la modélisation des évolutions linguistiques et de l'origine du langage. Nous avons insisté sur le degré de mathématisation plus ou moins marqué des modèles et incidemment sur le type de simulations réalisées pour "incarner" un modèle.

Des langages dédiés aux mathématiques

Des logiciels (tels R, Maple ou Mathematica, pour ne citer qu'eux) proposent des répertoires très étendus de fonctions mathématiques et de représentations graphiques, et se prêtent de façon naturelle à la réalisation de simulations reposant sur des outils mathématiques tels que les équations différentielles (tout en permettant la mise en œuvre d'autres techniques, parfois fort facilement). Les graphiques très élaborés et faciles à produire (représentations tridimensionnelles, utilisation judicieuse des plages de couleurs...) sont un avantage, bien qu'ils ne soient pas toujours nécessaires pour les paradigmes que nous avons introduits. Le défaut de tels logiciels est qu'ils sont généralement lents (parfois très lents), et que leur gestion de la mémoire ne permet pas toujours de manipuler de très grands volumes de données efficacement.

Quelques caractéristiques des langages de programmation

Parallèlement à ces langages de programmation de haut niveau dédiés aux mathématiques existent de nombreux langages moins spécialisés et de plus bas niveau, tels Java, Lisp, C, C++, Haskell, Visual Basic... Nous pouvons distinguer différentes caractéristiques importantes, qui nous ont guidé pour notre choix du langage de programmation de notre logiciel :

- le caractère compilé ou interprété du langage. Alors que la compilation d'un programme produit un code directement exécutable par la machine (code machine), l'interprétation nécessite une "machine virtuelle" qui va convertir à la volée un premier code en un second compréhensible par la machine. Ceci a pour effet de diminuer les performances par rapport aux langages compilés, mais présente un intérêt pour le partage du code intermédiaire entre plusieurs systèmes d'exploitation (comme les applets ou les fichiers d'extension ".class" du langage Java) ;

- le caractère fonctionnel ou non du langage. Les langages fonctionnels (Lisp, Caml, Haskell . . .) adoptent une sémantique particulière de programmation qui fait reposer toutes les opérations sur la réalisation de fonctions munies d'arguments. Cette approche, accompagnée de contraintes de typage des objets manipulés, permet de réaliser des programmes dont on peut contrôler de meilleure façon la robustesse et la correction (les langages "sûrs" peuvent être indispensables dans les environnements où un programme ne doit pas "planter" : centrale nucléaire, engins spatiaux . . .) ;
- l'orientation objet éventuelle du langage. Ce paradigme de programmation propose une structuration des programmes en termes d'objet. Une définition très générale des objets peut être celle d'entités conceptuellement et fonctionnellement closes en interaction. L'objet représente ainsi un concept (au sens large), en mettant l'accent sur son indépendance vis à vis des autres concepts. Pour ce faire, il est doté d'un certain nombre de composantes (visibles ou non par les autres objets), qui traduisent les propriétés du concept qu'il représente, et de fonctions qui permettent d'agir sur ces propriétés ou d'y accéder.

De la même façon qu'il est possible de combiner les concepts ou de les faire dériver les uns des autres (le concept d'autruche dérive par exemple du concept d'oiseau en héritant de ces propriétés, et en possédant d'autres caractéristiques qui le rendent plus spécifique), un objet peut être constitué d'autres objets et hériter d'objets plus génériques que lui. Cet aspect se traduit de façon utile dans les langages de programmation orientés-objet, en permettant des économies dans l'écriture du code.

Il est aisé de se rendre compte de l'isomorphisme entre les notions d'agent et d'objet (l'agent étant une transposition de la notion d'objet au niveau de l'exécution du programme), ce qui rend les langages orientés-objet bien adaptés au développement de systèmes multi-agents.

Le "niveau" du langage est assez fortement corrélé au degré de performances obtenu et à la complexité de la tâche de programmation. Plus un langage est bas niveau, plus la charge de travail repose sur le programmeur et plus celui-ci doit faire attention à la correction de ces programmes ; les vérifications sont en effet moins nombreuses ou même absentes. La gestion de la mémoire est un bon exemple, puisque certains langages la prennent entièrement en charge, quand d'autres la laissent entièrement à la charge du programmeur (nombreuses sont les erreurs en C ou C++ imputables à l'oubli de déclarer un espace réservé en mémoire). En contrepartie de ces difficultés, les performances sont souvent bien supérieures, avec par expérience des gains d'un facteur pouvant aller jusqu'à 5 ou 10.

Présentation et choix du C++

Le langage C++ est l'évolution orientée-objet du langage C, et tous deux sont probablement les langages les plus utilisés depuis de nombreuses années. C'est un langage de bas niveau comparé à de nombreux autres (donc plus "difficile" à programmer), dépourvu initialement de possibilités de représentations graphiques, mais très performant. Son modèle objet n'est en fait que virtuel (les classes sont plus des conventions syntaxiques du langage, et sont transformées à un niveau rudimentaire de la compilation), ce qui participe à ses performances. Son succès ainsi que celui du C ont conduit à une optimisation des techniques de compilation, ainsi qu'au développement par les utilisateurs d'un très grand nombre de bibliothèques qui viennent combler l'aspect rudimentaire du langage de base (si on le compare à d'autres). Le *World Wide Web* permet un accès facile à ses bibliothèques, ainsi qu'à une documentation volumineuse.

Ces différentes caractéristiques et les besoins que nous avons pu concevoir pour nos simulations nous ont conduit à faire le choix final du langage C++ pour le développement de notre logiciel²⁸ :

- ses performances très élevées permettaient d'envisager au mieux des simulations avec un grand nombre d'agents ou des bases de données importantes ;
- les structures objet, avec leurs propriétés de compositionnalité et d'héritabilité, permettaient la stratégie de conception que nous allons développer dans le chapitre suivant ;
- l'utilisation d'une bibliothèque graphique nommée **Gtk+2.0** nous offrait la possibilité d'une utilisation du logiciel sous Windows et Unix/Linux avec de bonnes performances [GTK, 2002] ;
- enfin, notre intérêt pour la programmation objet et les langages bas-niveau et performants nous poussait dans cette direction.

Il nous faut mentionner l'influence sur le développement du logiciel de l'accès à la plate-forme *Babel*, créée par Angus Mac Intyre au laboratoire Sony CSL de Paris [Mac Intyre, 1998]. Sans avoir eu accès au code du noyau (écrit en Lisp), ce logiciel fut cependant notre inspiration pour différents aspects.

3.2.2 Description du logiciel

Le nom LEMMING est l'acronyme de l'expression *Language Evolution Modelling and Monitoring System*. Le but premier de ce logiciel est la réalisation de simulations informatiques pour le test de divers modèles liés à l'émergence et à l'évolution du langage. Il peut néanmoins également être utilisé pour aborder des questions et des problèmes issus d'autres disciplines.

Lors du développement du logiciel, un objectif fut la poursuite de principes généraux menant à un produit utile et performant pour différents aspects. Nous détaillons tout d'abord ces principes, avant d'aborder la structuration naturelle du code qui en a découlé.

Principes généraux de développement

Le développement de notre logiciel s'est articulé autour de plusieurs principes qui nous paraissaient souhaitables pour son utilisation par différents utilisateurs et pour son utilité à long terme :

- facilité d'utilisation à l'exécution ;
- facilité de développement pour le programmeur ;
- possibilité forte d'évolution et d'ajout de fonctionnalités ;
- qualité du code.

Afin de répondre à ce cahier des charges, nous avons adopté de façon correspondante les stratégies globales suivantes :

²⁸Le langage Java que nous avons utilisé pour une première version de notre logiciel est un langage très proche du C++, mais son caractère interprété le rendait trop lent en exécution pour des simulations mêlant base de données topographiques et grand nombre d'agents. La solution de définir des bibliothèques en C++ incorporées aux sources en Java s'est révélée peu efficace en terme de qualité et de gestion du code.

- création d'une interface graphique, utilisation préférentielle de la souris ;
- adoption d'une structure en deux couches, composée d'un noyau et de modules externes ;
- utilisation du modèle objet, composition et héritage des classes tant au niveau du noyau que des modules pour permettre les extensions ;
- forte modularité du code.

L'adoption d'une structure en deux couches repose sur l'idée suivante : créer tout d'abord une partie centrale dans le logiciel, un noyau qui contiendra l'ensemble des fonctionnalités de base, indépendantes des spécificités et des buts poursuivis par une simulation particulière, puis un ensemble de modules proposant des fonctions que l'utilisateur pourra intégrer ou non selon les besoins d'une expérience spécifique. Ceci permet bien sûr de ne pas inclure des éléments inutiles, et d'obtenir une structuration plus claire et élégante du code. En outre, les développements ultérieurs se font de façon incrémentale : chaque nouvelle fonctionnalité programmée pour les besoins d'une application est présente en tant que module indépendant, et peut-être réemployée et/ou enrichie pour des simulations futures.

Parmi les fonctionnalités de base contenues dans le noyau se trouvent les représentations graphiques et textuelles de base (qui peuvent être éventuellement héritées et enrichies dans des modules supplémentaires), l'interface graphique générale, les possibilités de sauvegarde, les scripts...

Il est à noter qu'il n'est pas nécessaire de recourir au noyau pour pouvoir utiliser les différents modules. Ceux-ci peuvent être incorporés en tant que bibliothèques dans tout programme C++.

La composition et l'héritage des objets permet non seulement une bonne structuration du code, mais également une réutilisation de celui-ci qui permet de gagner un temps considérable dans le développement. Ainsi, si deux classes (les descriptions des objets dans le code) proposent la même fonctionnalité (par exemple la détection du pointeur de la souris dans la fenêtre graphique), il sera plus économique de définir une classe réalisant cette opération, et de la faire hériter par les deux premières que d'écrire deux fois le même code. En outre, un mécanisme appelé *surcharge* offre les deux options suivantes :

- spécifier (déclarer) sans les définir, ou déclarer par défaut, les propriétés qu'une sous-classe offrira ou devra offrir. Par exemple, une *super-classe* définissant d'une façon générale les interfaces graphiques pourra spécifier que chaque sous-classe (définissant une interface graphique particulière, par exemple pour tracer des courbes) *devra* gérer les clicks de la souris. Elle pourra également proposer une gestion par défaut de ces clicks ;
- définir des exceptions à un comportement général. Pour reprendre l'exemple précédent, une sous-classe pourra redéfinir la gestion de la souris, et plutôt que d'adopter le comportement générique proposé par la super-classe, opter pour son propre mode de traitement. De façon intuitive, pour 1000 éléments dont 3 se comportent différemment des autres, il est plus facile d'édicter une loi générale pour tous les éléments, et de préciser les exceptions (définition intensive), plutôt que de spécifier le comportement des 1000 éléments individuellement (définition extensive). Il en est de même pour l'écriture d'un programme.

Le fait de pouvoir définir les spécificités de chaque cas particulier à partir d'une déclaration plus générale permet ensuite de ne raisonner que sur le cas principal (en termes de prise en

compte dans le code). Là encore, il y a économie dans l'écriture du programme. L'utilisateur peut ainsi définir ses propres extensions des représentations graphiques et textuelles de base : il suffit qu'elles répondent correctement au canevas générique de ses classes pour être reconnues et traitées par le noyau.

Description du noyau

Le noyau constitue comme son nom l'indique le cœur du logiciel LEMMING. Il regroupe les fonctionnalités de base du logiciel.

Description des composants graphiques de représentation des données. Afin encore une fois de permettre une bonne évolution du logiciel, nous avons tenté d'appliquer le principe de modularité au noyau lui-même. Les différentes interfaces graphiques ou textuelles permettant de représenter les données sont ainsi définies sous formes de bibliothèques qui sont incorporées au noyau, et peuvent être utilisées indépendamment de ce dernier. L'utilisateur reçoit dans ce dernier cas la charge de la gestion des différentes fonctions : quand faut-il ajouter de nouvelles données, quand rafraîchir l'image présentée à l'écran...

Les représentations graphiques de base présentes dans le noyau sont actuellement les suivantes :

- un graphe permettant de dessiner des courbes en fonction du temps. Ces courbes sont en fait des ensembles de points (nous continuerons d'employer ce terme de façon erronée par la suite par commodité), qui peuvent ou non être connectés entre eux. Le mode par défaut est une compression horizontale de la courbe au fur et à mesure de la progression temporelle de la simulation, mais il est possible de représenter la situation sur l'intervalle de temps de son choix. Plusieurs courbes peuvent figurer sur le même graphe, à l'aide d'un jeu de couleurs et de figures pour les identifier. L'échelle des ordonnées peut être définie pour chacune d'entre elles. Une légende sous le graphe fournit une légende pour chaque courbe ;
- un graphe permettant de représenter des ensembles de points ou de vecteurs dans un espace bidimensionnel. Ce graphe permet d'afficher par exemple des populations d'agents évoluant dans un monde à deux dimensions, comme c'est très souvent le cas dans les simulations sur l'origine du langage lorsque l'on souhaite observer l'émergence de motifs spatiaux. Là encore, différentes populations peuvent être affichées avec différentes couleurs et figures. Il est également possible de "zoomer" à volonté sur une région de la carte. Un autre élément est la possibilité d'ajouter en arrière-plan une image représentant les valeurs prises par une variable continue dans l'espace bidimensionnel. Cette image se conforme bien sûr aux éventuels zooms, et permet par exemple de représenter une analyse spectrale ou encore une carte topographique terrestre (voir ci-dessous). Une légende résume ici aussi les significations des différents ensembles d'éléments affichés. Une grille peut-être sur-imposée en avant-plan pour une meilleure indication des échelles de valeurs, et la position de la souris ainsi que l'éventuelle valeur en un point sont également indiquées (s'il existe bien une variable continue qui prenne une valeur en chaque point) ;
- un affichage pour des lignes de texte. Ici encore, en jouant éventuellement sur les couleurs, il est possible d'afficher différents textes précédés d'une légende. L'affichage contient une fenêtre déroulante qui s'adapte automatiquement à la longueur du texte total à présenter ;

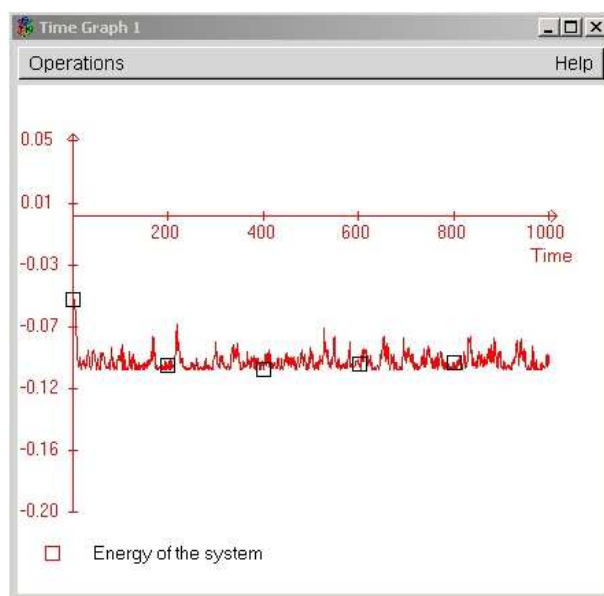


FIG. 3.12 – Le composant graphique **TimeGraph**, pour l’affichage de courbes de fonctions dépendantes du temps

- un module permettant la sauvegarde de lignes de texte vers des fichiers. Ce module est identique au précédent, mais la sortie texte se fait désormais dans un fichier.

Les figures 3.12, 3.13 et 3.14 illustrent les trois premiers composants précédents. Pour chacun d’entre eux, il est possible de sauvegarder la fenêtre graphique sous forme d’une image **png** (*Portable Network Graphics*), un format graphique répandu). Ceci permet ensuite d’insérer facilement les résultats graphiques dans des rapports ou articles, et la taille des fenêtres est modifiable pour s’adapter au mieux à la mise en page du document cible. La sortie de valeurs dans des fichiers texte rend possible des traitements ultérieurs et en particulier des analyses par d’autres logiciels (bénéficiant éventuellement de sorties graphiques plus élaborées).

Pour chaque affichage, une valeur entière définit la fréquence avec laquelle il doit être remis à jour ; une valeur de 10 signifie ainsi que tous les 10 pas de temps, le programme re-dessine l’image présentée à l’écran, ou écrira de nouvelles données dans le fichier concerné.

Pour le premier affichage, une seconde valeur entière définit également la fréquence avec laquelle de nouveaux points sont ajoutés à la courbe. Pour un point, la valeur ajoutée est en fait la moyenne d’une fonction sur un intervalle, défini par une troisième valeur entière, et qui peut-être réduit à un pas de temps. Moyenner une valeur sur un intervalle permet de lisser les variations trop importantes de certaines fonctions et d’observer le comportement moyen d’un indicateur. Envisageons par exemple le cas d’un indicateur très simple du succès des interactions, qui prend la valeur 1 lors d’une interaction réussie et 0 dans le cas contraire. Dans ce cas, un affichage brut des valeurs produit une courbe très difficile à lire, car oscillant trop rapidement entre les valeurs 0 et 1. Au contraire, moyenner les valeurs de l’indicateur sur un intervalle temporel suffisamment important permettra d’observer des variations moyennes significatives de l’évolution du succès des interactions.

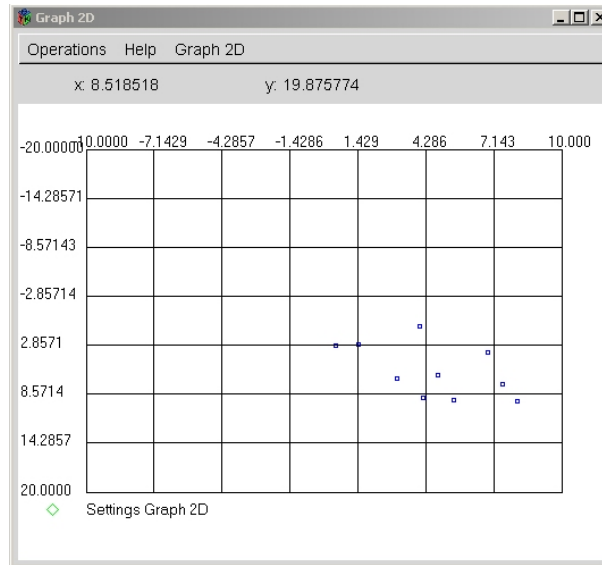


FIG. 3.13 – Le composant graphique **Graph2D**, pour la représentation d’espaces bidimensionnels

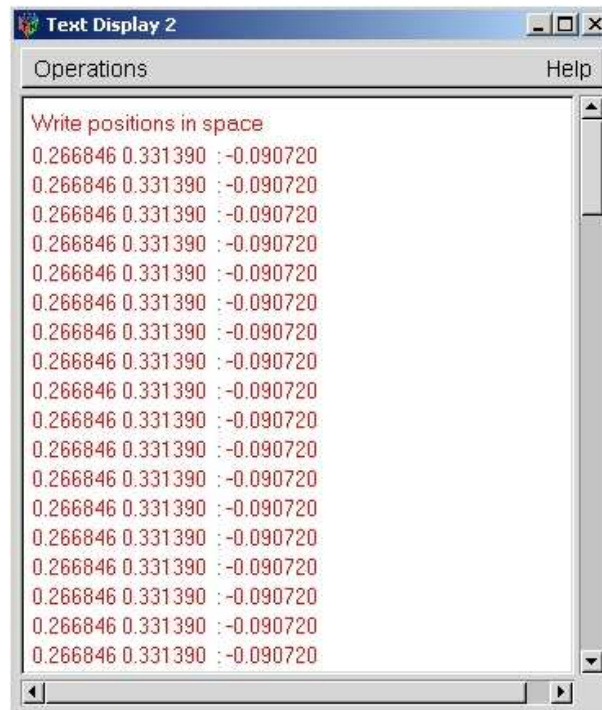


FIG. 3.14 – Le composant graphique **TextDisplay**, pour l’affichage de texte

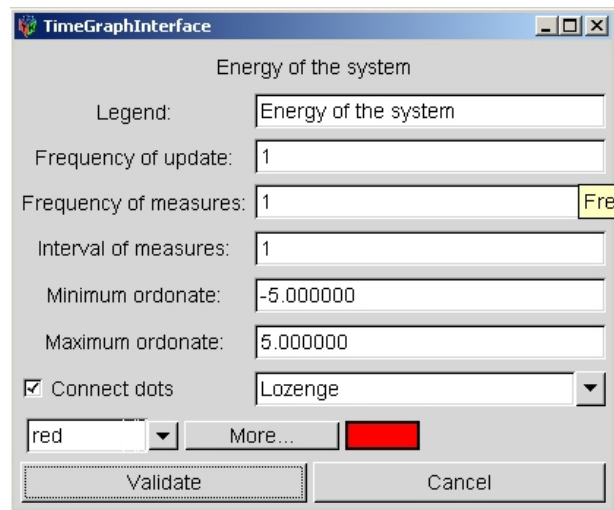


FIG. 3.15 – Une interface pour modifier les paramètres d’un prototype de courbe pour le composant graphique TimeGraph

Gestion des prototypes graphiques ou textuels. Nous avons introduit dans les paragraphes précédents les différents composants graphiques de l’interface. Pour pouvoir ajouter des éléments à ces composants (une courbe, un ensemble de points ou des lignes de texte), le programmeur va pouvoir définir des *prototypes*. Un prototype permet de définir les attributs de l’élément qui sera porté à l’écran dans l’un des affichages ou dans un fichier, par exemple pour les courbes :

- la couleur des points et des lignes qui les connectent éventuellement ;
- la figure (losange, cercle, croix. . .) identifiant la courbe dans la légende et sur le graphe ;
- les valeurs minimale et maximale pour l’axe des ordonnées ;
- l’interconnexion ou non des points (pour former une vraie courbe ”brisée”) ;
- les 3 valeurs entières de la fréquence d’affichage, de la fréquence d’ajout des points et de l’intervalle de moyennage pour établir les ordonnées de ces points ;
- éventuellement la valeur d’un argument qui sera transmis à la fonction indiquée par l’utilisateur pour le calcul de la valeur de la fonction au temps t .

Ce dernier argument permet de modifier le calcul de la fonction au cours de la simulation. Il pourra être remplacé par les paramètres que nous présenterons par la suite.

Il est nécessaire pour le programmeur de spécifier une première fois les prototypes dans le corps de son programme, en indiquant en particulier la fonction qui sera appelée pour obtenir les différents éléments à afficher. Cette fonction ne pourra plus être modifiée par la suite, mais l’utilisateur de l’interface pourra néanmoins modifier l’ensemble des autres attributs d’un prototype en cliquant sur sa légende dans le composant graphique correspondant. Un clic sur un élément entraînera l’apparition d’une interface semblable à celle présentée par la figure 3.15. Il est donc possible à chaque instant de modifier les graphiques pour obtenir en particulier les meilleures images à insérer dans des documents externes.

Paramètres et fonctions à répétition. Afin de rendre les simulations plus interactives, il est intéressant de pouvoir modifier certains paramètres du modèle au début ou en cours d'exécution. Ceci est possible grâce à l'objet **Parameter**, qui va lui aussi apparaître dans la liste d'éléments graphiques de la fenêtre principale (voir ci-dessous). Un clic de souris sur un paramètre affiche une fenêtre graphique contenant sa valeur, qu'il est alors possible de modifier.

Le dernier élément à apparaître dans la liste des prototypes sus-citée est le prototype de *fonction à répétition*. Cette dernière permet d'exécuter automatiquement avec une certaine fréquence et pendant un nombre de pas plus ou moins grand une fonction définie par l'utilisateur.

Génération de nombres aléatoires. Certaines simulations nécessitent de générer un nombre très important de nombres aléatoires, en particulier pour l'étude de mécanismes stochastiques. Le langage C++ dispose d'un générateur de nombres pseudo-aléatoires²⁹, mais il s'est révélé trop peu performant pour être utilisé dans les simulations que nous détaillerons par la suite, car le caractère non-aléatoire des suites de nombres générées venait fausser les résultats. Nous avons donc eu recours à un générateur baptisé générateur de Mersenne, qui offre une aléatoireité suffisante.

Description de l'interface graphique principale. Parallèlement aux différents affichages dans lesquels l'utilisateur peut faire apparaître différents types de données, une interface principale permet d'accéder aux principales fonctionnalités du logiciel, et de gérer les affichages précédents et les prototypes graphiques, comme le montre la figure 3.16.

Les menus dans la partie supérieure de l'interface offrent la possibilité de replacer une simulation dans son état initial (**reset**), de charger des scripts (voir ci-dessous), ou d'afficher des informations sur la plate-forme.

Les boutons à l'étage inférieur permettent le contrôle de l'évolution temporelle de la simulation. Un bouton permet l'initialisation de la simulation et un autre l'exécution d'un certain nombre de pas de temps. Ce nombre de pas est spécifié par l'utilisateur dans le cadre de droite.

La partie inférieure de l'interface est utilisée par une liste d'éléments qui vont permettre l'ouverture et le remplissage des composants graphiques introduits plus haut, ainsi que la gestion des paramètres et des fonctions à répétition. Un système d'icônes permet une identification rapide des différents affichages et des prototypes correspondants, ainsi que des paramètres.

Trois icônes permettent la création des composants graphiques **TimeGraph**, **TextDisplay** et **FileWriter** (sortie textuelle vers un fichier). Pour le composant **Graph2D**, chaque arrière-plan possible pour le graphique se traduit par une ligne dans la liste, tout comme les prototypes définis dans le programme de la simulation et les paramètres.

Afin de privilégier une utilisation intuitive et aisée grâce à la souris, le mécanisme requis pour la manipulation des graphiques et des prototypes est celui du *drag & drop* : après la création d'un affichage, l'utilisateur peut choisir l'un des prototypes en adéquation dans la liste par une pression sur le bouton de la souris, et le déplacer jusqu'à l'affichage pour l'y ajouter en relâchant le bouton. Ce mécanisme peut également fonctionner entre deux affichages de même nature, et l'utilisateur peut donc encore une fois régler au mieux ces affichages pour réaliser les images les plus pertinentes pour des documents externes.

²⁹Il n'est pas possible pour un ordinateur (et encore moins pour un être humain) de générer des séries de nombres entièrement aléatoires.

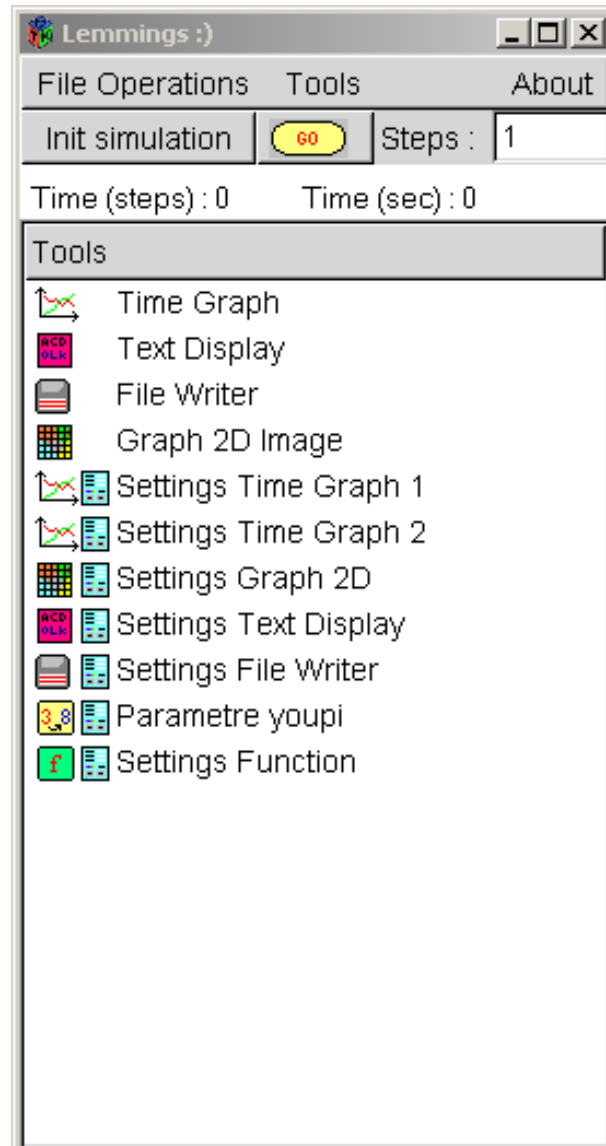


FIG. 3.16 – Interface graphique principale du logiciel Lemmings

Une poubelle située dans la partie inférieure de l'interface principale permet également d'effacer des représentations créées inutilement.

Scripts et utilisation "batch". Certaines validations de modèles ou expériences nécessitent l'exploration d'un espace de paramètres parfois important. Il suffit en effet de croiser les valeurs de 2 ou 3 paramètres sur des plages de valeurs même réduites pour obtenir un grand nombre de simulations à réaliser. Il est alors rapidement fastidieux de réaliser les mêmes opérations un grand nombre de fois pour la mesure des résultats des expériences (ouvrir les affichages, les remplir, effectuer des sauvegardes...). Si de plus le temps nécessité par une simulation est important, l'utilisateur est alors contraint de passer un temps considérable devant son écran pour contrôler le déroulement des événements.

Une réponse naturelle à ce problème est la possibilité de réaliser des traitements automatisés, où les différentes opérations à accomplir et les variations des paramètres sont prises en charge par la machine qui enchaîne les différentes simulations sans perte de temps. La spécification de ces chaînes d'action peut se faire par la lecture de fichier de *scripts*. C'est un tel mécanisme, bien que sous une forme assez rudimentaire, que nous avons introduit dans le noyau du logiciel LEMMingS.

Une suite de commande admissibles a été définie pour les fichiers de scripts, et permet l'ouverture, la fermeture et la sauvegarde des différents affichages, la modification des paramètres, l'exécution d'un certain nombre de pas de temps, la ré-initialisation de la simulation, ainsi que des boucles de type FOR permettant d'imbriquer les plages de valeurs des paramètres étudiés (ce qui permet de croiser ces derniers).

En conclusion, nous pouvons souligner le fait que la réalisation du noyau tel que nous l'avons décrit a fait appel à un certain nombre de techniques de programmation (dont certaines touchant aux limites du compilateur dont nous disposons (spécialisation partielle des classes *template* par exemple)) : fonctions *template* permettant de prendre en compte de façon générique des objets de types différents, utilisation de pointeurs sur fonctions, mise en place d'une interface graphique, et en particulier du mécanisme *drag and drop*... Le développement du logiciel a donc été un processus assez long, et a été en lui-même une source d'apprentissage et de progrès dans la maîtrise de la programmation.

Insertion du noyau dans les programmes de l'utilisateur. L'utilisation du noyau dans les simulations se fait de la façon suivante : l'ensemble des classes est défini dans une librairie que le programmeur intègre à la compilation dans son programme. Il suffit alors de faire démarrer l'application en "donnant la main" au noyau, c'est à dire en lui cédant la gestion des événements. Plus précisément, la bibliothèque graphique **Gtk+2.0** utilisée pour l'ensemble des composants graphiques est basée sur un mode de fonctionnement "événementiel". Après avoir été lancé, le programme se place dans un état d'attente. Lorsqu'il enregistre des événements (ouverture ou fermeture d'une fenêtre graphique, mouvements de la souris, click sur un bouton...), il invoque la fonction à laquelle l'événement est rattaché. Cette fonction peut alors déclencher une série d'actions, comme l'évolution de la simulation pour un certain nombre de pas de temps.

Description des modules

Pour les besoins des différentes simulations que nous avons développées lors de notre travail de recherche, différents modules touchant à différents domaines ont été conçus. Afin d'illustrer

cette diversité, nous pouvons préciser une partie de ces composants et introduire brièvement leurs fonctionnalités.

- une bibliothèque de fonctions mathématiques élémentaires absentes de la bibliothèque de base du C++ (**math.h**) : loi de Gauss et lois dérivées, distances euclidienne et dérivées, fonctions de traitement de tableaux (min, max, tri, produits de convolutions)...;
- une bibliothèque pour la réalisation d'analyses spectrales de signaux sonores, à l'aide de transformées de Fourier. Ces analyses spectrales peuvent ensuite être visualisées grâce au graphe affichant des espaces bidimensionnels (voir figure 3.17) ;
- le modèle DRM (Distinctive Region Model) de Carré et Mrayati [Carré and Mrayati, 1993]. Ici, le code natif a juste été légèrement transformé et placé dans une bibliothèque. Ce modèle permet de simuler la production des voyelles (ainsi que de quelques consonnes) avec un tractus artificiel composé de tubes aux longueurs et sections variables ;
- un module regroupant différents outils pour le traitement des voyelles et la simulation de leur perception : transformations formants/barks - barks/formants, définition des principales voyelles... ;
- une base topographique terrestre et sous-marine de l'ensemble du globe, bâtie à partir des données de la base TerrainBase [Row and Hastings, 1999] des National Geophysical Data Center et World Data Center-A for Solid Earth Geophysics. Cette base fournit les altitudes pour l'ensemble de la planète avec une précision de 5 minutes d'angle (soit un point pour $25km^2$ environ). A l'aide d'un module graphique, il est possible de visualiser la topographie terrestre selon différentes projections cartographiques (fournies par le logiciel PROJ 4.3 [Evenden and Warmerdam, 2000]), en faisant des zooms sur les régions sujettes à l'étude, ainsi qu'en faisant varier le niveau marin. Ceci fut particulièrement utile pour le travail que nous détaillerons dans le chapitre 5. Il est également possible de faire évoluer des agents virtuels dans cet environnement (voir figure 3.18) ;
- un ensemble de réseaux de neurones artificiels tels le perceptron multi-couches, la carte de Kohonen ou le réseau hebbien auto-associatif. Un réseau de neurones beaucoup plus réaliste, inspiré du modèle de Hopfield et Brady a également été développé pour une étude sur le *perceptual magnet effect* en acquisition, qui rend compte de l'apparition des catégories perceptuelles (en collaboration avec Bong Au, du *Language Engineering Laboratory* de la *City University of Hong Kong*) [Hopfield and Brody, 2000] [Hopfield and Brody, 2001] ;
- un module pour simuler un univers bidimensionnel clos ou torique (avec les mesures de distance correspondantes, et des fonctions pour déplacer des agents dans cet environnement) ;
- des bibliothèques permettant la gestion de population d'agents (définition d'une classe "population", évolution démographique, contacts entre agents...) ;
- des modules "cognitifs" pour des agents plus sophistiqués, reposant par exemple sur des cartes de Kohonen modifiées pour l'acquisition de catégories vocaliques, des procédures d'interactions "linguistiques" entre agents...

Intégration des commandes du logiciel LEMMINGs dans une simulation

Ce dernier paragraphe a pour but d'illustrer le procédé simple par lequel l'utilisateur inclut les fonctionnalités du logiciel LEMMINGs dans le code de sa propre simulation. Le nombre de commandes permettant l'interconnexion avec le noyau est en fait relativement restreint. Nous

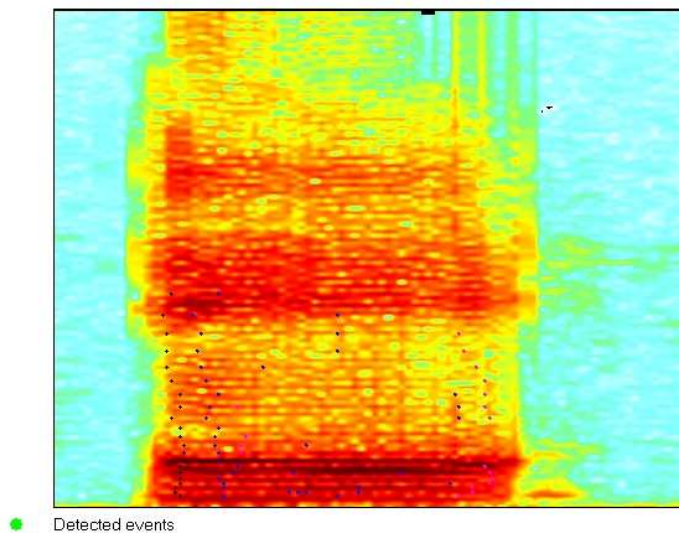


FIG. 3.17 – Exemple de module pour la plate-forme LEMMingS : transformée de Fourier et détection d'événements dans le signal

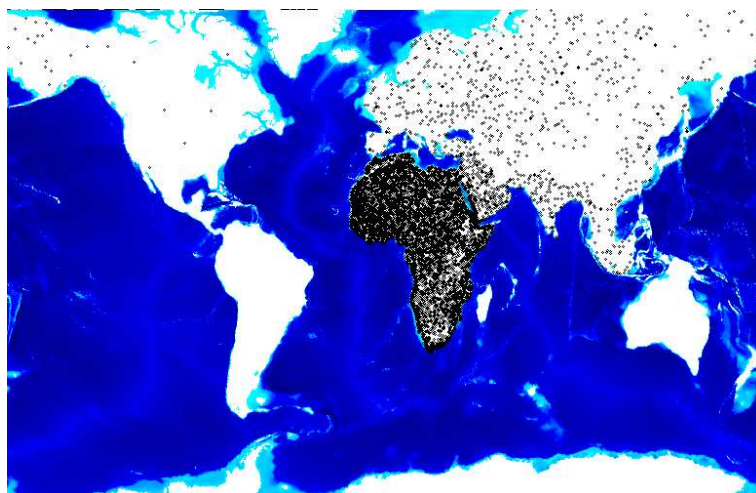


FIG. 3.18 – Exemple de module pour la plate-forme LEMMingS : module de cartographie

décrivons successivement les deux aspects majeurs de cette intégration, à savoir la définition de la classe principale du modèle, et le passage des prototypes graphiques.

Définition du monde de l'utilisateur. Afin de pouvoir mettre en œuvre les bibliothèques du logiciel Lemmings, le code de l'utilisateur doit nécessairement reposer sur une classe dénommée **World**. C'est cette classe qui sera manipulée au niveau du noyau de LEMMING. La définition minimale est spécifiée dans le code suivant :

```
#include "AllClasses.h"

class World : public AbstractWorld
{
public:

    void init();
    void creation();
    void evolution();
    void reset();

    World();
    virtual ~World();
};
```

La classe **World** doit nécessairement contenir les quatre fonctions **init()**, **creation()**, **evolution()** et **reset()**. La première est celle appelée lors de l'initialisation du logiciel et de la simulation. La seconde est mise en œuvre lorsque l'utilisateur presse le bouton **Init simulation** de l'interface principale. La troisième sera appelée à chaque pas de temps de la simulation, et enfin la dernière permettra de réinitialiser une expérience (elle devra donc libérer la mémoire utilisée par les différents objets, remettre les variables à leur valeur initiale si nécessaire...).

L'intérêt de la fonction **init()** est de pouvoir envoyer des prototypes au noyau et les afficher à l'écran avant la création du monde de l'expérience avec le bouton **Init simulation**. Ceci permet de laisser à l'utilisateur la possibilité de modifier certains paramètres qui seront utilisés lors de la création du monde, par exemple les dimensions de l'environnement où se déplaceront des agents, le nombre d'agents...

Mise en œuvre des différents composants graphiques et textuels. Les lignes de code ci-dessous illustrent l'inclusion de différents composants dans le programme de l'utilisateur.

Les déclarations des **Settings** seront effectuées dans les fichiers d'en-tête (d'extension **.h**). L'exemple suivant illustre la déclaration de deux **TimeGraphSettings**, d'un **FileWriterSettings** et d'un **TextDisplaySettings**, ainsi que celle des fonctions auxquelles ils référeront :

```
class World : public AbstractWorld
{
private:
    ...
```

```

TimeGraphSettings *energy_time_graph;
TimeGraphSettings *barycentres_variation_time_graph;
FileWriterSettings *positions_file_writer;
TextDisplaySettings *positions_text_display;

public:
...

float get_energy();
float get_barycentres_distance(int parameter);
Vector<char *> *write_positions();
};

```

Les méthodes `get_energy()` et `get_barycentres_distance(int parameter)` correspondent aux deux **TimeGraphSettings**, tandis que la troisième méthode sera utilisée à la fois pour le **TextDisplaySettings** et le **FileWriterSettings**. Pour ce faire, elle renvoie un vecteur de chaînes de caractères, qui seront soit affichées à l'écran, soit inscrites dans un fichier.

Dans les fichiers de définition des méthodes (d'extension `.cpp`), une méthode contiendra la définition des différents prototypes, tandis que les différentes fonctions pour les **Settings** précédents seront définies de façon classique :

```

extern Command *command;

void World::creation()
{

energy_time_graph =
    create_new_time_graph_settings<World>("Energy of the system",1, 1,
                                          1, -0.2, 0.05, true, red, square,
                                          get_energy, this);

barycentres_variation_time_graph =
    create_new_time_graph_settings<World>("Evolution of the barycentre", 1, 1,
                                          1, 0.0, 5.0, true, blue, lozenge,
                                          get_barycentres_distance, this);

positions_file_writer =
    create_new_file_writer_settings<World>("Write positions in space", 1,
                                          write_positions, this);

positions_text_display =
    create_new_text_display_settings<World>("Write positions in space", 1,
                                          green, write_positions, this);

command->add_settings(energy_time_graph);
command->add_settings(barycentres_variation_time_graph);
command->add_settings(positions_file_writer);
command->add_settings(positions_text_display);
...
}

```

```
float World::get_energy() {
    // Ici, il faut récupérer l'énergie...
    float *tab = population->get_items_frequencies_for_agent_and_context(0, 0);
    return population->get_energy(tab);
}

float World::get_barycentres_distance() {
    return population->get_barycentres_distance();
}

Vector<char *> *World::write_positions() {
    char *s;
    Vector<char *> *v = new Vector<char *>(101);
    float *tab;

    for (int i = 0; i < 100; i++)
    {
        tab = population->get_items_frequencies_for_agent_and_context(0, 0);
        s = (char *) malloc(50);
        sprintf(s, "%f %f : %f", tab[0], tab[1], population->get_energy(tab));
        v->addElement(s);
    }
    return v;
}
```

La création d'un prototype de composant graphique ou textuel se fait en appelant la fonction correspondante : `create_new_time_graph_settings(...)` pour les `TimeGraphSettings`, `create_new_file_writer_settings<World>(...)` pour les `TimeDisplaySettings`...

Pour chaque fonction, un ensemble de paramètres spécifiques est transmis et permet de définir le cas échéant :

- la couleur des courbes ou des autres éléments graphiques (`TextDisplay`, `Graph2DSettings`, `TimeGraphSettings`);
- les figures des composants graphiques (`Graph2DSettings`, `TimeGraphSettings`);
- les valeurs minimale et maximale de l'axe des ordonnées (`TimeGraphSettings`);
- la fréquence et l'intervalle de mesure des données (pour les `TimeGraphSettings`).

En plus de ces paramètres spécifiques, d'autres paramètres sont communs à l'ensemble des définitions de prototypes : le nom du prototype tel qu'il apparaîtra dans l'interface principale et dans la légende des composants graphiques, la fréquence de mise à jour des composants à l'écran ou des fichiers, le nom de la fonction qui doit être appelée pour fournir les valeurs requises par le composant, et la référence à l'objet qui contient la fonction appelée, ici l'objet `world`, représenté par le pointeur réflexif `this`.

Une fois les prototypes définis, il suffit de les envoyer au noyau de LEMMING pour qu'ils soient pris en compte et affichés à l'écran. Ceci se fait toujours par l'intermédiaire de la méthode `command->add_settings(...)`. L'objet `command` est l'un des deux objets principaux du noyau, défini dans d'autres fichiers, et ici utilisé grâce à sa déclaration externe (`extern Command *command`).

3.2.3 Conclusions

Nous pensons que la plate-forme LEMMingS peut être un outil performant pour le développement de simulations sur l'origine et l'évolution du langage et des langues. Le nombre de modules qui ont été développés au cours de la période 1999-2002 permet déjà d'aborder un nombre de situations variées, que ce soit à l'aide de réseaux de neurones, de systèmes multi-agents, en s'appuyant sur des données topographiques...

Un de nos soucis dans un futur proche est de proposer cette plate-forme à la communauté scientifique, en permettant l'accès non seulement au code du noyau et des modules, mais également en rédigeant un manuel d'utilisation complet et en documentant le code informatique de façon claire. L'utilisation du réseau Internet sera privilégiée pour faire connaître le logiciel, qui est déjà utilisé par un autre membre du laboratoire et en collaboration avec des étudiants de la *City University of Hong Kong*.

Premières conclusions et postulats d'étude

Il semblait impensable à père de sacrifier des millénaires d'évolution et d'industrie paléolithique, pour repartir à zéro en pauvres singes arboricoles. Notre grand-père, disait-il, se serait retourné dans sa tombe, laquelle se trouve à l'intérieur d'un crocodile, si son fils avait trahi tout l'effort de sa vie. Non, nous devons rester, et nous servir de notre tête. Il nous fallait trouver un truc pour empêcher les lions de nous manger, et une fois pour toutes. Mais lequel ? C'était le problème clé. Telle était la beauté de la pensée logique, disait-il : elle vous permet d'éliminer toutes les conjectures, jusqu'à ce qu'il ne reste que la dernière, qui est la bonne.

Roy Lewis, Pourquoi j'ai mangé mon père [Lewis, 1990] (p.40)

Il nous paraît utile pour conclure cette première partie de définir précisément notre position et les postulats que nous avons adoptés en conséquence dans la suite des études.

L'hypothèse la plus fondamentale que nous adoptons est celle d'une apparition du langage humain dans la continuité des systèmes de communication animaux, et un développement graduel de sa complexité, sans émergence brusque par le biais d'une macro-mutation génétique. Le langage ne bénéficie pas en outre de processus dédié ou de gène qui code de façon spécifique ses caractéristiques. Il s'inscrit dans des mécanismes cognitifs généraux, comme proposée par la linguistique cognitive.

Notre second postulat, à la suite des travaux de Dunbar, Dessalles etc., est que, parallèlement à sa capacité première de transport d'information, le langage est également un outil social, qui renforce les liens sociaux dans une communauté d'individus, mais permet aussi aux individus de se définir au sens large dans cette communauté, tout comme d'autres artefacts culturels (mode vestimentaire, religions, comportements sociaux...). Nous adoptons l'argument de Dessalles en faveur d'une valeur localement optimale du langage, qui est pertinente vis à vis des théories évolutionnistes et nous semble en accord avec la dimension sociale que nous pensons être une caractéristique majeure du langage.

Dans le prolongement de ce second postulat, nous pensons que cette caractéristique sociale du langage s'est majoritairement préservée au cours du temps depuis le développement des premières formes de communication humaine jusqu'aux époques contemporaines. Contrairement à cette stabilité, les capacités cognitives et les structures démographiques ont évolué de façon

significative, et ont conduit aux langues contemporaines. De la même façon qu'une surenchère de complexification peut exister entre tricheurs et non-tricheurs chez certains animaux, le langage a pu se développer et *co-évoluer* avec les capacités cognitives de façon auto-catalytique par le renforcement de son rôle au niveau social et également cognitif dans une seconde période. Son activité, tout en ayant une base sociale, a progressivement "envahi" l'ensemble de la cognition humaine, et a partiellement permis son développement.

Troisième postulat, le langage évolue sous l'influence de contraintes internes (physiologiques, cognitives, communicatives, sociales) et d'événements sociaux contingents. Cette évolution est *structurelle et structurellement déterminée*. Les langues constituent un système général assez proches de celui composé par les espèces biologiques, comme le pense Salikoko Mufwene. Il n'existe pas de rupture de transmission lors des phénomènes de contact linguistique, et les changements lors de ceux-ci, même s'ils sont parfois très significatifs, ne sont que les conséquences de phénomènes sociaux extrêmes et de réorganisations structurelles. Les phénomènes sociaux jouent le rôle de gâchettes pour les changements linguistiques : sans les déterminer (dans un sens qu'il reste toutefois à définir), ils participent néanmoins de l'évolution des langues.

Dernier postulat, il est possible en se basant sur la préservation du rôle social du langage, sur l'évolution des structures démographiques et des capacités cognitives d'émettre des hypothèses tangibles sur les langues de la préhistoire. Cette remontée dans le temps n'est peut-être pas permise par les techniques classiques de la linguistique historique, mais des modèles généraux pluridisciplinaires peuvent être pertinents et des approches typologiques peuvent mettre à jour des caractéristiques des langues actuelles héritées de très longue date. Les principes de la sociolinguistique peuvent être appliqués à des périodes reculées si l'on prend en compte les différences sociales et démographiques avec l'époque contemporaine (voir par exemple [Naccache, 2002] pour une proposition équivalente). Comme l'écrit encore William Labov :

"To draw further upon the parallel between language change and fashion change, it may be necessary to modify the uniformitarian principle, and consider that mechanisms of change may not be the same in other periods of history and other forms of society" [Labov, 2001] (p. 361)

A partir de ces différentes hypothèses, nous tenterons d'approcher quelques unes des questions importantes relatives à l'émergence des langues : comment les langues et la diversité linguistique sont-elles apparues ? A partir de quand peut-on parler de langues "modernes", c'est à dire de langues dont les caractéristiques typologiques sont essentiellement les mêmes que les langues actuelles ? Et pour finir comment les langues ont-elles évolué au cours de la préhistoire, et comment évoluent-elles aujourd'hui ?

Pour répondre à ces questions, nous aurons recours à plusieurs modèles informatiques, que ce soit pour étudier l'émergence de systèmes linguistiques ou leur évolution au cours du temps en fonction des différentes contraintes qui pèsent sur eux. Nos simulations seront toutefois assez éloignées de celles détaillées au chapitre 3 : en effet, notre soucis ne sera tout d'abord pas l'émergence de convention, mais l'évolution d'un système linguistique sous différentes contraintes naturelles et sociales.

Deuxième partie

Propositions pour l'origine et la diversification des langues

*Je cherche quand je veux ;
Je trouve quand je peux.*
Albert Einstein.

La première partie de notre thèse avait pour but d'introduire les problématiques liées à l'origine du langage et aux changements linguistiques. Elles insistait de plus sur l'intérêt de la modélisation informatique comme outil de recherche vis à vis de ces problématiques. Les premières conclusions ont été un ensemble de postulats qui permettent de définir le contexte général des études suivantes.

Le chapitre 4 tente d'aborder la question du mode d'émergence des langues et de la diversité linguistique sous-jacente. Notre travail repose ici principalement sur une évaluation des hypothèses de monogénèse ou de polygénèse des langues, question souvent abordée de façon biaisée par les linguistes.

Dans le chapitre 5, nous tentons dans le cadre de l'évolution ancienne des langues de déterminer par des arguments paléo-anthropologiques quand celles-ci acquièrent leur forme contemporaine. Nous nous plaçons pour cela sur le cadre des migrations humaines qui trouvèrent vraisemblablement leur source il y a près de 100,000 ans en Afrique de l'est. Nous envisageons plus particulièrement les traversées maritimes comme le signe d'un développement linguistique important.

Dans le chapitre 6 enfin, nous nous attardons sur l'évolution des langues anciennes en comparaison avec celle des langues modernes grâce à un modèle informatique. Nous tentons de mettre en valeur les dimensions du langage introduites au chapitre 2, et présentons une évaluation de leur influence sur les dynamiques d'évolution linguistique.

Chapitre 4

Emergence des langues et diversité linguistique

大器晚成

Le grand vase est long à parfaire.

Lao Zi.

Le chapitre 2 nous a permis d'aborder la question de l'évolution des langues selon une approche systémique. Nous avons en particulier soulevé la question de la diversité des langues, et celle des contraintes qui, par le biais des mécanismes de changement linguistique, viennent peser sur cette diversité.

Au cours de ce chapitre, nous souhaitons nous interroger sur la façon dont la diversité linguistique a pu évoluer au cours du temps depuis l'origine du langage jusqu'à l'époque contemporaine. Pour cela, il semble nécessaire d'examiner l'évolution des capacités et des comportements de nos ancêtres, afin de pouvoir construire un cadre pertinent pour l'apparition et le développement des langues et des structures linguistiques qui les composent.

Nous nous appuyons dans ce chapitre sur la terminologie que nous avons mise en place au chapitre 2, et sur les notions de dimensions distribuée et structurelle du "système langage". Dans une première partie, nous introduisons quelques postulats et une série de questions relatives à l'évolution de la diversité linguistique sous ses différents aspects. Nous nous attardons dans les deux sections suivantes sur deux problématiques fondamentales liées à l'émergence des langues et à la diversité précédente. Nous examinons tout d'abord la question de l'émergence des langues et de leurs composantes à travers l'opposition classique entre monogenèse et polygenèse. Nous tentons alors d'évaluer l'impact des facteurs cognitifs et sociaux sur le développement des langues et des structures linguistiques.

4.1 Problématiques de l'origine des langues et de l'évolution de la diversité linguistique

4.1.1 Remarques introductives et définitions

Émergence du langage et existence de la diversité linguistique et des langues

Il semble parfois difficile de tracer la frontière entre langues et langage à la lecture des ouvrages et articles qui portent sur leur évolution. D'un côté, les études sur l'émergence du langage ne se préoccupent que très rarement, et à juste titre, de la diversité linguistique, puisque le but visé est l'explication de l'apparition d'une faculté individuelle (en fait, une partie des études, comme celles des chercheurs en intelligence artificielle, permet l'observation de différences inter-individuelles, mais l'étude de la diversité n'est généralement pas le sujet d'étude de ces modèles qui sont centrés sur le problème de l'émergence de conventions). A l'opposé, les études sur les langues supposent le plus souvent qu'il est impossible de reconstruire les langues avant un seuil d'environ 8,000 BP, et un flou important règne sur les périodes antérieures (voir chapitre 1). Rares sont les tentatives, comme celles de Merritt Ruhlen [Ruhlen, 1994] ou Johanna Nichols [Nichols, 1992] de dépasser la frontière des 8,000 dernières années, et de tenter de lier émergence de l'espèce, migrations humaines et histoire des langues³⁰.

Rappelons ici que nous avons défini le langage comme un système dynamique complexe. D'une part, sa distinction avec d'autres systèmes dynamiques complexes repose sur un ensemble de spécificités telles que : son aspect distribué, la spécificité de ses dimensions naturelle et structurelle, son utilisation à des fins sociales et de communication. . . D'autre part, il se différencie des autres systèmes de communication par la complexité de ses structures internes et les particularismes des éléments qui fondent sa dimension naturelle. Les idiolectes des différents locuteurs sont tous des *instanciations* du système précédent, et par extension, nous pouvons considérer que les langues ou les dialectes en sont également.

Nous pensons que langues et langage sont concomitants, dans le sens où la diversité linguistique est inséparable de l'existence d'une capacité de langage chez les individus. En d'autres termes, si des formes de langages ont pu exister il y a plusieurs millions d'années, alors des langues ou des dialectes différents existaient probablement à ces époques, même si ils étaient très différents dans leur forme des langues contemporaines. L'existence de locuteurs induit nécessairement celle de différences dans leur système de communication : cette proposition est un constat de la sociolinguistique pour les périodes actuelles. La question est de savoir s'il est possible de projeter ce constat dans le passé [Naccache, 2002].

L'un de nos postulats est le caractère fondamental du langage humain en tant qu'outil social. Cette utilisation a selon nous été constante depuis l'émergence du langage jusqu'à aujourd'hui. La constance de l'organisation sociale structurée de nos populations (comme celle des sociétés de primates), en créant des interactions tantôt attractives tantôt répulsives entre les individus, implique selon nous que des différences inter-individuelles ont existé dès l'émergence des premières formes du langage humain, afin de participer à cette structuration des communautés humaines (en termes d'alliances, de proximités ou d'oppositions entre les individus. . .).

Sur cette base, nous pensons qu'il est pertinent de ne pas nécessairement dissocier les études

³⁰Notons ici la tentative de Pagel de déterminer le nombre de langues qui ont été parlées jusqu'à nos jours, selon différents scénarios d'émergence du langage [Pagel, 2000]

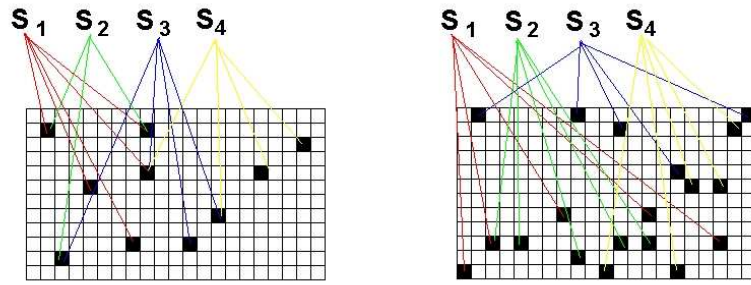


FIG. 4.1 – Diversité des états possibles et diversité des états réels

sur l'origine des langues et de la diversité linguistique de celles sur l'origine du langage. S'il n'est pas possible de connaître la structure exacte des langues dans un passé lointain, il est néanmoins légitime de s'interroger sur les structures *possibles* qui pouvaient composer les langues de la préhistoire. A cette fin, une approche pluridisciplinaire est indispensable pour franchir la limite imposée par les reconstructions linguistiques, et s'intéresser aux schémas de diversité des langues du passé.

Diversités linguistiques

Dans le paragraphe précédent, nous rapprochons l'origine des langues de celle de la diversité linguistique, mais un certain flou demeure entre ces deux notions.

Dans le chapitre 2, nous avons défini la diversité linguistique à partir des différences *structurelles* qui peuvent exister entre deux systèmes linguistiques. Comme pour les notions de lignées et d'espèces en biologie, la relation entre langues et systèmes de structures différentes n'est pas directe, puisque tout comme la définition d'espèce se base sur l'inter-fécondité, celle de langue se base sur celle d'inter-compréhension. Toutefois, malgré quelques cas problématiques comme les chaînes dialectales... de nombreuses différences structurelles séparent généralement deux langues différentes, et un abus de langage peut nous permettre de rapprocher raisonnablement la diversité des langues de la diversité linguistique telle que nous l'avons définie au chapitre 2.

La notion d'espace des possibles a également été mise en valeur il y a deux chapitres, et la diversité linguistique repose sur une certaine structuration de cet espace.

Nous allons opérer ici une distinction supplémentaire au niveau de la diversité linguistique, sur la base de celle qui existe entre les états *possibles* et les *états* réalisés d'un ensemble de systèmes linguistiques. Le nombre d'items possibles pour composer les structures de systèmes linguistiques peut être plus ou moins important, mais les systèmes linguistiques peuvent n'être composés que d'un nombre restreint d'entre eux, et être très voisins les uns des autres. Autrement dit, il n'existe pas de lien *a priori* entre le nombre d'items disponibles pour composer les langues et la diversité de celles-ci. Notons ici qu'en conséquence, la diversité des langues à une époque donnée ne renseigne que partiellement sur l'ensemble des items possibles à cette époque.

La figure 4.1 résume la situation : dans le premier cas (schéma de gauche), les systèmes linguistiques sont composés d'un ensemble d'items restreint par rapport à l'ensemble des items possibles, tandis que dans le second cas (schéma de droite), ils font un plus grand usage de l'ensemble des éléments disponibles.

Nous nous proposons donc de distinguer deux diversités de natures différentes : la première, baptisée **diversité des états possibles**, se rapporte à la diversité des items et structures linguistiques qui peuvent être mis à profit pour la construction des systèmes linguistiques. La seconde, dénommée **diversité des systèmes** ou **diversité des états réels**, concerne quant à elle la diversité des systèmes réels qui existent à un instant donné. Nous parlerons par la suite de diversités linguistiques, et considérerons les liens qu'elles entretiennent.

Rappelons ici qu'il existe une différence entre les items et les structures linguistiques. En effet, des items composent une structure par le biais de liens qu'ils établissent entre eux pour former un tout cohérent. Ainsi, selon la nature des items linguistiques, un jeu plus ou moins important et diversifié de structures linguistiques sera possible, mais nous reviendrons sur ce point important par la suite.

Dans le cas des systèmes linguistiques, la décomposition de l'espace des possibles selon les axes syntagmatique et paradigmatic des différentes structures enchâssées induit une distribution des items linguistiques selon les axes paradigmatic des différentes composantes des structures.

4.1.2 Complexité des langues et des structures linguistiques

Les structures linguistiques se composent d'un ensemble d'items linguistiques. Une approche de ces éléments repose sur l'estimation de leur complexité.

Un débat de la linguistique repose sur la question de la complexification ou de la simplification des langues au cours du temps. Cette problématique plonge ses racines profondément dans le passé, puisque Rousseau émettait déjà l'idée que le langage s'était complexifié au cours du temps depuis des formes originelles chantées (voir chapitre 1).

Comme nous l'avons déjà souligné au chapitre 2, il est difficile de définir clairement la complexité d'un système ou d'une structure linguistique. Une approche possible est celle de la théorie de la *complexité algorithmique*. Selon cette approche, la complexité d'une structure est définie comme la longueur d'un algorithme (d'un programme) permettant d'engendrer et/ou d'interpréter cette structure³¹ (se reporter à [Gell-Mann, 1992] pour plus de détails).

Cette notion est assez intuitive : plus il est difficile de décrire ou de comprendre un problème, plus celui-ci peut-être jugé "difficile" ou "compliqué". Intuitivement encore, des phrases mettant en œuvre des propositions relatives ou coordonnées sont des structures plus complexes que des phrases ne comportant aucune subordination ou coordination de prédicats. Ceci peut-être évalué à la fois par la mesure de temps de réaction des sujets, ou par les efforts des syntacticiens pour produire des modèles cognitifs explicatifs.

Le problème de la complexité algorithmique est qu'elle est théorique, et que donc toute estimation est limitée ou repose sur des approximations. Pour les deux mesures précédentes par exemple, il est possible d'argumenter que le temps de réaction des sujets est biaisé par les structures psychologiques et cognitives mises en œuvre, ou que les modèles des syntacticiens ne sont que des approches partielles et très éloignées de la description la plus performante. Néanmoins, pour les besoins de notre argumentation, il n'est pas nécessaire de résoudre ces problèmes, et nous envisagerons donc la complexité selon une approche intuitive et générale.

Comme pour la notion de la diversité, il est possible de distinguer la complexité des items et des structures linguistiques disponibles pour former un système linguistique de celle des structures et des systèmes qui existent effectivement dans un contexte donné. Nous parlerons donc

³¹Pour une application de la complexité algorithmique (selon le principe de *Minimum Description Length* de Rissanen) à la comparaison de systèmes phonologiques, on pourra se reporter à [Patrick et al., 1997]

de complexités, en détaillant une **complexité des états possibles** et une **complexité des systèmes** ou **complexité des états réels**.

4.1.3 Problématiques et questions relatives à l'origine des langues et des diversités linguistiques

Nous souhaitons juste ici soulever plusieurs questions relatives à l'émergence des langues ainsi qu'à l'évolution *des* diversités et complexités linguistiques au cours de la préhistoire.

Complexités et diversités

Une première problématique est celle de l'évolution des complexités et des diversités linguistiques au cours du temps et de l'évolution humaine. A partir des définitions des paragraphes précédents, différentes questions se posent naturellement, entre autres :

- comment a évolué la diversité des langues au cours du temps ?
- comment caractériser le lien entre la diversité des états possibles et diversité réelle ?
- comment s'est opéré l'accroissement de complexité des états possibles au cours du temps, et comment cela s'est-il reflété dans la complexité des systèmes réels ? Quelles ont été les forces ayant conduit à cette accroissement ?

Répondre à ces questions nécessite de se pencher sur l'évolution humaine de façon générale, et en particulier sur celle des structures sociales et des capacités cognitives et physiologiques. Etablir des liens entre ces différents domaines fera partie de nos objectifs aux sections 2 et 5 de ce chapitre.

Emergence des langues et de la diversité

S'intéresser à l'origine des langues et à celle de la diversité linguistique nécessite de s'intéresser à la fois au développement de ces éléments au cours de la préhistoire, mais également à leur mode d'émergence. Il s'agit donc de s'intéresser ici à l'*émergence* du langage et des langues, comme l'ont fait de nombreux scientifiques, mais selon un angle systémique et structurel, dans le prolongement de l'approche introduite au second chapitre. La mise en perspective des dimensions structurelle, distribuée et naturelle du "système langage" dans une perspective d'émergence conduit naturellement aux questions suivantes :

- Comment et quand les éléments qui composent la dimension structurelle du langage sont-ils apparus dans les communautés formées par nos ancêtres ? Ces éléments ont-ils tous émergé simultanément ou chacun est-il apparu de façon indépendante ? Y a-t-il eu un unique foyer d'émergence ou plusieurs foyers indépendants ?
- Quelles ont été les transformations de la dimension naturelle qui ont conduit à l'émergence des composants de la dimension structurelle ? Quelle a été la *dynamique temporelle* d'émergence des items linguistiques à partir des transformations de la dimension naturelle ?

On retrouve ici nombre des questions qui sont au centre de la problématique générale de l'origine du langage. Nous espérons que l'approche que nous allons maintenant développer permettra d'aborder le sujet sous un angle différent et enrichissant.

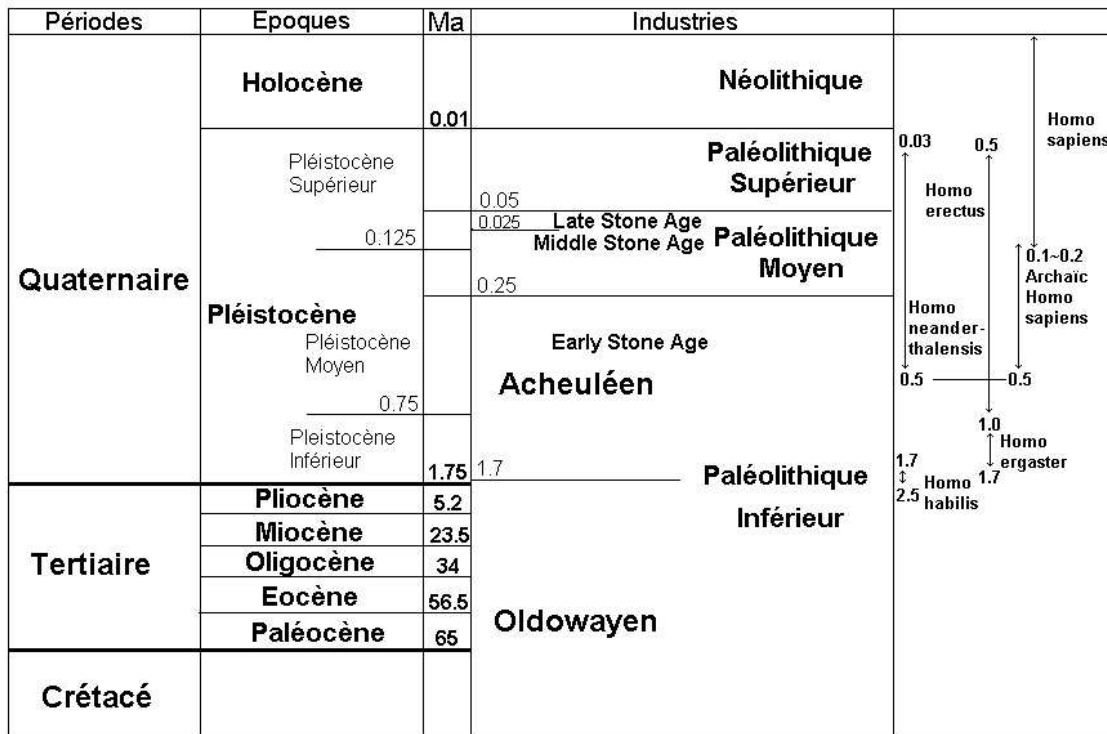


FIG. 4.2 – Epoques et industries de la préhistoire

4.2 Démographie et organisation sociale des populations préhistoriques

Afin d’aborder les questions précédentes, une certaine connaissance des structures sociales et des capacités cognitives et physiologiques de nos ancêtres est nécessaire. Avant de développer les modèles et simulations informatiques que nous avons réalisés, nous allons introduire quelques éléments de paléo-démographie qui permettront de mieux estimer par la suite l’impact de la structure de la macro-population humaine sur l’émergence du langage et des langues.

Nous examinons successivement ici les questions de taille, de structure et de densité des populations humaines préhistoriques, avant de détailler plus précisément un point important de cette organisation populationnelle : la fréquence des contacts entre groupes humains, et la qualité de ceux-ci. Notre but n’est pas ici de parler d’évolution linguistique, mais uniquement de décrire le contexte dans lequel celle-ci a pu prendre place.

4.2.1 Introduction : époques et industries de la préhistoire

Dans la suite, de notre exposé, nous allons argumenter sur des phénomènes qui ont pu se produire tout au long de la préhistoire. Pour les délimiter dans le temps, nous aurons naturellement recours aux segmentations classiques en époques ou industries lithiques utilisées par les archéologues ou paléo-anthropologues. La figure 4.2 résume ces différentes périodes à partir de différentes sources bibliographiques (voir en particulier [Klein, 1999] p. 22, p. 575 et p. 576).

4.2.2 Notions de paléo-démographie

Les conditions démographiques ont un impact important sur la diversité des langues. Si ceci peut-être masqué par des études centrées sur des communautés d'individus de pays développés et de fortes densités de population, l'examen de populations de faible densité (dans des régions difficiles comme la Sibérie par exemple) montre que la diversification des langues est influencée par ce facteur [Jacquesson, 2001].

Cet exemple est choisi à dessein : comme les données qui vont suivre vont avoir tendance à l'indiquer, il est très vraisemblable que les populations préhistoriques étaient beaucoup plus restreintes que les populations actuelles. Les prochains paragraphes décrivent quelques arguments qui mènent à ces conclusions.

Taille et structure des populations humaines au cours de la préhistoire

La taille et la structure des populations humaines ont évolué au cours du temps. Deux sources de données permettent d'estimer ce phénomène, bien que la tâche soit difficile : les données archéologiques et les données de génétique des populations. En outre, les études ethnographiques des populations de chasseurs-collecteurs peuvent servir de référence utile, tout en ne perdant pas de vue que la projection dans le passé n'est pas toujours directe et pertinente.

Données archéologiques et ethnographiques. Les données archéologiques permettent tout d'abord de détecter des événements de spéciation. Un exemple clair, visible tant au niveau morphologique qu'au niveau comportemental (perfectionnement des outils), est celui conduisant à l'émergence d'*Homo erectus* [Hawks et al., 2000] (p. 3-7). En outre, elles permettent d'estimer la répartition des populations sur le globe et la taille des groupes humains qui habitaient les sites découverts. Connaître ainsi la structure de la macro-population est très important pour déterminer ses homogénéités et ses hétérogénéités, et leurs conséquences aux niveaux génétique ou culturel.

Les données archéologiques (grâce à l'arrangement et à la surface des sites) pointent vers une structuration en petits groupes de quelques dizaines d'individus au cours du Paléolithique, avec une moyenne d'environ 25 personnes [Hassan, 1981] (p. 93-94). La comparaison des données archéologiques avec les données ethnographiques confirme une taille de groupe entre 15 et 50 individus, et la moyenne de 25 apparaît comme indépendante du temps, du type d'habitat et de la densité [Hassan, 1981] (p. 53).

Les groupes humains se déplaçaient très vraisemblablement pour exploiter différentes régions, et au gré des fluctuations environnementales. Pour ces dernières, la variation du climat liée aux périodes successives de glaciation a probablement joué un rôle fondamental, à la base par exemple de la première sortie hors d'Afrique des Erectus (ou d'*Homo ergaster* selon les théories sur la phylogénie humaine) il y a près de 1.8 million d'années, ou des contractions et expansions des populations Européennes au cours du Paléolithique Supérieur [Bocquet-Appel and Demars, 2000].

Données génétiques Parallèlement aux données archéologiques, les données sur la variabilité génétique des populations actuelles permettent d'apprécier l'histoire de la *population effective humaine* à différentes époques. Cette population, qui est celle qui participe à la pérennité de l'espèce (et donc la seule observable grâce au patrimoine génétique actuel), est toutefois différente de la taille de la population totale, ce qui peut-être source de complications (voir plus bas).

La propriété fondamentale sur laquelle repose l'ensemble de ces études est la suivante : les événements démographiques du passé se reflètent dans la distribution des génomes des populations actuelles.

Les goulots d'étranglement génétique (*bottlenecks*) ou les accroissements brusques ou graduels de population, dus à des événements écologiques, de spéciation etc., sont une première classe de phénomènes qui laissent des empreintes génétiques. Un *bottleneck* est une période où la population à l'origine de la variabilité génétique ultérieure (autrement dit la population effective) est réduite à un faible nombre d'individus. Les conséquences génétiques d'un bottleneck dépendent à la fois du nombre d'individus et de la durée de cette réduction de la taille de la population effective.

Les migrations humaines forment une deuxième classe d'observables, et sont de plus en plus étudiées pour les périodes récentes du Néolithique, du Paléolithique Supérieur et de la seconde partie du Paléolithique Moyen.

Il faut cependant noter la multitude de facteurs qui viennent composer la diversité génétique actuelle, et la grande difficulté de reconstruire précisément les événements démographiques du passé à partir de celle-ci. Un bottleneck aura ainsi tendance par exemple à masquer et effacer la diversité antérieure d'une population, puisque les descendants post-bottleneck seront tous pourvus de gènes issus d'un pool commun réduit formant un sous-ensemble du pool originel.

Il est relativement bien accepté qu'un premier goulot d'étranglement correspond à la spéciation de l'espèce *Homo erectus* (ou *Homo ergaster*) il y a environ 1.8 millions d'années, principalement grâce aux données archéologiques.

Deux propositions s'opposent ensuite pour l'évolution ultérieure de la population humaine, et se rattachent en fait aux deux grandes hypothèses sur l'origine de l'homme moderne (voir chapitre 1) : l'hypothèse *Out of Africa* et celle de la continuité régionale. La première hypothèse se divise en fait en deux, l'hypothèse du jardin d'Eden forte (*strong Garden of Eden hypothesis*), et l'hypothèse faible (*weak Garden of Eden hypothesis*) : la première postule une expansion continue des populations *Homo sapiens* apparues en Afrique, tandis que la seconde préconise une expansion d'abord lente (avec peu d'individus), puis des événements de croissance plus importants de plusieurs populations filles en différentes régions du globe. En tant que non-spécialiste, il est difficile de choisir une des hypothèses sur la base de critères solides, même si les chercheurs concernés semblent de plus en plus favoriser l'hypothèse *Out of Africa*. Si nous suivons cette tendance au cours du chapitre 5, nous étudierons les différents scénarios dans ce chapitre sans faire de choix.

Dans le cas de l'hypothèse *Out of Africa*, un bottleneck correspondrait à l'événement de spéciation menant à notre espèce. Les données sur l'ADN mitochondrial des populations actuelles conduisent par exemple à une plage temporelle importante pour le temps de coalescence, avec une moyenne d'environ 200,000 ans, et une population effective lors du bottleneck d'environ 8,800 individus [Hawks et al., 2000] (p. 9)³². Différentes études sur différents marqueurs génétiques conduisent à des conclusions et des dates légèrement différentes :

- à partir de l'étude des distributions des différences 2 à 2 (*mismatch distributions* ou *distributions of pairwise differences*) des séquences d'ADN mitochondrial, [Harpending et al., 1993] favorisent l'hypothèse faible du jardin d'Eden et des expansions majeures entre 80,000 et 30,000 BP, les plus anciennes ayant lieu en Afrique. Un nombre initial de femmes entre

³²Notons ici que le temps de coalescence ne correspond en fait pas directement à une date d'existence de notre ancêtre commun le plus récent, mais à la taille de la population initiale [Harpending et al., 1993] (p. 484).

1,000 et 10,000 est mentionné pour la fin du Pléistocène Moyen (p. 484) ;

- [Takahata et al., 1995], par des techniques de maximum de vraisemblance (*maximum likelihood*) pour des comparaisons de séquences de nucléotides, déterminent une population effective de 10,000 individus au cours du dernier million d'années (p. 201). Les systèmes génétiques étudiés ne permettent pas d'observer une expansion récente (après 100,000 BP) de la population humaine. En outre, de façon consistante avec d'autres études sur le complexe majeur d'histocompatibilité, les auteurs concluent à une population ancestrale beaucoup plus importante au cours du Pliocène (de 5 à 1.8 millions d'années BP) et du Miocène (de 23 à 5 millions d'années BP). Des variations importantes de population ont donc eu lieu (p. 217-218) ;
- [Sherry et al., 1997] étudient les insertions Alu et arrivent à une population effective d'environ 18,000 individus au cours des un à deux derniers millions d'années. Cette faible estimation ne correspond pas simplement pour les auteurs à un bottleneck lors du Pléistocène Supérieur, mais reflètent notre descendance d'une population archaïque qui est restée faible pendant la plus grande partie du Pléistocène Moyen et du Pléistocène Supérieur (p. 1980) ; En outre, la différence entre la valeur de 18,000 individus au cours de la période [2,000,000 BP ; 500,000 BP] et les valeurs plus faibles obtenues avec l'ADN mitochondrial suggère une contraction *modérée* il y a environ 200,000 ans, et un isolement génétique de nos ancêtres (taille effective de 10,000 à 20,000, et isolement vis à vis de la macro-population terrestre) au cours du Pléistocène [Sherry et al., 1997] (p. 1981). Cette hypothèse d'un bottleneck *long-neck* va à l'encontre de l'hypothèse *hourglass* qui suppose une connection de la population archaïque au réseau d'échanges génétiques de l'ensemble de l'espace occupé par les Erectus [Harpending et al., 1998] (p. 1961-1962) ;
- des études sur les polymorphismes de loci situés sur des micro-satellites suggèrent comme précédemment que les populations humaines modernes ne connurent des expansions importantes (en Afrique, en Europe et en Asie orientale) que longtemps après leur sortie hors d'Afrique [Zhitovovskiy et al., 2000]. L'absence de croissance de certaines populations comme en Amérique du sud ou en Océanie peut s'expliquer par des bottlenecks récents au cours de l'Holocène [Excoffier and Schneider, 1999].

Le modèle d'évolution multi-régionale repose sur l'hypothèse d'une absence de bottleneck lors de l'apparition de l'homme moderne, ce qui est en accord avec une évolution *in situ* des populations Erectus vers les formes plus modernes. [Hawks et al., 2000] tentent d'aller à l'encontre des résultats précédents. Tout en accréditant le fait qu'aucun bottleneck important n'a pris place au Pléistocène Supérieur (125,000 - 10,000 BP) (p. 11), les auteurs tentent de démontrer que le modèle *long-neck* de [Harpending et al., 1998] n'est pas valide. Ils rejettent une partie des études précédentes, entre autres sur la base d'une possible sélection pour les systèmes haploïdes et les gènes autosomaux (p. 15).

Un des points importants est la difficulté de distinguer la population réelle (ou *census population*) de la population effective. La première est constituée par l'ensemble des individus à une époque donnée, tandis que la seconde n'est constituée que par les individus qui participent à la génération suivante. En citant une étude établissant un ratio de 2 pour 1 entre les deux populations précédentes (p. 1962), [Harpending et al., 1998] pensent qu'il est impossible que la population ayant conduit aux populations actuelles, de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'individus, ait pu occuper l'ensemble des zones où la présence d'Erectus est attestée (p. 1961). A l'opposé, [Hawks et al., 2000] argumentent sur le fait que la population de census a pu être bien plus importante que la population effective, ce qui rend possible le modèle d'évolution multi-

régionale. Des extinctions locales et des recolonisations fréquentes, en particulier hors d'Afrique dans les régions périphériques d'occupation, peuvent être à l'origine de ce ratio plus important. [Takahata et al., 1995] reprend cette possibilité, due aux variations des conditions écologiques et à la grande dispersion de la macro-population, pour expliquer la faible population effective au cours du Paléolithique (p. 218).

Notons avant de conclure qu'une quatrième source de données peut-être utilisée pour détecter des variations de taille de population, mais ceci de façon relative : il s'agit de la variation des habitudes de consommation des populations au cours du temps. Une étude sur deux sites en Italie et en Israël rapporte par exemple que certaines périodes montrent un accroissement de la consommation de petits gibiers agiles (lapins, perdrix...) comparativement à un gibier également de petite taille mais plus lent (tortues, coquillages...). Ces variations sont indépendantes du climat, et traduisent une diminution du second type de gibier, liée à une exploitation humaine plus intense due à une augmentation de la population. Cette dernière aurait ainsi connu plusieurs fluctuations importantes au début du Paléolithique Supérieur (50,000 - 10,000 BP) et à l'Epi-Paléolithique (période finale du Paléolithique Supérieur et période de transition vers le Mésolithique entre 12,000 et 10,000 BP environ). En comparaison, les pulsations populationnelles (c'est à dire les suites d'accroissements et de diminutions de la population) sur les deux sites étaient moins importantes au Paléolithique Moyen (250,000 - 50,000 BP), et la distribution du gibier consommé indique que les populations étaient extrêmement faibles (p. 193) [Stiner et al., 1999].

Il semble difficile de trancher à l'heure actuelle sur le modèle génétique ayant conduit à l'émergence de la population contemporaine lors du Pléistocène supérieur. Néanmoins, il semble vraisemblable que la taille de la macro-population humaine fut très faible avant l'explosion démographique du Néolithique (après 10,000 BP) liée à l'apparition de l'agriculture. Diverses estimations pour la population *Erectus* de l'Afrique, de l'Asie et de l'Europe sont voisines de 500,000 individus il y a entre 500,000 et un million d'années, tandis que des estimations pour le Paléolithique Moyen (250,000 - 50,000 BP) varient de 500,000 à plus d'un million d'individus [Hawks et al., 2000] (p. 12). Des fluctuations régionales importantes se sont en outre probablement produites plusieurs fois au cours des dernières centaines de milliers d'années.

Si l'on superpose à ces conclusions la structuration en groupes de cette population, nous arrivons à un nombre de groupes humains extrêmement faible pour des surfaces très importantes. C'est ce problème de la densité que nous allons examiner maintenant.

Densité des populations préhistoriques

La taille et la structure des populations forment un point d'ancrage pour l'estimation de l'impact des facteurs sociaux sur les homogénéités ou hétérogénéités de ces populations. Néanmoins, elles ne prennent de sens que dans un contexte géographique qui permet d'apprécier les densités de population. Afin de fixer les échelles de valeurs, les tables 4.1 et 4.2 donnent respectivement les surfaces actuelles de différentes zones terrestres émergées et des exemples de densité globale de groupes humains en fonction de la surface habitée et du nombre de groupes. Les deux premières lignes de la table 4.2 donnent une correspondance entre le nombre de groupes et la taille de la population globale si l'on considère une moyenne de 25 individus par groupe.

Comme déjà dit plus haut, de trop faibles densités de population ne sont pas pertinentes d'un point de vue génétique. En outre, il n'est pas cohérent d'assumer une densité égale sur

	Aire en km^2 (époque actuelle)
Terre entière	510,072,200
Terre émergées	148,939,800
Terre immergées	361,132,400
Asie	44,547,800
Afrique	30,043,900
Amérique du Nord	24,255,200
Amérique du Sud	17,819,100
Europe	10,404,000
Australie	7,687,100

TAB. 4.1 – Surfaces des continents terrestres

Taille de la macro-population	10,000	25,000	125,000	250,000	1,250,000	2,500,000	5,000,000	12,500,000
Surface (km^2) / Nombre de groupes	400	1,000	5,000	10,000	50,000	100,000	200,000	500,000
1,000,000	4E-4	1E-3	5E-3	0.01	0.05	0.1	0.2	0.5
5,000,000	8E-5	2E-4	1E-3	2E-3	0.01	0.02	0.04	0.1
10,000,000	4E-5	1E-4	5E-4	1E-3	5E-3	0.01	0.02	0.05
25,000,000	1.6E-5	4E-5	2E-4	4E-4	2E-3	4E-3	8E-3	0.02
50,000,000	8E-6	2E-5	1E-4	2E-4	1E-3	2E-3	4E-3	0.01
100,000,000	4E-6	1E-5	5E-5	1E-4	5E-4	1E-3	2E-3	5E-3

TAB. 4.2 – Calcul des densités moyennes de groupes humains pour différents couples surface / nombre de groupes

l'ensemble des territoires habités. Au contraire, les groupes étaient vraisemblablement situés le long des cours d'eau, dans des régions riches en nourriture, près des côtes... Des régions de densités plus importantes étaient donc séparées par des régions de densités plus faibles. Ceci devait logiquement augmenter la fréquence des contacts dans les régions de plus forte densité, et réduire les contacts entre ces régions.

Les données ethnographiques sur les populations récentes ou contemporaines de chasseurs-collecteurs sont une riche source de renseignements pour juger les données précédentes. La projection dans le passé est à réaliser avec prudence (puisque les populations contemporaines peuvent présenter des caractéristiques différentes de celles des groupes préhistoriques), mais elle est néanmoins utile pour pallier la relative pauvreté des connaissances. Les données suivantes prennent pour exemple le cas de l'Europe.

En ce qui concerne la densité des populations, la table 4.3 présente les tailles de plusieurs populations de chasseurs-collecteurs au cours des derniers siècles, ainsi que la surface du territoire sur lequel elles étaient distribuées [Biraben et al., 1997]. A partir de ces données et de la surface de l'Europe à différentes époques, les auteurs tentent d'estimer la population européenne au cours d'une partie de la préhistoire. La cinquième colonne, rajoutée par nos soins aux données originales, donne la densité en nombre de groupes humains (de 25 individus en moyenne) par km^2 , calculée simplement en divisant par 25 la densité des populations qui servent de sources de comparaison. Notons ici que le nom Würm correspond à la période de la dernière glaciation (grossièrement entre 75,000 et 5,000 BP) et celui de Riss-Würm à l'avant-dernier stade interglaciaire (c'est à dire avant celui où nous nous trouvons), entre 125,000 et 75,000 BP³³.

³³Les noms de Würm, Riss, Mindel et Günz correspondent à des périodes de glaciation qui ont pris place au

Source de comparaison	Population	Surface	Estimation de la population pour l'Europe selon la densité de la source de comparaison	Densité en groupes de 25 individus par km^2
Tasmanie (XVII, XVIII)	2,000	68,350	250,000 (Riss-Würm)	1.2E-3
Béothucs de Terre Neuve (XVII)	600	110,000	44,000 (Würm)	2.2E-4
Australie (1788)	300,000	7,620,000	300,000	1.6E-3
Alaska (1741)	80,000	1,520,000	56,000	2.1E-3
Sibérie orientale (XVII)	44,820	1,671,400	268,000	1.1E-3

TAB. 4.3 – Taille et densité de plusieurs populations de chasseurs-collecteurs des derniers siècles

Epoque	Population estimée	Densité en groupes par km^2
Würm I et II (70,000 - 35,000 BP)	50,000 - 70,000	2.5E-4 - 3.5E-4
30 000 - 16 000	140 000 - 170 000	7E-4 - 8.5E-4
16 000 - 10,000	200,000	1E-3
Magdalénien (-10 000 - -8700)	250,000	1.25E-3

TAB. 4.4 – Estimations de la taille et de la densité de la population en Europe au Paléolithique Moyen et au Paléolithique Supérieur

A partir des données ethnographiques, les auteurs cherchent à estimer la population des Néandertals à l'époque Moustérienne en mettant en correspondance l'environnement des populations récentes de chasseurs-collecteurs et les différents paléo-climats du Paléolithique. L'Australie et la Tasmanie présentent un climat proche de celui des périodes tempérées des épisodes interglaciaires en Europe (en particulier épisode Riss-Würm), tandis que l'Alaska et Terre-Neuve correspondent plutôt aux épisodes glaciaires. En tentant de modérer les données précédentes par les techniques de chasse ou de pêche des populations concernées, et sur la base d'autres données archéologiques, l'estimation par les auteurs de la population européenne totale au cours de la longue période de l'Acheuléen Ancien et Moyen (entre environ 1,700,000 et 350,000 BP) en Europe est entre 15,000 et 25,000 habitants, alors qu'elle évaluée à entre 25,000 et 35,000, voire à 40,000 au cours de l'Acheuléen récent (entre 350,000 et 250,000 BP environ).

Pour les périodes plus récentes du paléolithique Supérieur (50,000 - 10,000 BP), les comparaisons avec des pêcheurs-chasseurs-collecteurs contemporains vivant sous un climat très froid et des données archéologiques amènent les auteurs à des estimations plus importantes. La table 4.4 donne ces estimations, ainsi que les densités en groupes correspondantes. La surface habitable de l'Europe est estimée à environ 8,000,000 km^2 , en tenant compte à la fois du niveau des mers et de l'avancée des glaciers. Notons que pour les périodes les plus récentes avant la transition Néolithique (Epi-Paléolithique), la taille moyenne des groupes était probablement plus importante que pour les périodes antérieures. Encore une fois, les densités des différentes régions étaient vraisemblablement très hétérogènes.

cours des dernières centaines de milliers d'années (de la plus récente à la plus ancienne). Ces périodes sont ensuite découpées en subdivisions : Würm I, Würm II... Le nom d'une période inter-glaciaire est formé en accolant les noms des deux périodes glaciaires que celle-ci sépare. Cette classification ancienne du paléo-climat a été relativisée depuis par les mesures effectuées sur les roches des planchers océaniques [Klein, 1999] (p. 56-57).

Fréquence des contacts entre groupes humains

Connaissant la densité des groupes de population humaine, il est possible d'estimer partiellement la fréquence de leurs contacts. C'est cette dernière qui est d'importance dans la diffusion d'éléments génétiques, culturels et éventuellement linguistiques. En supposant par exemple une densité de 0.001 ou 0.0001 groupes par kilomètre carré, il n'est pas évident d'estimer intuitivement si les contacts entre groupes se produisaient en moyenne tous les mois, tous les 6 mois ou tous les 10 ans.

Un paramètre important rentre ici en jeu selon nous : celui de la taille du territoire des groupes humains. En effet, plus celui-ci était important, plus les individus du groupe avaient la possibilité de détecter la présence d'autres groupes. La table 4.5 donne plusieurs estimations à partir de mesures sur différents sites archéologiques (d'après [Biraben et al., 1997]).

Lieu	Date	Taille du territoire
Caune de l'Arago, clan Tayacien	250,000 ans	500 km^2
Fontmaure en Vellèches (confluent Vienne - Creuse), campement moustérien de plateaux	75,000 ans	100 km^2
Sept ensembles de gisement le long de la Vienne et du Clain	75,000 ans	espaces de 15 à 30 kms entre les gisements

TAB. 4.5 – Estimation de la taille des territoires des groupes humains pour différents sites archéologiques, d'après [Biraben et al., 1997]

Hassan conclut également à une taille des “*home ranges*” ou “*catchment territories*” d'environ 300 km^2 , ce qui peut correspondre à une taille maximale pour partir chasser le jour et rentrer au campement pour la nuit [Hassan, 1981] (p. 53-54).

Une première façon de calculer la fréquence des contacts est d'envisager une analogie avec un phénomène physique bien connu : les chocs entre molécules de gaz dits parfaits. Le calcul de la pression d'un gaz parfait repose sur son énergie interne, qui elle même repose sur la fréquence des chocs entre molécules. Pour calculer celle dernière, chaque molécule est modélisée par une sphère de rayon ε qui se déplace de façon unidirectionnelle entre deux chocs consécutifs à la vitesse v (voir figure 4.3).

Pendant une période Δt , le volume balayé par la sphère est égal à $V = 2 \times \varepsilon \times \Delta t \times v$. Le nombre de molécules qui se trouveront partiellement dans ce volume sera égale à $d \times V$. Si l'on choisit Δt égale à la durée moyenne entre deux contacts, le nombre de molécules qui se trouveront dans le volume sera égal à 1. On peut alors écrire les égalités suivantes :

$$2 \times d \times \varepsilon \times T \times v = 1 \longrightarrow f = 2 \times d \times \varepsilon \times v$$

f est la fréquence de contact entre groupes, et T la période de temps moyenne entre deux contacts.

Nous pouvons transposer cette situation au cas de groupes humains en déplacement et pouvant détecter la présence d'autres groupes dans un certain périmètre autour d'eux. Le passage

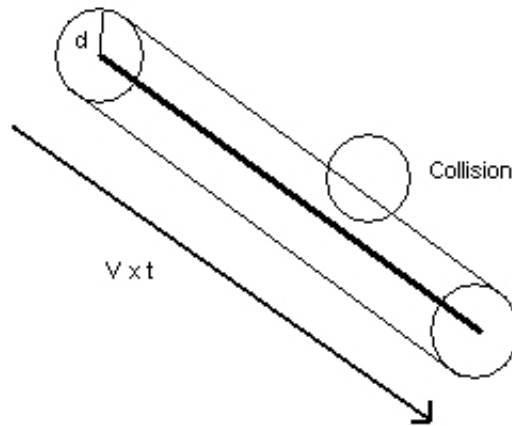


FIG. 4.3 – Schéma des chocs des molécules de gaz parfait

d'un espace tridimensionnel à un espace bidimensionnel se fait sans difficulté en remplaçant le volume manipulé précédemment par une aire. Si l'on considère un territoire en forme de disque, ε devient le rayon de ce périmètre. Pour un territoire d'environ 300 km^2 par exemple, ε vaut 10 kilomètres. La table 4.6 donne le temps moyen en années entre deux contacts pour différentes vitesses de déplacement et densités avec $\varepsilon = 10 \text{ km}$. Les estimations d'un kilomètre par an de Cavalli-Sforza pour les vitesses de déplacement des agriculteurs en Europe doivent probablement être revues légèrement à la hausse pour les chasseurs-collecteurs, d'où le choix des valeurs de la table 4.6 [Cavalli-Sforza et al., 1994].

densité (groupes.km^{-2}) / v (km.an^{-1})	1	2	5	10
0.0001	500	250	100	50
0.001	50	25	10	5
0.01	5	2.5	1	0.5
0.1	0.5	0.25	0.1	0.05

TAB. 4.6 – Fréquence de contact d'après le modèle des gaz parfaits pour $\varepsilon = 10 \text{ km}$

Il est intéressant de juger ces valeurs par rapport aux densités de groupes humains mentionnées plus haut. Pour une population de 1,250,000 individus et un territoire de $25,000,000 \text{ km}^2$, ce qui correspondrait à la situation dans la seconde partie du Paléolithique Inférieur et au Paléolithique Moyen pour la macro-population Erectus, une densité de $4\text{E-}3$ groupes par km^2 correspond à une fréquence moyenne de contact de l'ordre de 1 pour 100 ans. Si l'on assume des hétérogénéités de densité, il semble raisonnable d'envisager des contacts avec une fréquence de 1 pour quelques années dans les zones de plus forte densité. Pour une population de 25,000 individus située sur une région de $5,000,000 \text{ km}^2$ (l'Afrique de l'est par exemple pour l'émergence des *Homo sapiens*), la densité de $2\text{E-}3$ groupes par km^2 conduit à des fréquences de contact équivalentes.

Dans le modèle précédent, les déplacements sont unidirectionnels entre deux contacts. Néanmoins, il semble raisonnable d'estimer que la situation réelle fut différente, et que les groupes humains se déplaçaient de façon plus aléatoire, avec l'existence de contraintes écologiques plus ou moins fortes. S'il est extrêmement difficile de prendre en compte les obstacles naturels, l'utilisation des ressources, la compétition entre groupes, les motivations des individus etc., il est cependant possible d'envisager différentes situations plus abstraites ; l'idée est que des mouvements plus aléatoires vont réduire la fréquence des contacts, puisque l'aire balayée par chaque groupe au cours du temps est moins importante que dans le cas de mouvements unidirectionnels.

Un premier cas est d'envisager des mouvements totalement aléatoires pour les groupes humains. On parle alors en physique de mouvements browniens ou *random walks* (figure 4.4). Ces derniers ont des caractéristiques intéressantes selon la dimension du problème (en dimension 1 ou 2, un chemin aléatoire atteint tout point de l'espace avec une probabilité non nulle au bout d'un certain temps, mais ceci n'est plus le cas en dimension supérieure). Par le biais de son périmètre de contact, chaque groupe balaye au cours du temps une certaine surface baptisée *saucisse de Wiener*. Calculer la fréquence de contacts entre des groupes humains se déplaçant aléatoirement revient à calculer la fréquence des intersections entre saucisses de Wiener. Ce problème se révèle en fait très complexe, et la situation est tout aussi délicate si l'on envisage des mouvements *pseudo-browniens*. Dans ce dernier cas, comme le décrit la figure 4.5, les agents changent de direction à chaque pas de temps, mais de façon plus ou moins limitée, déterminée par un angle α . Notons ici qu'une valeur nulle de l'angle correspond au cas des molécules du gaz parfait, et une valeur de π au cas des mouvements browniens.

A l'aide d'un modèle multi-agents très simple, nous avons étudié la fréquence des contacts en fonction des différents paramètres r , α et v , à savoir respectivement le rayon du territoire du groupe, l'angle de changement de direction maximal et la vitesse de déplacement. Chaque agent représente un groupe humain, et la fréquence moyenne des contacts au cours d'une période de temps T est mesurée pour différents jeux de paramètres. Comme le résument les figures 4.6 et 4.7, la fréquence des contacts diminue lorsque l'angle de changement de direction α augmente, bien que la relation entre la fréquence et les différents paramètres ne soit pas linéaire.

Il semble vraisemblable d'envisager des mouvements de type pseudo-browniens peu directionnels pour les mouvements des groupes de chasseurs-collecteurs (par exemple, mouvements pseudo-cycliques pour suivre les saisons). Dès lors, les conclusions que nous pouvons tirer de l'expérience précédente sont que les fréquences de contact données par le modèle des gaz parfaits peuvent être revues à la baisse de façon assez conséquente. Ceci renforce notre hypothèse de fréquences de contacts de l'ordre de 1 pour quelques dizaines d'années. Si quelques groupes avaient des relations plus fréquentes entre eux dans des zones de plus fortes densités, leurs relations avec les groupes hors de cette zone étaient à l'inverse extrêmement réduites.

Schémas d'interaction entre les différents groupes humains

La dernière étape que nous souhaitons aborder est un prolongement logique de la question de la fréquence des contacts entre individus : si des contacts avaient bien lieu plus ou moins fréquemment, quelle était leur nature ? Résultaient-ils toujours en une confrontation violente, ou parfois en des échanges plus amicaux ? Ces questions sont d'importance pour mieux évaluer les possibilités d'échanges (culturels ou génétiques) entre les différents groupes humains, et la possibilité de diffusion d'innovations dans la macro-population.

Notre hypothèse est que de nombreux contacts conduisaient à des échanges génétiques ou culturels, comme nous allons le détailler rapidement.

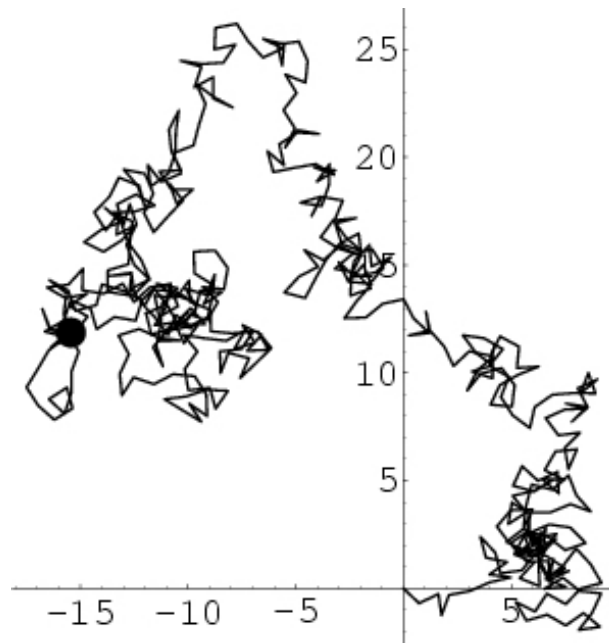


FIG. 4.4 – Un exemple de mouvement brownien en dimension 2

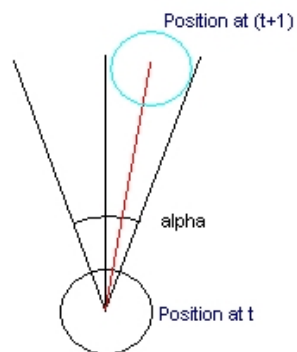


FIG. 4.5 – Mouvement pseudo-brownien

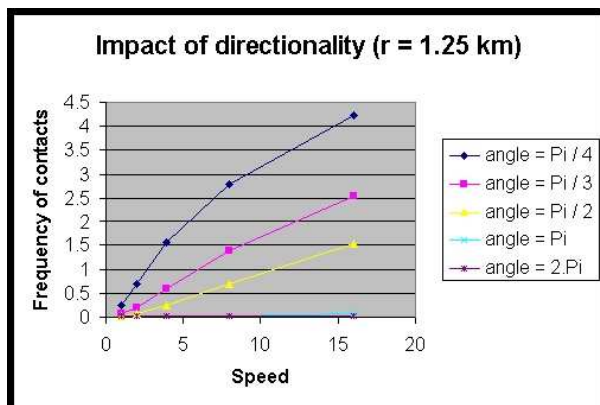


FIG. 4.6 – Impact de la directionnalité sur la fréquence de contact pour différents angles de variation de la direction ($r = 1.25km$)

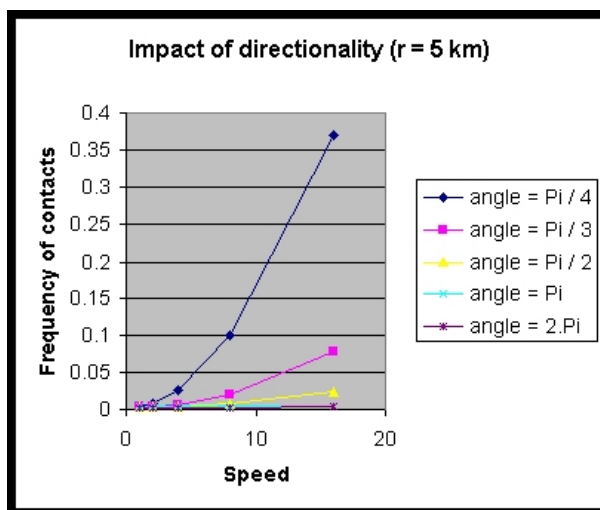


FIG. 4.7 – Impact de la directionnalité sur la fréquence de contact pour différents angles de variation de la direction ($r = 5km$)

Un premier point est que la très faible taille des groupes nécessitait vraisemblablement des échanges génétiques afin de préserver les populations de problèmes d'endogamie trop importants. Nous pensons ici que les échanges maritaux ou les vols de femmes, qui sont toujours une composante importante de la vie de nombreuses populations de chasseurs-collecteurs actuelles (voir par exemple les schémas complexes d'exogamie linguistique en Australie [Dixon, 1980a]), peuvent remonter de façon fort lointaine dans le passé.

Tout en apportant des gènes nouveaux au patrimoine du groupe, les échanges d'individus formaient également un lien culturel entre les groupes, permettant la diffusion d'innovations culturelles. Notons ici que les groupes, notamment par le vol de femmes, pouvaient éviter des contacts directs et prolongés entre eux, tout en ayant un vecteur efficace d'échanges culturels et génétiques.

Trois exemples archéologiques nous semblent de plus aller dans le sens d'échanges culturels assez significatifs entre les groupes humains.

D'une part, la remarquable uniformité des outils (Acheuléens) des populations *Erectus* sur l'ensemble de l'Afrique et de l'Eurasie au Paléolithique Inférieur est vraisemblablement la marque de contacts entre les populations locales [Harpending et al., 1993] (p. 495). Toutefois, si la variabilité spatiale est très faible, la variabilité temporelle l'est également, ce qui peut être induit par une certaine staticité temporelle des artefacts plutôt que par une uniformisation des populations.

Les échanges de matériel lithique depuis le Paléolithique Inférieur jusqu'au Paléolithique Supérieur traduisent également des échanges entre groupes. Une transition importante s'opère entre les populations Australopithèques et *Habilis* du Pliocène et les populations ultérieures, qui pourrait traduire un accroissement des contacts après l'émergence d'*Homo ergaster* [Marwick, 2002].

Enfin, les schémas ("*patterns*") de variabilité des objets de parure dans différentes régions françaises au Paléolithique Supérieur mettent en évidence une homogénéité au niveau macro-populationnel, qui traduit vraisemblablement des échanges entre groupes. Phénomène encore plus intéressant, des variations locales plus fines vont de paire avec l'homogénéité globale. Il nous semble possible de voir en ces hétérogénéités les marques d'un mécanisme social d'affirmation du groupe par rapport aux autres [Sauvet and Włodarczyk, 2001]. Si ce mécanisme implique des variations entre groupes, l'homogénéité globale traduirait toutefois l'équilibre qui existe entre appartenance à une macro-structure et affirmation de soi au sein de cette structure, selon une dynamique d'attraction-répulsion.

4.2.3 Postulats et conclusions préliminaires

Nous avons tenté de rassembler différentes sources de données relatives à la démographie et aux contacts entre groupes humains au cours de la préhistoire. Ces informations sont primordiales pour pouvoir aborder de façon cohérente la question de la diversité et des changements linguistiques. Pour la suite de notre argumentation, nous résumons ici les postulats que nous adopterons, sur la base des données précédentes :

- la population humaine au cours du Paléolithique était très peu importante, et était structurée selon des groupes d'environ 25 individus en moyenne ;
- ces groupes se rencontraient très peu fréquemment, et pouvaient adopter des relations non agressives lors des contacts ; il est raisonnable d'envisager des échanges culturels et

génétiques de plus en plus fréquents au cours de la préhistoire, avec un développement particulièrement significatif au cours du Paléolithique Supérieur ;

- deux scénarios s'opposent quant à l'origine des populations modernes : existence d'une population archaïque plus ou moins isolée au cours du Pléistocène en Afrique, ou évolution multi-régionale.

Nous pouvons passer maintenant aux troisième et quatrième parties de ce chapitre, qui vont mettre à profit les hypothèses précédentes et faire ressortir une fois de plus l'importance des dimensions distribuée et structurelle du "système langage".

4.3 Monogenèse ou polygenèse d'innovations

Dans cette section, notre sujet d'étude sera l'apparition d'innovations dans une population d'individus. L'application des résultats que nous mettrons en évidence concernera évidemment le langage, mais le modèle est en fait suffisamment général pour rendre compte de l'apparition de toute une gamme d'innovations comme de nouvelles techniques de taille, la maîtrise du feu, des techniques de sculpture ou de peinture rupestre. . . En outre, pour plus de facilité, nous préférons séparer l'étude générale de de son application à la question du langage, que nous aborderons dans la section suivante.

4.3.1 Définitions et comparaisons de quelques innovations culturelles

Définition et preuve

Il est utile pour commencer de rappeler les définitions des termes *monogenèse* et *polygenèse*. L'émergence par **monogenèse** d'une innovation signifie l'apparition en un unique endroit de cette innovation. Par opposition, la **polygenèse** correspond à une émergence en plusieurs lieux ou sites *de façon indépendante*. Par la suite, nous nous placerons toujours dans le contexte un peu plus restreint d'une innovation *dans une population d'individus*.

Prouver la polygenèse ou la monogenèse d'une innovation dans une large population pose des problèmes difficiles à résoudre. En effet, l'observation à un instant donné d'une macro-population exhibant une innovation dans différents groupes d'individus ne permet pas de conclure à une polygenèse si l'on n'est pas en mesure de montrer que plusieurs émergences ont eu lieu de façon indépendante. Ce point qui peut sembler trivial ne l'est pas autant en pratique si l'on s'intéresse aux migrations humaines : s'il est possible de démontrer (par le biais des registres archéologiques) que des groupes humains dans une certaine région du globe possèdent une innovation, alors que d'autres groupes dans d'autres régions de la planète ne la possèdent qu'après un long interval temporel, la possibilité d'une polygenèse est en compétition avec celle d'une diffusion de l'innovation. Pouvoir trancher entre ces deux hypothèses nécessite de savoir si une diffusion était bien possible, si elle est éventuellement attestée par des indices archéologiques. . .

Nous verrons qu'il est possible de raisonner sur des *probabilités* de polygenèse ou de monogenèse, mais ceci ne permet en aucun cas de conclure sur un cas particulier et réel d'innovation. Tout au plus pourrons nous apporter des arguments de type *probabiliste* sur les situations de notre passé.

Quelques polygénèses attestées d'innovations culturelles humaines

Existe-t-il certaines évidences de polygénèse d'innovations culturelles au cours de l'histoire humaine ? Il semble que plusieurs innovations importantes soient apparues par polygénèse, que nous allons présenter rapidement :

- la domestication du feu. Elle semble s'être produite en plusieurs endroits il y a environ 500,000 ans, mais ce fait reste contesté ;
- l'agriculture. La polygénèse de l'agriculture semble très probable, à en juger par les différents foyers d'émergence il y a environ 10,000 ans dans des régions distantes de la planète : Moyen-Orient, Papouasie Nouvelle-Guinée [Dixon, 1980b], Mexique, Andes, Chine. Il semble peu probable, au vu de la proximité temporelle et des distances géographiques, que ces innovations ne soient pas indépendantes ;
- les systèmes d'écriture. Trois foyers d'émergence co-existent : l'Égypte (IV^{ème} millénaire av. J.C.), le pays de Sumer (IV^{ème} millénaire av. J.C.) et la Chine (II^{ème} millénaire av. J.C.). Si certains auteurs pensent que pictogrammes sumériens (tablette d'Uruk, datant du IV^{ème} millénaire avant Jésus Christ) et hiéroglyphes idéogrammes égyptiens sont reliés, les différences fondamentales entre les trois systèmes d'écritures laissent supposer des émergences distinctes, une ou deux en Occident et une en Chine (où les premières traces sont des gravures sur carapace de tortue).

L'agriculture, tout comme la domestication du feu et l'écriture représentent des innovations culturelles majeures de l'histoire humaine, et la probabilité d'une polygénèse est forte dans les trois cas. Dès lors, il est tentant d'envisager la polygénèse d'autres innovations culturelles, et en particulier du langage, même si celui-ci se base également sur des transformations physiologiques.

Notons avant de passer à la suite que l'on peut également être tenté de parler de polygénèse pour des évolutions plus physiologiques dans différentes espèces mais de façon indépendante au cours de l'évolution. Ce pourrait être le cas de la bipédie, qui se serait partiellement développée dans plusieurs espèces de l'arbre phylogénétique humain il y a plusieurs millions d'années. Comme pour l'apparition de l'aile chez les oiseaux et chez les mammifères (chauve-souris), nous aurions alors un exemple pour les espèces concernées d'homologie (similarités des structures dans différentes espèces en raison d'une ancestralité partagée) et d'analogie (les structures des différentes espèces sont similaires en raison d'une évolution convergente et d'un avantage fonctionnel)³⁴.

4.3.2 Estimations probabilistes sur la monogénèse ou la polygénèse d'une innovation

Nous avons déjà mentionné plus haut la possibilité d'estimer les probabilités de polygénèse ou de monogénèse d'une innovation. La primauté de ce calcul dans le cadre de l'émergence du langage revient à David Freedman et William Wang [Freedman and Wang, 1996]. Le but principal de l'article, dont nous allons détailler les arguments en restant dans le cadre général d'innovations quelconques, est d'aller à l'encontre d'une mauvaise appréciation des probabilités : étant donné n sites, si la probabilité d'émergence en un site est faible, alors la probabilité d'émergence en deux sites (ou plus) est plus faible, car elle est définie comme le produit de probabilités très faible. Se basant sur un raisonnement mathématique simple, les deux auteurs montrent qu'en

³⁴Suggérons ici qu'une hypothèse provocante pourrait être une apparition du langage en plusieurs sites de façon indépendante et pour des fonctions différentes (absence d'analogie fonctionnelle)...

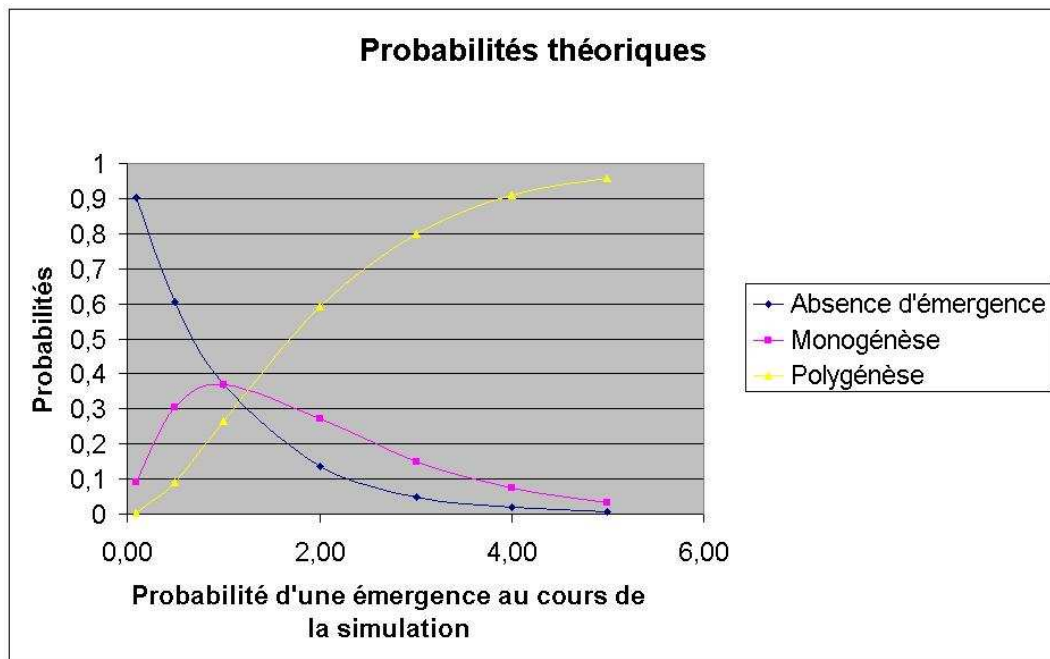


FIG. 4.8 – Evolution des probabilités de monogénèse et de polygénèse d'une innovation en fonction de la probabilité d'émergence en un site

fait, la probabilité de polygénèse augmente rapidement (de façon non linéaire) avec la probabilité d'émergence en un site, et dépasse les probabilités de monogénèse ou d'absence de genèse au-delà d'un certain seuil. La figure 4.8 offre un exemple du schéma d'évolution des probabilités pour 5 sites.

Il n'existe pas vraiment de contradiction entre la première intuition probabiliste et le résultat de l'article, si ce n'est que si 10 sites sont en jeu, il est nécessaire de considérer ces 10 sites et la combinatoire des probabilités associées, et non pas seulement deux sites de *façon indépendante* comme dans le premier raisonnement.

Comme nous l'avons déjà dit, les résultats probabilistes ne permettent pas de conclure dans un cas précis ; si la probabilité d'émergence en un site est faible, alors l'émergence de l'innovation est un événement rare et la plus forte probabilité est qu'il n'y ait pas d'émergence du tout. Si la probabilité augmente, alors la polygénèse devient beaucoup plus probable que la monogénèse, comme le concluent les auteurs et le montre la figure 4.9.

4.3.3 Monogénèse, polygénèse et fréquences de contact

Les calculs présentés dans les paragraphes précédents considèrent la genèse d'une innovation en des sites indépendants. Si l'on considère des communautés d'individus, il est possible pour certaines innovations qu'une diffusion ait lieu dans la macro-population. D'après les hypothèses effectuées à la fin de la deuxième section de ce chapitre, les groupes humains au cours de la pré-histoire entraînent effectivement en contact, entre autres par le biais d'échanges de partenaires. Ceci rend possible une diffusion d'innovations culturelles.

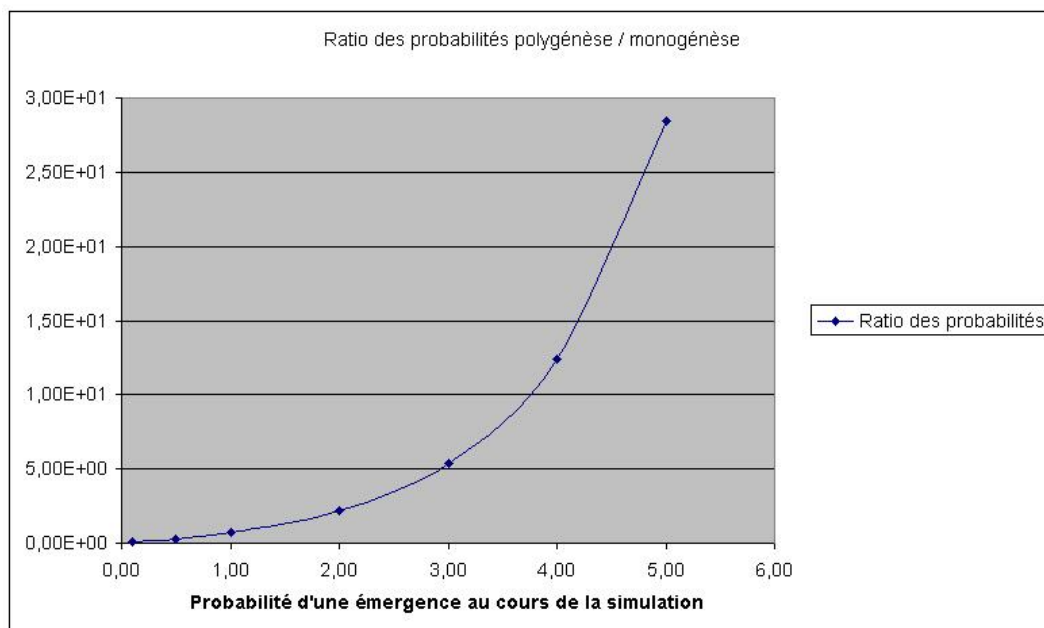


FIG. 4.9 – Evolution du ratio probabilité de polygénèse sur probabilité de monogénèse en fonction de la probabilité d'émergence en un site

Pensant que ce phénomène pouvait jouer un rôle important pour la polygénèse d'innovations, nous avons tenté de complexifier le modèle de Freedman et Wang en introduisant des communautés d'agents pouvant entrer en contact. Comme nous l'avons déjà précisé, la résolution mathématique exacte du problème des fréquences de rencontre entre groupes est très délicate. Nous avons donc eu recours à des simulations multi-agents pour dépasser cette limitation. Notre modèle, fort simple au demeurant, est constitué des éléments suivants :

- un monde pour les évolutions des agents, représenté par un espace bidimensionnel euclidien, carré et non-torique (pour observer des effets de bords qui miment les contraintes géographiques des continents réels), de surface S ;
- N agents, représentant chacun un groupe, et évoluant dans le monde de façon pseudo-aléatoire (comme plus haut, en fonction de paramètres comme la vitesse de déplacement ou la directionnalité). Chaque agents peut posséder ou non l'innovation en jeu ;
- une probabilité d'émergence en un site, p_c , ainsi qu'une probabilité p_t de transmission de l'innovation d'un groupe à un autre en cas de contact. Les contacts ont lieu lorsque les groupes se trouvent à moins d'une distance limite d_l ;
- un temps T d'évolution pour le modèle (sur un mode discret).

Afin d'étudier l'impact des contacts sur les schémas de distribution de probabilités de polygénèse ou de monogénèse de l'innovation, nous avons effectué un grand nombre de simulations permettant de croiser les paramètres en jeu. Afin d'estimer de façon correcte les probabilités de polygénèse ou de monogénèse, chaque jeu de valeurs des paramètres a fait l'objet de 100 simulations, régies par des tirages aléatoires³⁵ contre les probabilités d'émergence ou de transmission

³⁵C'est cette simulation qui mit en évidence la faiblesse du générateur de nombres pseudo-aléatoires du c++,

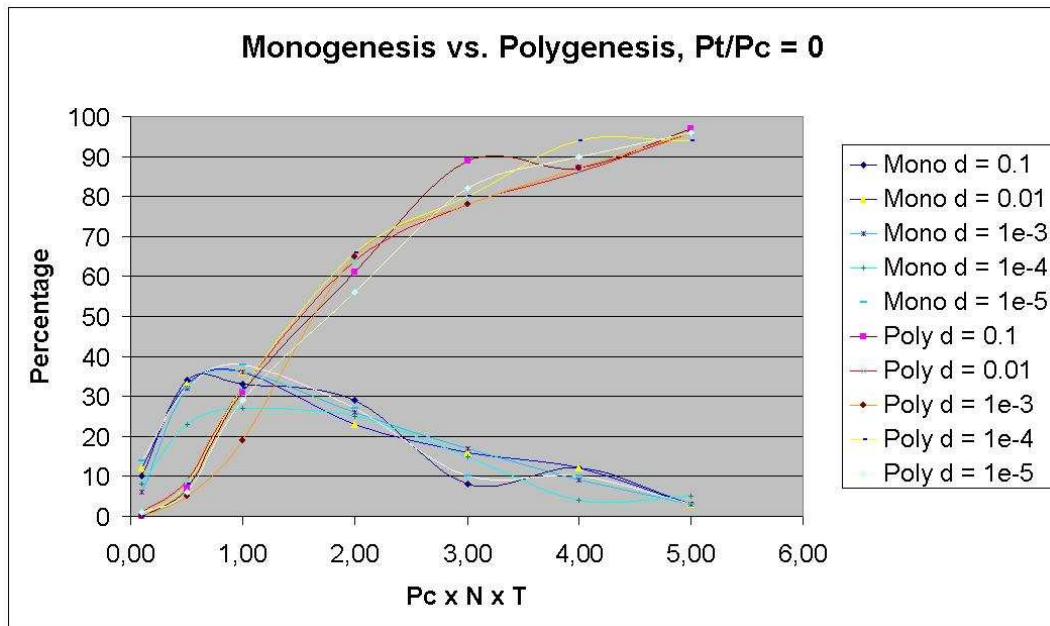


FIG. 4.10 – Reproduction expérimentale des résultats théoriques de [Freedman and Wang, 1996]

à chaque pas de temps. Les paragraphes suivant décrivent les résultats obtenus.

Reproduction des résultats théoriques de Wang et Freedman

Le premier point afin de s'assurer de la validité des tirages aléatoires fut de reproduire les résultats théoriques de Wang et Freedman, qui correspondaient à une absence de contacts entre les groupes de population. La figure 4.10 permet de vérifier aisément par comparaison avec la figure 4.8 que la gestion expérimentale des mécanismes stochastiques en jeu est correcte.

Fusion des paramètres surface et nombre d'agents

Croiser plusieurs paramètres d'un modèle conduit souvent à générer un grand nombre de cas à tester. Si chacun d'entre eux nécessite un temps important de traitement, la tâche peut vite devenir ardue, même avec des machines puissantes. Réduire le nombre de paramètres à croiser est donc souvent très utile.

En explorant les variations des paramètres, il est rapidement apparu qu'il était possible de fusionner les deux paramètres "surface du monde" et "nombre d'agents", et de les remplacer par un seul, à savoir la densité d'agents (c'est à dire la densité de groupes, ce qui permet de mettre à profit les calculs effectués plus hauts). Ceci permet de gagner du temps de calcul pour examiner plus finement les variations des autres paramètres, en particulier en fixant un nombre d'agents réduit (100), et en faisant varier la surface de l'espace. Il est bon ici de souligner que la répétition de 100 simulations avec 100 agents pour un jeu de probabilités p_c et p_t et de paramètres de déplacement nécessitaient plusieurs heures sur un PC récent. Les avantages d'un

et imposa un générateur plus performant basé sur l'algorithme de Mersenne.

langage de programmation performant et d'un compilateur permettant une bonne optimisation des programmes exécutables sont ici très appréciables.

Etude de l'impact du ratio $\frac{P_t}{P_c}$ et de la densité de groupes ; présentation des résultats

Le croisement des paramètres s'est opéré de la façon suivante :

- valeurs de la densité de groupes : 0.1, 0.01, 0.001 et 0.0001 groupe par km^2 ;
- nombre d'agents : 100 (10, 50 ou 500 agents donnent les mêmes résultats, seule la densité joue) ;
- valeurs de la probabilité d'émergence en un site : les valeurs ont été choisies pour que le produit de la probabilité d'émergence par le nombre d'agents par le temps (ce qui correspond à la légende $\mathbf{P_c \times N \times T}$ des axes horizontaux des graphes) prenne les valeurs 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 et 5.0. Ce produit correspond en fait au nombre moyen d'émergences que l'on devrait observer au cours d'une simulation sans phénomène de diffusion pour le triplet de paramètres ;
- valeurs de la probabilité de transmission lors d'un contact : les valeurs choisies sont en fait dépendantes des valeurs de la probabilités d'émergence P_c , afin de pouvoir travailler sur le ratio $\frac{P_t}{P_c}$, et comparer ainsi facilement les deux facteurs d'émergence et de transmission. Les ratios étudiés ont été : 0, 1, 5, 10, 50, 100, 500, 1000 et 10000 ;
- paramètres de déplacement : vitesse de déplacement : 2 kilomètres par an ; rayon du territoire d'un groupe : 10 kms ; angle de variation maximal pour la direction à chaque pas de temps : 15° (soit $\alpha = 30^\circ$) ; période temporelle considérée : 80,000 ans.

Les figures 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 et 4.16 présentent les différents schémas de distribution des probabilités en fonction des variations des paramètres précédents.

Discussion des résultats

Les principales conclusions que nous avons pu tirer de ces simulations sont les suivantes : si comme l'avaient expliqué Freedman et Wang, la polygenèse devient plus probable que la monogenèse d'une innovation dès que la probabilité d'émergence en un site dépasse un certain seuil, ce schéma peut-être "court-circuité" par une diffusion rapide de l'innovation d'un site à un autre. En effet, si une innovation apparaît dans un groupe et se diffuse rapidement à d'autres, ces derniers, ayant acquis l'innovation par contact, ne la développeront plus de façon indépendante. Ainsi, la probabilité de monogenèse de l'innovation peut redevenir plus importante, et devenir même supérieure à celle de polygenèse si la diffusion de l'innovation se fait assez rapidement. Notons que c'est le ratio de probabilités de transmission et d'émergence en un site qu'il est important de considérer. En effet, c'est le ratio qui induit la possibilité qu'une innovation diffuse plus vite qu'elle n'apparaît en différents sites.

Quels sont les facteurs qui viennent influencer la diffusion d'une innovation d'un groupe à un autre ? Il s'agit tout d'abord de la fréquence des contacts entre les groupes d'individus, qui est déterminée d'une part par la densité de ces derniers groupes, et d'autre part par la façon dont ils se déplacent dans l'environnement. Comme l'ont montré les simulations simples sur les fréquences de contact, le caractère plus ou moins erratique ou directionnel des déplacements influe sur l'espace balayé par un groupe au cours d'une période T , et vient influencer la fréquence

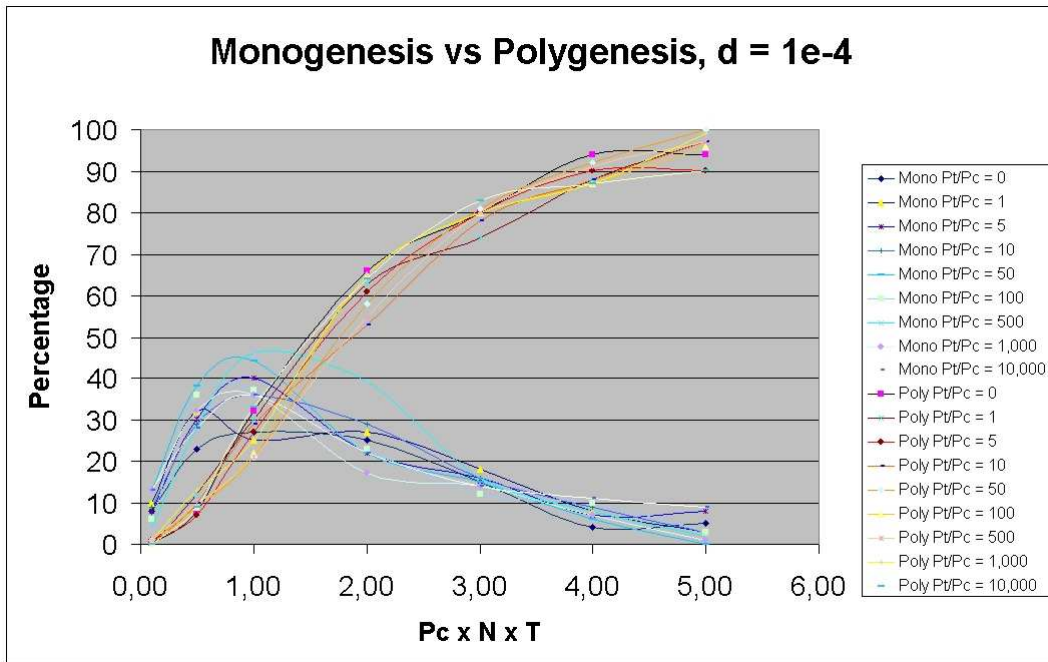


FIG. 4.11 – Schéma des probabilités de polygenèse et de monogenèse pour une densité de 0.0001 groupes au km^2

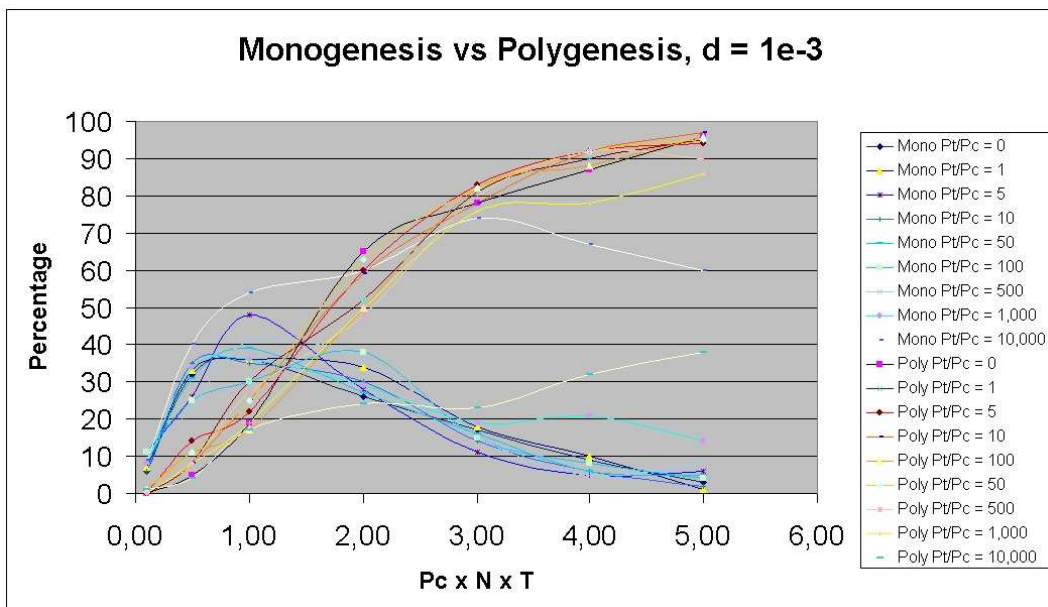


FIG. 4.12 – Schéma des probabilités de polygenèse et de monogenèse pour une densité de 0.001 groupes au km^2

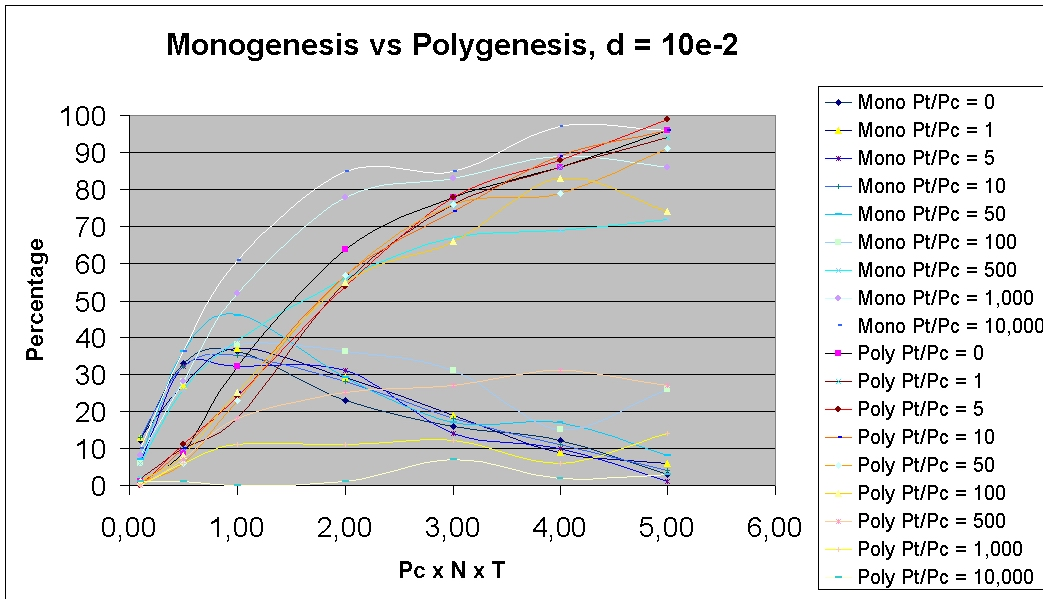


FIG. 4.13 – Schéma des probabilités de polygenèse et de monogenèse pour une densité de 0.01 groupes au km^2

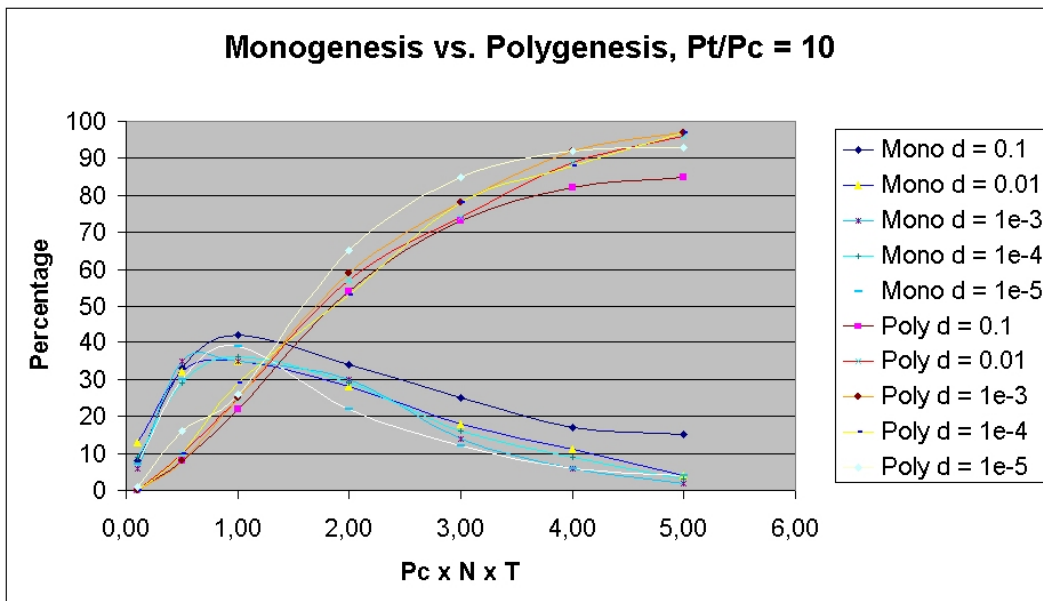


FIG. 4.14 – Schéma des probabilités de polygenèse et de monogenèse pour un ratio de probabilités $\frac{P_t}{P_c}$ de 10.0

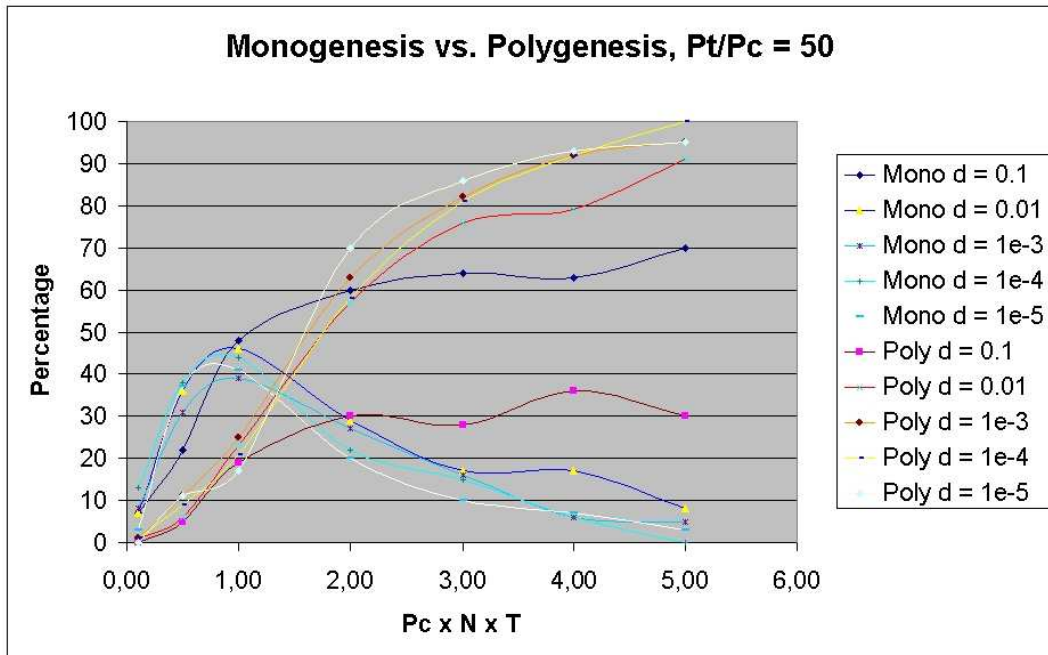


FIG. 4.15 – Schéma des probabilités de polygenèse et de monogenèse pour un ratio de probabilités $\frac{P_t}{P_c}$ de 50.0

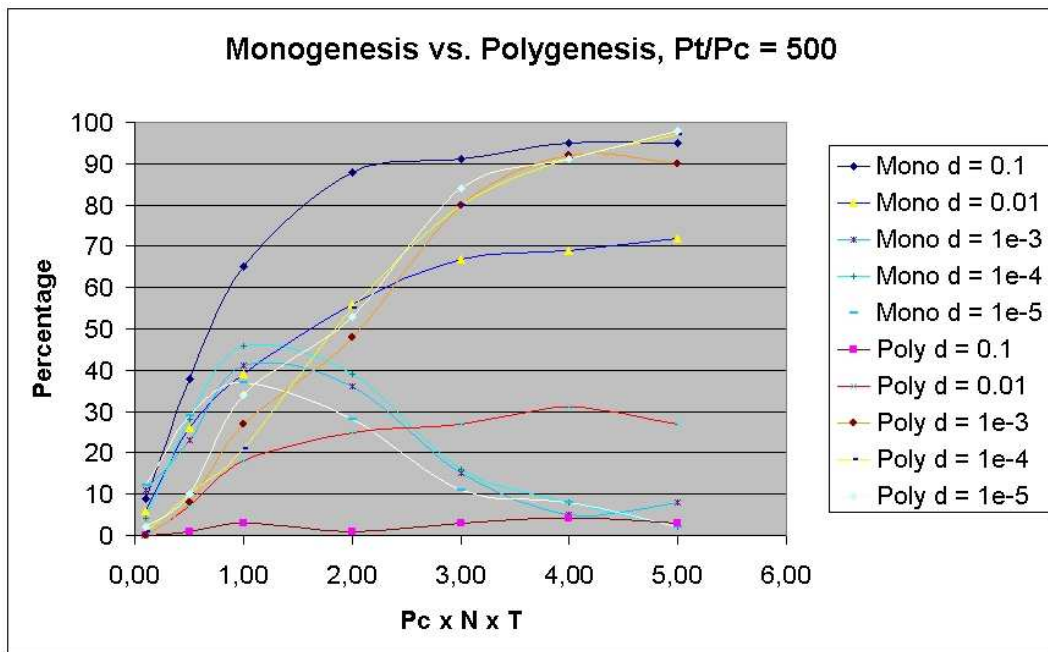


FIG. 4.16 – Schéma des probabilités de polygenèse et de monogenèse pour un ratio de probabilités $\frac{P_t}{P_c}$ de 500.0

des contacts. Parallèlement à celle-ci, la possibilité d'une transmission lors d'un contact est un deuxième paramètre qui vient définir la vitesse de propagation d'une innovation.

Mathématisation du phénomène de diffusion

Une direction intéressante que nous n'avons pas considérée très en détail mais que nous souhaitons néanmoins mentionner est la possibilité d'une mathématisation du phénomène de diffusion. Le but serait ici de décrire une approche analytique du problème, et d'établir des formules exactes permettant de séparer les phénomènes de diffusion des phénomènes d'émergence probabiliste. Les diffusions sont d'une façon générale bien étudiées au niveau mathématique, puisqu'elles apparaissent dans de nombreux domaines de la physique et de la chimie. Notre cas de diffusion d'une innovation culturelle est cependant plus proche du cas de la diffusion d'une épidémie dans une population. Les équations classiques font intervenir des équations différentielles dans un espace bidimensionnel :

$$\begin{aligned}\frac{\partial S}{\partial t} &= -rIS + D\Delta^2 S \\ \frac{\partial I}{\partial t} &= rIS - aI + D\Delta^2 I\end{aligned}$$

I représente la distribution spatio-temporelle des individus infectés, S celle des sujets sains, r un facteur de transmission de l'épidémie entre sujets infectés et sains (le nombre moyen de personnes saines qu'une personne infectée contamine par unité de temps); aI correspond au taux de mortalité des personnes infectées ($\frac{1}{a}$ est la durée de vie d'une personne infectée), et enfin D est le facteur de diffusion des personnes infectées et saines (choix du même facteur pour les deux populations) [Murray, 1984] (p. 651)

Ce type de systèmes d'équations différentielles couplées est difficile à résoudre de façon exacte, mais il est possible de recourir à des simulations numériques d'une part, et d'autre part d'extraire des solutions exactes de régimes de diffusion particuliers, par exemple celle de vagues de diffusion à vitesse constante.

L'application de ces équations peut-être envisagée pour de nombreuses diffusions d'innovations, comme par exemple celle de techniques de taille. On pensera en particulier aux transitions des industries européennes avec l'arrivée des populations d'*Homo sapiens* il y a environ 40,000 ans. Nous avons ainsi commencé à développer des simulations multi-agents pour modéliser la diffusion d'une innovation sur le globe, en tenant compte de la topographie terrestre. Les figures 4.17 et 4.18 illustrent ces simulations en présentant la diffusion d'une innovation à partir du Proche-Orient.

Critiques et commentaires

Au cours des derniers paragraphes, nous avons volontairement omis de nombreuses critiques qui pourraient être formulées contre le modèle. Nous souhaitons ici les aborder et tenter de justifier notre position.

Différents commentaires peuvent être faits à l'encontre de la simplicité du modèle :

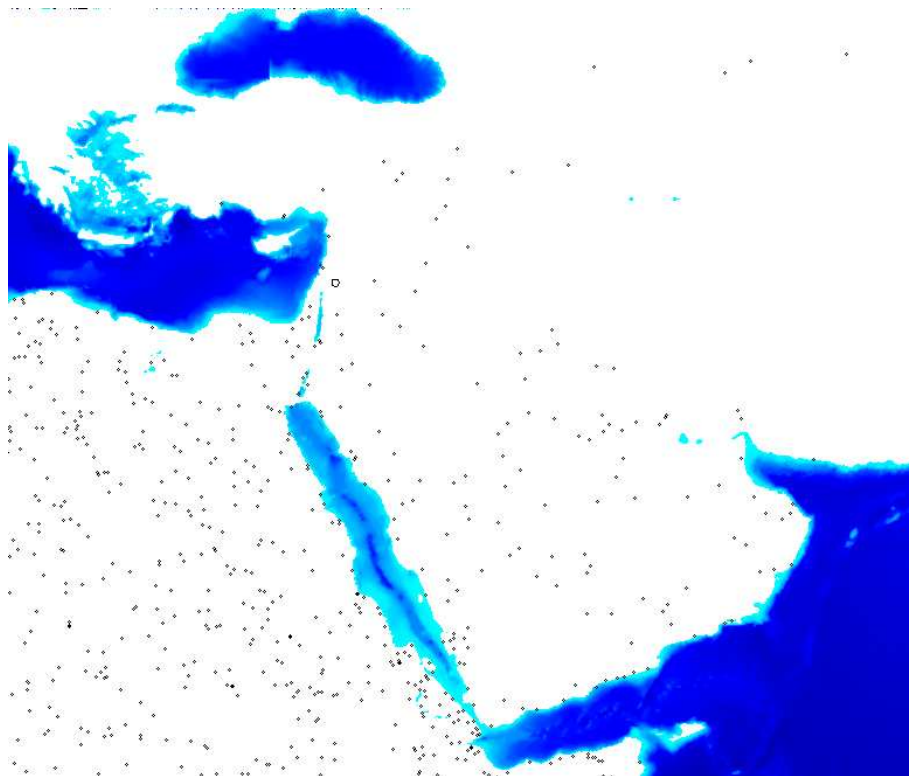


FIG. 4.17 – Simulation multi-agents d'une diffusion d'innovation dans une macro-population humaine; début de la diffusion : émergence de l'innovation en un site

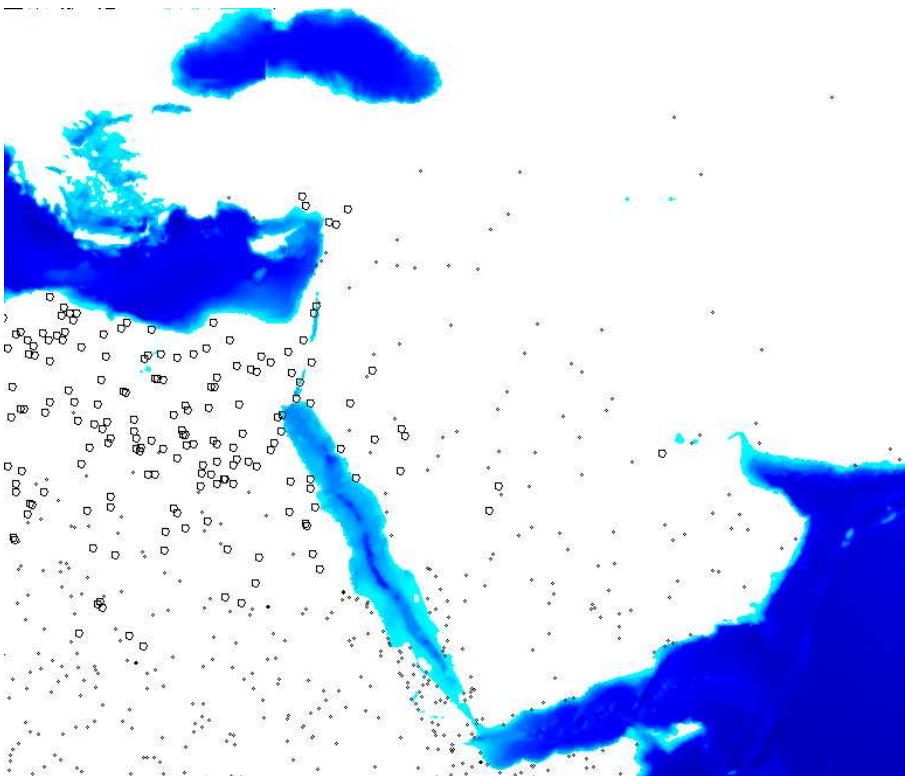


FIG. 4.18 – Simulation multi-agents d’une diffusion d’innovation dans une macro-population humaine ; progression de la diffusion

- la densité des groupes humains n'était vraisemblablement pas uniforme sur le globe. Certaines régions comme les régions désertiques ou semi-désertiques étaient très probablement moins peuplées que les rives des cours d'eaux ou les bords de mers. En ces lieux de plus forte densité, les diffusions étaient plus rapides, et au contraire, celles entre les zones de forte densité séparées par des régions très faiblement peuplées beaucoup plus lentes et difficiles.
- les contacts entre groupes n'étaient pas nécessairement aléatoires, et des réseaux sociaux existaient probablement, comme nous l'avons souligné plus haut ;
- certains groupes pouvaient se scinder en deux, d'autres pouvaient disparaître, emportant avec eux l'innovation "dans la tombe". La scission d'un groupe devenu trop important est un phénomène fréquent dans les populations de chasseurs-collecteurs, et correspond à la difficulté de maintenir des liens sociaux positifs quand le nombre d'individus devient trop important. La disparition de certains groupes est aussi probable d'après les fluctuations démographiques des populations préhistoriques.

Néanmoins, il nous semble que ces arguments constituent des détails vis à vis des conclusions sur les phénomènes généraux que nous avons mis en valeur. Il est possible que les phénomènes détaillés juste ci-dessus modifient de façon *quantitative* les résultats des expériences informatiques, mais ils ne semblent pas modifier les résultats *qualitatifs*, à savoir la possibilité de "court-circuiter" la polygenèse d'une innovation si la diffusion de celle-ci est très rapide. Ces éventuelles modifications quantitatives des valeurs des paramètres du modèle pour observer le phénomène de "court-circuit" portent d'autant moins à conséquence qu'il est impossible d'évaluer les probabilités d'émergence et de transmission dans les cas réels.

Différents scénarios d'émergence

Nous pensons que les simulations informatiques peuvent nous renseigner sur les possibles scénarios d'émergence de différentes innovations. De nombreuses possibilités pour le développement de notre espèce ont été mentionnées plus haut dans ce chapitre :

- scénario *Out of Africa* ou évolution multi-régionale (dans ce dernier cas, la population fondatrice est de l'ordre du million d'individus au cours de la seconde partie du Paléolithique Inférieur) ;
- version *hourglass* (population archaïque connectée à la macro-population du Pléistocène mais goulot d'étranglement lors de la spéciation conduisant à notre espèce) ou *long-neck* (population archaïque de notre espèce d'environ 10,000 individus et isolée du reste de la macro-population au Pléistocène) de l'hypothèse *Out of Africa* ;
- toujours dans le cadre *Out of Africa*, expansion continue de la population *Homo sapiens* ou expansion de plusieurs populations filles après un délai temporel plus ou moins long.

Notons encore une fois que nous ne pouvons pas déterminer la probabilité d'émergence d'une innovation en un site, et qu'il est également difficile d'estimer le ratio de la probabilité de transmission sur la probabilité d'émergence en un site. Il est toutefois possible de raisonner par comparaisons de différentes situations, et en jouant sur le ratio précédent.

Période, espèce et mode d'émergence d'une innovation culturelle. Différents cas peuvent être envisagés, selon l'espèce où l'innovation s'est produite, l'existence ou l'absence

de corrélation entre une spéciation et l'apparition de l'innovation, et l'émergence multi-régionale ou par remplacement de notre espèce. Certains cas conduisent plus probablement à une polygénèse que d'autres pour des probabilités fixes d'émergence en un site et de transmission.

Soulignons ici la possibilité que l'apparition d'une innovation soit corrélée à l'apparition d'une nouvelle espèce. En effet, si une innovation repose sur le développement de certaines capacités cognitives ou physiologiques, celle-ci ne peut se produire qu'après l'apparition de ces capacités chez une espèce. Le problème est alors de savoir si l'innovation suit presque immédiatement la spéciation et l'apparition des nouvelles capacités ou si un délai temporel existe. L'intérêt fonctionnel de l'innovation rentre bien sûr ici en jeu.

Le premier point que nous pouvons aborder concerne la possibilité d'un court-circuit d'une possible polygénèse par une diffusion rapide de l'innovation. Que ce soit dans le cas d'une évolution locale ou d'une évolution multi-régionale, les densités humaines ont toujours été très faibles, de l'ordre de $5E-4$ groupes au km^2 . Les figures 4.11 et 4.12 ont montré que pour ces valeurs très faibles, même un ratio très important de la probabilité de transmission sur celle d'émergence en un site ne conduit pas à un renversement des probabilités en faveur de la monogénèse (c'est à dire à un court-circuit de la polygénèse). Dès lors, si la probabilité d'émergence en un site était importante, la polygénèse demeure bien l'hypothèse la plus probable.

Dans le cas d'une apparition d'une innovation chez *Homo sapiens*, la probabilité relative de polygénèse est plus importante dans le cas d'une évolution multi-régionale que dans le cas d'une spéciation locale, car à probabilité d'émergence en un site fixée, le nombre de sites est bien plus important dans le premier cas alors que les vitesses de diffusion sont vraisemblablement identiques (à moins de supposer que les contacts entre Erectus étaient beaucoup plus agressifs que ceux entre Sapiens).

Le problème de la corrélation entre émergence de l'espèce et apparition de l'innovation est très délicat. En effet, la spéciation nécessite un certain temps et doit d'une certaine façon se diffuser elle-même par contacts géniques entre les individus. Si l'innovation apparaît dans la population corrélativement au phénomène de spéciation, il nous paraît difficile de connaître le schéma d'émergence de cette innovation, qui peut diffuser ou non avec une partie des changements géniques responsables de la spéciation. Ceci est vrai pour une spéciation locale comme pour une spéciation multi-régionale : l'innovation est en interaction avec les nouvelles formes géniques quelle que soit la situation, et la situation nous paraît trop complexe pour pouvoir conclure en faveur d'une polygénèse ou d'une monogénèse.

Dans le cas d'une décorrélation temporelle, la période à laquelle se produit la première émergence a des conséquences sur la probabilité de polygénèse, comme nous allons le voir maintenant.

Expansion de populations, scission de groupes et transmission verticale. Si l'on envisage une expansion spatiale de la population sans expansion en taille, alors la période temporelle d'expansion joue un rôle significatif en lien avec la probabilité d'émergence en un site. Si nous raisonnons dès lors à produit $T \times p_c$ constant (puisque N est constant dans le produit $\mathbf{P}_c \times \mathbf{N} \times \mathbf{T}$), nous arrivons à la proposition suivante : plus la période temporelle considérée est importante, et donc la fréquence d'émergence en un site faible, plus la probabilité d'une émergence dans un bref intervalle de temps après le début de l'expansion est faible. Autrement dit, plus p_c est faible et T important à produit fixe, plus la probabilité est importante que la première émergence se produise à une époque tardive.

Ce résultat est à replacer dans le détail de l'expansion spatiale. Si l'espace d'expansion est "infini", alors une période de temps plus importante conduit simplement à une surface habitée plus vaste et selon une densité plus faible. Dès lors, à *ratio* $\frac{p_t}{p_c}$ *constant*, une plus faible valeur de p_c conduira à des émergences dans des conditions de plus faibles densités. Ceci accroîtra la possibilité de polygénèse.

Si l'espace d'expansion est limité, la population occupera cet espace de façon relativement homogène après un intervalle de temps limité. Si celui-ci est supérieur à la période d'expansion de la population, le résultat précédent sur un espace infini est transposable. Si l'intervalle de temps est au contraire inférieur à la période d'expansion, alors à partir d'un certain palier pour la durée de la période d'expansion, et toujours à *ratio* $\frac{p_t}{p_c}$ *constant*, la probabilité de polygénèse sera moins importante que dans le cas précédent.

Un élément doit être ajouté à la discussion précédente. En effet, une expansion spatiale peut en fait s'accompagner ou non d'une expansion populationnelle. L'accroissement des populations *Homo Sapiens* lors du Paléolithique Moyen et du Paléolithique Supérieur s'est très vraisemblablement produite par une succession de scissions des groupes d'individus (une taille trop importante des groupes de chasseurs-collecteurs conduit généralement à une scission du groupe). Dès lors, à des transmissions horizontales d'une innovation viennent s'ajouter des transmissions verticales. En linguistique plus particulièrement, le classique problème de la reconstruction des proto-langues pour la compréhension de l'évolution des langues se translate au problème de leur émergence.

Tout comme pour les transmissions horizontales, les transmissions verticales viennent éventuellement court-circuiter la possible polygénèse d'une innovation : si une émergence se produit dans les premières phases de l'expansion populationnelle, elle se répandra alors très facilement dans la population lors des fissions progressives des groupes.

Nous nous trouvons donc face au croisement de plusieurs paramètres significatifs : pour une surface S , la probabilité de polygénèse est-elle plus importante dans une population qui va connaître une expansion populationnelle et spatiale que dans une population de taille constante égale à la taille finale de la population en expansion ? Il semble que la réponse dépende en fait de la façon dont l'expansion populationnelle se déroule dans le temps, et nous voyons ici comment les deux hypothèses *weak* et *strong garden of Eden* peuvent s'opposer sur la question de la polygénèse d'une innovation. Si la population humaine a pu s'étendre spatialement sans connaître d'accroissement de taille important dans un premier temps, alors la probabilité de polygénèse est plus importante que dans le cas où les expansions spatiale et populationnelle ont été simultanées. En effet, on observe dans le premier cas un affaiblissement de la densité moyenne de la population (dû à une augmentation de surface comme dans le premier cas, ce qui diminue la fréquence des contacts et donc des transmissions horizontales, mais également causé par un nombre de transmissions verticales moins élevé que dans le second cas). En conclusion, le modèle *weak garden of Eden* nous paraît plus propice à une polygénèse de certaines innovations que son concurrent.

Le modèle que nous avons développé dans cette section, et l'ensemble des développements que nous y avons apporté, semble pertinent surtout pour le cas d'innovations *abruptes*, qui peuvent diffuser dans la population. L'objectif de la section suivante sera d'envisager plus spécifiquement le cas du langage.

4.4 Vers une genèse des langues par polygenèse structurale des stratégies linguistiques

Au cours de la section précédente, nous avons étudié un modèle général de l'apparition et de la diffusion d'innovations. Le but des prochains paragraphes est d'appliquer ce modèle à la question de l'émergence du langage et des langues.

Après avoir d'abord proposé de considérer le langage non pas comme une entité monolithique mais comme un ensemble de composantes qui ont pu émerger indépendamment, nous abordons le problème de la corrélation entre l'apparition d'une innovation linguistique et celle d'une nouvelle espèce. Nous tentons enfin d'appliquer le paradigme systémique à l'émergence des composants linguistiques.

4.4.1 Émergence du langage, des langues et des stratégies linguistiques

Définition et émergence des stratégies linguistiques

Il est possible d'envisager le langage comme une entité monolithique, c'est à dire comme une innovation majeure qui serait apparue sur la branche évolutive conduisant à notre espèce en des temps plus ou moins reculés. Wang et Freedman ont ainsi fait porter leur modèle sur le langage d'une façon abstraite, sans prendre toutefois le risque de définir plus avant ce qu'ils entendaient par ce terme. Sans aller aussi loin, plusieurs scientifiques, dont Derek Bickerton, ont défendu l'idée d'une émergence catastrophique de la syntaxe : une brusque transition se serait opérée chez nos ancêtres, entre un stade linguistique rudimentaire et dépourvu de toute syntaxe, et un stade très voisin de celui des langues contemporaines [Bickerton, 1990].

Le modèle détaillé plus haut peut être appliqué à une telle macro-innovation. Nous pensons toutefois comme nombre de scientifiques, et ceci est bien sûr un postulat, que le langage n'est pas apparue de façon brutale, ni même selon quelques grandes phase de transitions comme celle suggérée par Bickerton, mais de façon graduelle. Afin d'être plus précis, nous proposons d'appliquer le modèle précédent aux items linguistiques qui participent à la formation des langues en composant leur inventaire *typologique*. Nous faisons l'hypothèse, que nous allons essayer d'étayer par la suite, que les items linguistiques ont pu apparaître de façon relativement indépendante au cours du temps, selon un scénario de monogenèse ou de polygenèse suivant la période d'apparition et les caractéristiques de chaque item.

Nous souhaitons introduire ici une dénomination différente pour ces items linguistiques, en accord avec l'idée d'inventaire typologique et les considérations que nous introduirons par la suite : nous recourons ainsi au terme de **stratégies linguistiques**, dans le sens de fonctions permettant l'expression de représentations sémantiques et cognitives par le biais du langage. Nous employons ici "*stratégies*" pour refléter la multiplicité des solutions (peut-être plus ou moins efficaces, mais en tout cas très diverses) pour réaliser la *projection* d'un espace de représentations internes à un espace linguistique externe. Ce terme est pour nous analogue à celui de "caractéristiques typologiques" des langues, pris dans un sens large. Notons ici que Croft utilise ce terme dans un sens voisin, en insistant sur l'aspect analytique et local :

"The usual procedure for initiating a cross-linguistic comparison of a particular grammatical phenomenon for the purposes of a typological analysis is to survey the range of structures used for the phenomenon in question... Thus, given a particular external definition of a cate-

gory, such as that proposed for the relative clause, one may then classify the linguistic structures found across languages to express or manifest that external definition. These structures are called types or strategies. This is typology in the second sense, a cross-linguistic structural classification.” [Croft, 1990] (p. 27).

Nous insistons quant à nous plus sur le côté fonctionnel des stratégies, et la compétition à un niveau global des structures typologiques pour former une langue et véhiculer de l’information. Ceci est toujours dans l’esprit d’un même degré d’indigence des éléments sémantiques dans les différentes langues, bien que grâce à des caractéristiques typologiques parfois fort différentes (voir chapitre 2).

Il est intéressant de rapprocher l’émergence des stratégies individuelles de celles des langues, puisque, comme nous venons de le dire, les langues sont composées d’un ensemble de stratégies. Ceci est en particulier pertinent vis à vis de l’hypothèse d’une unique langue mère à l’origine de toutes les langues actuelles.

Quelques arguments en faveur de la monogenèse des langues

Bien que la question ne soit pas centrale en linguistique, l’hypothèse d’une monogenèse des langues contemporaines semble prédominante dans la communauté scientifique concernée. Toutes les langues parlées aujourd’hui seraient les descendantes d’une langue ancestrale, qui aurait été parlée par nos ancêtres directs il y a plusieurs dizaines de milliers d’années. Nous pensons que cette hypothèse doit être analysée en détail, et que certaines conceptions sont parfois erronées à cause d’une approche trop superficielle du problème.

Un premier argument est celui de la plus faible probabilité d’émergence en deux sites si la probabilité d’émergence en un site est faible. Nous avons déjà souligné que cet argument n’est valable que si la probabilité d’émergence en un site est faible, et qu’il ne tient plus dès qu’elle dépasse un certain seuil fonction du nombre de sites concernés.

Un second point à souligner est qu’il ne faut pas confondre le concept de monogenèse des langues avec celui d’une origine commune de l’ensemble des langues contemporaines. En effet, si le premier concept se rapporte à un mode d’apparition (selon le concept de *genèse*), le second prend en compte des phénomènes ultérieurs à celui de l’émergence.

Cette différence importante est illustrée par la figure 4.19, qui montre comment l’ensemble des langues actuelles pourraient descendre d’une unique langue mère, alors même qu’une polygenèse serait à l’origine des langues du monde. L’extinction d’une partie des familles de langues apparues de façon indépendante masque le phénomène de polygenèse, et peut laisser à penser que l’existence d’une unique langue mère à l’origine des langues actuelles implique un mode d’émergence monogénétique.

L’extinction des langues n’est pas un phénomène rare, et de très nombreuses langues disparaissent aujourd’hui. Daniel Nettle, en reprenant le modèle d’équilibres ponctués de Dixon [Dixon, 1997], parle ainsi par exemple d’une ponctuation Néolithique, liée au développement de l’agriculture. Lors de cette ponctuation, un grand nombre de langues du Paléolithique se seraient éteintes [Nettle, 1999b] (p. 103-105). L’expansion d’une langue au détriment des autres peut correspondre à un avantage culturel, économique ou militaire d’une certaine population. Des phénomènes d’assimilation, de mélange, d’extinction, peuvent alors se produire au cours des contacts entre populations (voir l’étude de [Marsico et al., 2000] au chapitre 3).

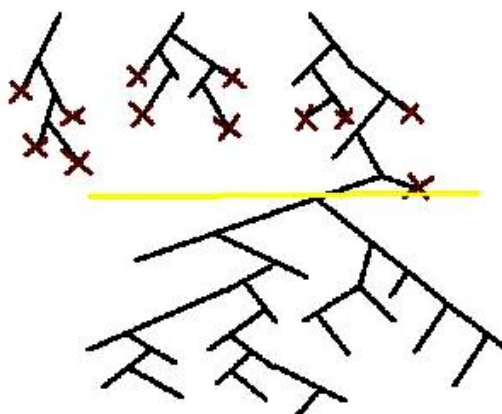


FIG. 4.19 – Scénario d’émergence des langues illustrant une polygénèse **et** une origine unique des langues actuelles

Si l’on écarte pour un instant la question de la monogénèse ou de la polygénèse des langues pour se centrer sur la question de la langue mère, un biais de la linguistique historique est que le procédé même de reconstruction pointe vers une unique langue originelle, comme tend à le montrer la réduction du nombre de familles linguistiques et la reconstruction de proto-langues comme le Proto-Indo-Européen ou le Nostratique. Il faut souligner ici que le moindre nombre de langues reconstruites par rapport aux langues qui servent à la reconstruction est une conséquence du procédé mise en oeuvre, et ne reflète pas nécessairement la réalité. Comme le rappelle Sylvain Auroux en parlant des mots reconstruits :

“On donne à ces éléments reconstruits le nom de « racine », sans qu’il soit nécessaire de penser que ces racines sont autre chose qu’un terme abstrait de comparaison qui mesure les ressemblances.” [Auroux and Mayet, 2001] (p. 13)

Les proto-mots sont avant tout des abstractions qui condensent de façon particulière les structures des mots de langues apparentées. Bien sûr, la réalité de proto-langues comme l’Indo-Européen peut être renforcée par des données archéologiques, génétiques, anthropologiques etc., mais la reconstruction pure, en particulier pour des époques lointaines, sous-estime peut-être la diversité des langues. Comme nous l’avons souligné au chapitre 1, il est possible qu’un concept comme l’Indo-Européen ou le Nostratique regroupe en fait de nombreuses langues, mais que la diversité soit masquée par le processus de reconstruction. Une telle langue reconstruite a pu en réalité être une multitude de langues ou de dialectes différents. Rappelons ici que la variation et les différences entre idiolectes sont inhérentes à toute activité linguistique, et que les considérations sur la diversité linguistique réelle ne peuvent négliger la prise en compte de la paléo-démographie et des structures sociales de la préhistoire.

En conclusion, si une origine commune pour les langues contemporaines reste envisageable, la question ne peut être abordée de façon superficielle. Comme déjà souligné plus haut, nous défendons l’hypothèse que l’apparition du langage et des langues est un événement ancien, précédant l’émergence de notre espèce. Toutefois, il paraît vraisemblable d’envisager l’apparition

d'un certain nombre de stratégies linguistiques en conséquence de l'apparition de notre espèce, grâce aux nouvelles capacités cognitives et physiologiques qui l'ont accompagnée. Si nous nous pencherons sur la nature de ces capacités et des stratégies linguistiques "modernes" dans la dernière section de ce chapitre et surtout au chapitre 5, il nous faut auparavant revenir sur un aspect du modèle d'émergence et de diffusion.

4.4.2 Corrélation entre changements de la dimension naturelle et changements de la dimension structurale du système langage

Nous avons vu lors de l'analyse des résultats du modèle d'émergence et de diffusion d'innovations que les probabilités de monogenèse ou de polygenèse d'une innovation dépendaient de certains facteurs comme la corrélation entre l'émergence d'une nouvelle espèce et celle de l'innovation considérée. En effet, le modèle suppose que la probabilité d'émergence est constante au cours de l'intervalle de temps considéré, ce qui n'est pas le cas si la corrélation précédente est vraiment présente.

Afin de répondre à cette question, nous allons introduire maintenant la notion de potentiel cognitif, d'abord d'une façon générale, puis appliquée aux stratégies linguistiques.

Notion de potentiel cognitif

*Ecrire est bien, penser est mieux ;
Il est bon d'être habile, il est mieux d'être patient.*
Siddharta, Hermann Hesse.

La notion de potentiel cognitif repose sur l'hypothèse que certaines capacités cognitives ne peuvent être exploitées sous certaines formes qu'un certain temps après leur développement au niveau cérébral. Dit autrement, un animal peut-être capable de certaines actions ou comportements qu'il ne met pas à profit. Une simple raison peut-être que ces comportements ne lui sont pas utiles, et qu'ils ne se développent donc pas chez lui. On repensera encore une fois à la capacité des chimpanzés d'utiliser des signes gestuels, et même de les transmettre d'une génération à une autre.

Un nouveau **potentiel cognitif** apparaît avec une modification de la "circuiterie" neurale. Le terme potentiel signifie qu'il peut exister un certain laps de temps avant la mise à profit de cette modification pour une fonction particulière. Ceci semble poser problème dans un cadre strictement darwinien où une variation conduisant à un changement n'est sélectionnée que si elle est fonctionnelle et avantageuse pour l'individu. Dit autrement, *la fonction crée l'organe* (ou plutôt ici le mécanisme cognitif) et non pas l'inverse : si des systèmes dédiés au traitement du langage existent bien, alors c'est qu'une pression de sélection a existé en la faveur de ce dernier, et il est difficile d'envisager l'existence biologique de la faculté sans son utilisation fonctionnelle. Néanmoins, un mécanisme ou une modification physiologique peuvent tout à fait apparaître pour une certaine fonction, et être mis à profit par la suite pour une seconde fonction. Il s'agit du concept d'**exaptation**. Rappelons que de nombreuses innovations biologiques sont en fait des exaptations.

Potentiel cognitif et potentiel culturel

Nous pouvons dresser un parallèle entre la notion de potentiel cognitif et celle de **potentiel culturel**, qui concernerait l'apparition d'innovations culturelles de façon générale. Si l'on considère le cas du développement de l'agriculture dans notre espèce, il est raisonnable de penser que cette possibilité était effective dès la spéciation. Cependant, son invention est tardive par rapport à l'émergence de notre espèce, et certaines populations humaines ne l'ont d'ailleurs jamais développée, même si elles pouvaient le faire. Expliquer pourquoi l'agriculture est apparue aussi tardivement reste un problème difficile. Une première réponse serait que la chasse et la cueillette constituaient des modes d'existence plus aisés. Mais alors pourquoi y aurait-il eu une transition au Néolithique? Une hypothèse est que les plus grandes densités d'individus autour des lieux de culte rendait nécessaire de trouver de la nourriture en plus grande quantité que ne le permettaient la chasse et la pêche.

L'écriture est aussi une apparition très tardive dans l'histoire humaine, même si les capacités cognitives étaient présentes de longue date. Une hypothèse "commerciale" est ici que les documents écrits ont facilité la tenue de comptes "bancaires" entre individus, comme l'attestent les premiers écrits Sumériens.

Ainsi, certains potentiels ne viennent à remplir certaines fonctions spécifiques que par le biais d'événements indirects ou contingents. Nous pensons que cela fut le cas pour les stratégies linguistiques.

Modularité et culture

Nous souhaitons mentionner ici rapidement les propositions de Dan Sperber relatives à la diversité des cultures, à leur stabilité et à l'émergence tardive de la culture (au sens générique du terme) au cours du Paléolithique Supérieur, des dizaines de milliers d'années après l'émergence de notre espèce [Dan Sperber, *Modularité et Culture*, Symposium annuel du Collège de France - « Gènes et Culture » Enveloppe génétique et variabilité culturelle - 15-16 Octobre 2002]. Ces propositions nous semblent particulièrement pertinentes pour expliquer la possible décorrélation entre l'émergence d'une capacité particulière et l'apparition d'innovations culturelles.

Sperber reprend la notion de modularité de l'esprit initiée par Fodor, en supposant l'existence d'un ensemble de modules cognitifs, non nécessairement innés, qui permettent des tâches variées comme la lecture, le décodage des énoncés, l'appréhension des pensées d'autrui, la reconnaissance des visages. Chaque module possède un domaine propre, qui correspond à l'ensemble des inputs qu'il a pour fonction de traiter, mais également un domaine effectif, qui regroupe l'ensemble des inputs qu'il peut traiter, c'est à dire qui satisfont aux conditions du traitement, même s'ils ne répondent pas spécifiquement à la fonction première du système. Le domaine propre du module de reconnaissance des visages est ainsi constitué chez l'homme des visages des individus, mais ce module peut également traiter d'autres informations sensorielles, comme des images de visages, des sculptures. . .

Sperber explique l'apparition de la culture et sa stabilité par une invasion des domaines effectifs des modules cognitifs par de l'information culturelle. Le maquillage, le portrait, les masques sont des éléments culturels qui auraient ainsi progressivement pris place dans le domaine effectif du module de reconnaissance des visages, créant ainsi un domaine culturel pour ce module.

Il découle, dès lors que les éléments culturels n'appartiennent pas au domaine propre d'un module, qu'ils peuvent apparaître de façon décorrélée de l'émergence de celui-ci. Les modules ne

rendent pas la culture nécessaire, mais ils la rendent possible. En outre, la variabilité culturelle est rendue possible par le fait que les éléments du domaine culturel n'ont pour seule contrainte que l'adéquation au traitement réalisé par le module (c'est à dire qu'ils appartiennent au domaine effectif). Par exemple, si le maquillage est essentiellement féminin dans les sociétés occidentales, il est principalement masculin dans les tribus Masai.

A partir de ces remarques, nous pouvons maintenant considérer la situation du langage et des stratégies linguistiques.

Potentiel cognitif, faculté de langage et stratégies linguistiques

L'hypothèse qui vient à l'esprit pour le langage à la suite des derniers paragraphes est que celui-ci aurait pu mettre à profit des structures cognitives apparues pour des fonctions différentes. Dans le scénario que nous avons proposé à la fin de la partie 1, notre idée est une co-évolution entre langage et cognition générale en réponse à la complexification des structures sociales humaines. Nous pensons qu'il est possible que des capacités cognitives fonctionnelles dans un environnement social aient émergé sans lien initial avec le langage, même si celui-ci favorise la complexification sociale par un phénomène de renforcement. Elles auraient ensuite pu être mises à profit pour le langage, avec un certain délai temporel. Parmi ces capacités, nous pouvons citer des fonctions cognitives comme la mémoire de travail, la boucle phonologique, les capacités de symbolisation et de planification, qui ouvrent chacune la voie à de nouvelles possibilités en termes linguistiques.

Il est bien connu qu'il n'existe pas de corrélation directe entre les structures physiologiques cérébrales et une stratégie linguistique spécifique, pas plus qu'entre les capacités ou fonctions cognitives humaines et une stratégie spécifique. Ces deux faits sont démontrés par le fait qu'un enfant, quelle que soit son origine et la ou les langues de ses parents biologiques, peut apprendre n'importe laquelle des langues du monde.

S'il y a eu une évolution de l'appareil cognitif permettant l'émergence du langage, elle a conduit à la capacité d'apprendre une langue et des stratégies linguistiques, et non à les produire directement. Il existe donc ici une décorrélation entre la capacité souvent appelée faculté de langage et une stratégie linguistique particulière. Nous retrouvons ainsi sous une forme un peu différente les domaines propre et effectif des modules présentés par Sperber.

Cette différenciation nous paraît essentielle et nous permet d'appliquer pleinement la notion de potentiel cognitif aux différentes stratégies linguistiques (d'une façon d'ailleurs qualitativement différente de celle dont la notion s'applique à une capacité plus générique comme le langage). Si l'évolution a pu favoriser le développement de capacités cognitives permettant un traitement efficace du langage, cette évolution ne s'est pas faite en direction de stratégies spécifiques, mais en direction d'une capacité à apprendre des stratégies linguistiques (obéissant à certaines contraintes physiologiques et cognitives), que nous ancrons dans le développement de capacités cognitives générales. Dès lors, il ne semble pas indispensable d'envisager une émergence des différentes stratégies linguistiques dès l'apparition des changements qui les rendent possibles. En outre, si l'on envisage une monogenèse du langage, la langue primitive ne pourrait ni n'aurait intérêt fonctionnellement à contenir l'ensemble des stratégies linguistiques possibles. Une partie d'entre elles seraient donc nécessairement apparues plus tardivement, et la diversification des langues se serait alors faite par apparition de nouvelles stratégies qui seraient venues modifier les formes initiales.

Axes syntagmatique et paradigmatic de l'espace des possibles linguistiques

Nous pouvons prolonger l'argumentation précédente dans le cadre de la structure de l'espace des possibles linguistiques. Rappelons que nous avons décomposé les structures des états de celui-ci selon deux axes syntagmatique et paradigmatic. Le premier est un axe d'association de composants de la structure, tandis que le second correspond aux différentes possibilités pour remplir les "slots" de l'axe syntagmatique.

L'évolution du langage et des langues peut être vue de la façon suivante : le développement de nouvelles capacités cognitives ou physiologiques conduit parfois à des transformations sur l'axe syntagmatique d'une structure, en modifiant ou en ajoutant des composantes qui enrichissent cette structure ou la transforment en une nouvelle structure différente. Lorsqu'une composante est modifiée, ou qu'une nouvelle fait son apparition, un nouveau champ paradigmatic apparaît ou un champ pré-existant est transformé et voit son inventaire paradigmatic enrichi. Ces changements selon l'axe paradigmatic ne sont pas nécessairement corrélés à la transformation qui s'opère sur la dimension syntagmatique. Si les associations (syntagmatiques) sont nécessaire pour composer les structures, il n'en est pas de même pour les distinctions paradigmatic. Les stratégies linguistiques précédentes correspondent à des possibilités paradigmatic, tandis que l'émergence de nouvelles fonctions cognitives ou physiologiques est responsable des transformations syntagmatiques.

4.4.3 Polygenèse structurale et diffusion des stratégies linguistiques

Nous souhaitons pour finir cette section revenir sur la polygenèse et la diffusion des stratégies linguistiques, en tentant de prendre en compte le caractère structuré de tout système linguistique.

Notre proposition est que les différentes stratégies linguistiques ont pu apparaître de façon relativement indépendante et se diffuser dans les populations humaines. Nous pensons en outre que l'émergence des stratégies linguistiques est décorrélée dans le temps de l'émergence des facultés cognitives ou physiologiques qui les sous-tendent, ce qui renforce la possibilité de polygenèse dans le contexte démographiques de petits groupes de population aux contacts très peu fréquents. En particulier, des innovations apparues à la suite d'accroissements de population postérieurs à l'émergence de l'espèce (scénario *weak garden of Eden* en ce qui concerne *Homo sapiens*) ont une plus forte probabilité d'émerger par polygenèse.

Nous pouvons citer ici un exemple intéressant, mentionné par Merritt Ruhlen, de stratégie linguistique qui semble apparue de façon claire par polygenèse, et qui n'est en outre pas apparue dans toutes les langues du monde. Ruhlen oppose une monogenèse de l'utilisation des chiffres un et deux (dont il donne les formes dans l'hypothétique langue mère originelle), à une polygenèse de l'utilisation du nombre 3. En effet, dans ce dernier cas, il ne semble pas exister de racine commune pour ce nombre dont l'utilisation aurait débuté en plusieurs endroits de façon indépendante. En outre, il existe des langues où le nombre 3 n'existe pas, et où le système de numération repose sur les concepts "1", "2" et "plus de 2". [Merritt Ruhlen, Colloque sur l'origine des langues, 26-27 Septembre 2002, Collège de France, Paris].

Nous pensons que si certaines stratégies sont la possession de notre unique espèce *Homo sapiens*, d'autres, qui étaient possibles vis à vis des capacités cognitives, des contraintes physiologiques et interactionnelles des populations plus anciennes, existaient déjà auparavant. Le

grand nombre de stratégies selon les différents axes paradigmatiques des structures linguistiques conduit à un meilleur respect des probabilités des courbes théoriques : contrairement à une faculté de langage monolithique dont il est impossible de prévoir le mode d'émergence à partir de son existence actuelle, il est ainsi très probable que sur l'ensemble des stratégies, une partie soit apparue par polygenèse, et une autre par monogenèse. En outre, comme l'exemple du chiffre 3 le démontre, nous pouvons observer une absence d'émergence de certaines stratégies dans certaines populations, à moins d'envisager la disparition de stratégies autrefois universellement distribuées dans ces dernières populations. Ce dernier point reflète la compétition et plus généralement les interactions qui peuvent exister entre les stratégies linguistiques.

Ce sont ces interactions qu'il est nécessaire de prendre en compte si l'on veut lever le flou sur la notion d'émergence *relativement indépendante* des stratégies linguistiques que nous avons utilisée jusqu'à présent. L'idée que nous allons maintenant investiguer est que si des contraintes de la dimension naturelle ont été à l'œuvre lors de l'émergence des stratégies linguistiques, des contraintes structurelles ont également joué un rôle important.

Polygenèse sous contraintes des stratégies linguistiques

Nous avons mentionné que l'agriculture et l'écriture étaient apparues dans des contextes particuliers, probablement avec des demandes "extérieures" pour satisfaire des besoins en nourriture ou en "outils" pour le commerce. De la même façon, nous pensons que les stratégies linguistiques sont apparues dans des contextes particuliers, mais cette fois linguistiques : les stratégies linguistiques des langues qui les ont accueillies. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, les stratégies linguistiques qui forment une langue interagissent entre elles et forment une *structure*. Des pressions s'exercent pour rendre le système "cohérent" vis à vis d'un ensemble de contraintes internes et externes. Dans un contexte particulier, c'est à dire une structure de stratégies linguistiques particulière, toutes les stratégies linguistiques n'ont pas la même chance d'émerger, car certaines s'accordent mieux à la structure pré-existante que d'autres.

Il est probable, à la vue de la diversité des langues actuelles, que le système linguistique ne soit pas fortement contraint, et que pour chaque situation, c'est à dire chaque langue, différentes possibilités d'évolution s'offrent en permanence. Les événements extra-linguistiques viennent sélectionner de façon quasi aléatoire (à grande échelle) quels innovations ou changements apparaissent et se produisent effectivement dans les langues. Toutefois, à la manière dont les espèces évoluent selon la théorie de Maturana et Mpodozis (voir chapitre 2), nous pensons que l'évolution des langues se produit néanmoins selon des changements acceptés par les structures qui les composent. Certaines stratégies linguistiques n'ont pas pu apparaître dans des contextes qui leur étaient défavorables du point de vue de la cohérence du système.

Langue originelle et parcours de l'espace des possibles linguistiques

Nous souhaitons pousser plus loin l'idée précédente, pour l'appliquer à l'hypothèse d'un unique ensemble de stratégies linguistiques à l'origine de l'ensemble des langues actuelles. Cette hypothèse est une variation sur le thème de la langue mère. La question est la suivante : l'ensemble des stratégies linguistiques des langues modernes dérive-t-il dans son intégralité d'un unique set de stratégies présent peu de temps après l'émergence de notre espèce, ou ses éléments sont-ils apparus selon un scénario polygénétique ?

Tout d'abord, si l'on suppose qu'une part importante de la vaste diversité linguistique actuelle

repose sur des stratégies essentiellement modernes, alors l'hypothèse que toutes ces composantes aient pu émerger après un stade initial très restreint est improbable : le grand nombre de composantes induit de façon probabiliste une polygenèse d'une partie même faible de ces composantes à l'origine et non pas seulement à des stades ultérieurs. Si au contraire, la différence qualitative et quantitative en terme de diversité des langues modernes par rapport aux langues ancestrales est faible, la probabilité est plus forte qu'un unique ensemble de stratégie moderne ait pu conduire à la diversité actuelle.

Un deuxième point important est qu'une diversification à partir d'un unique ensemble de stratégies initiales prend un certain temps. En particulier, atteindre la diversité des formes actuelles ne s'est très vraisemblablement pas produit en quelques années. Il est pertinent de se demander non seulement si ce temps a été important ou non, mais surtout si une telle diversification était possible.

Comme nous l'avons souligné dans la partie précédente, les stratégies linguistiques émergent nécessairement dans l'ensemble des cadres structuraux formés par les langues qui peuvent les accueillir. La différence entre une polygenèse non contrainte et une polygenèse contrainte par des phénomènes structuraux va être un ralentissement de la diversification linguistique dans le second cas. Il est cependant difficile d'estimer la vitesse de cette diversification.

Il est également possible de mettre en cause la *possibilité* du passage d'une langue unique originelle à l'ensemble des langues modernes. En effet, il est possible que certaines configurations linguistiques initiales ne puissent pas engendrer la diversité actuelle, ou dans des temps plus longs que celui qui s'est écoulé entre l'émergence de notre espèce et aujourd'hui.

Afin de mieux comprendre ce point, nous pouvons recourir une nouvelle fois à l'analogie de la boule parcourant un paysage vallonné, et qui cherche à minimiser son énergie potentielle, c'est à dire à se stabiliser à l'altitude la plus faible possible. Nous avons détaillé la grande diversité des paysages possibles, ainsi que l'existence de minima locaux et de barrières (des "collines") plus ou moins difficile à franchir. Imaginons un paysage séparé par une grande chaîne de montagnes. Si cette chaîne est assez haute, une boule placée initialement dans une des deux régions nées de cette séparation ne parviendra jamais à gagner l'autre région.

En replaçant cette situation dans un cadre linguistique, le jeu des contraintes pesant sur un système linguistique impose certaines directions (préférentielles ou forcées) pour les évolutions de ce système. Selon la configuration initiale du système et la topographie du paysage énergétique (c'est à dire la structuration de l'espace des possibles), un accroissement de la diversité pourra éventuellement être restreint à un domaine limité de l'espace des possibles : si le paysage est par exemple coupé en deux par une barrière énergétique très importante, comme dans l'exemple de la figure 4.20, les systèmes linguistiques ultérieurs pourront occuper la région de l'espace où se trouvait le système initial, mais jamais la région située de l'autre côté de la barrière. En comparaison, deux systèmes initiaux situés de part et d'autre de la barrière pourront engendrer une diversité qui couvrira l'ensemble du paysage énergétique.

Plus un système linguistique met en jeu de stratégies linguistiques, plus les possibilités d'interaction entre ces stratégies sont nombreuses, et plus les contraintes qui en découlent risquent de peser sur l'évolution du système.

Une polygenèse des stratégies linguistiques, sans langue initiale déjà fortement contrainte,

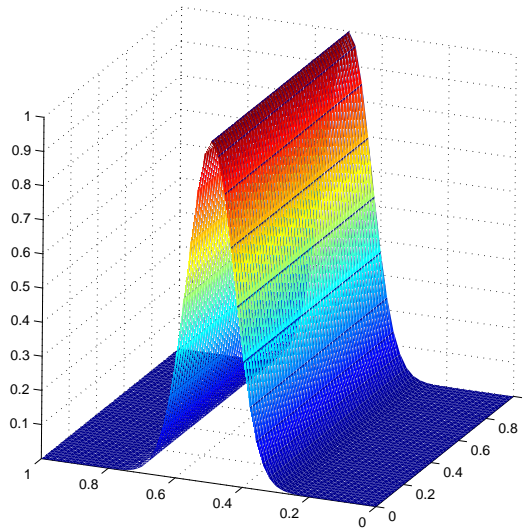


FIG. 4.20 – Un paysage énergétique séparé en deux régions par une barrière énergétique

augmente les possibilités de diversification des langues et d'émergence de stratégies. L'apparition progressive des contraintes est moins pesante sur le système linguistique global (composé de l'ensemble des langues), et permet à celui-ci d'explorer plus facilement l'espace des possibles linguistiques (possibles en termes de combinaisons de stratégies linguistiques).

Pression fonctionnelle sur l'émergence des stratégies linguistiques

Certains items linguistiques sont plus nécessaires que d'autres pour une communication performante (tout en gardant en mémoire les nombreuses contraintes des parties précédentes). Une pression engendrée par les besoins de communication a donc pu induire l'apparition précoce de certains items linguistiques.

Le cas des “patterns” des pronoms personnels est un cas intéressant. Il semble naturel de juger très utile l'existence de mots permettant de référer à soi-même ou à d'autres personnes de son entourage (je, tu, il...). L'utilisation de pronoms personnels est donc probablement une invention ancienne. En outre, la place centrale de ces éléments dans la communication les rend très stables et a peut-être permis la préservation de leur forme originelle jusqu'à l'époque actuelle [Merritt Ruhlen, Workshop ACE 3, City University of Hong Kong, Hong Kong, Mai 2002].

La recherche de la langue originelle s'axe souvent sur des éléments typologiques très stables, comme les pronoms personnels, et les recherches de Joseph Greenberg ou Merritt Ruhlen se sont appuyées sur ces derniers pour cette raison. La faible diversité des schémas de distribution de ces pronoms à travers les grandes familles linguistiques est une des preuves de cette stabilité (voir chapitre 5 pour plus de données sur la famille Indo-Pacifique de Greenberg).

Il est probable que certaines stratégies linguistiques particulières aient été à l'oeuvre dans les premières formes de communication de nos ancêtres directs. Ces formes, si elles étaient très stables, ont été peu soumises au changement, et les schémas de distribution actuels pointent

justement vers leur existence dans une langue “initiale”. Les mots particulièrement employés dans les interactions quotidiennes des hommes (les parties du corps, des éléments de l’environnement comme le soleil, la lune, des termes de chasse. . .) peuvent ainsi avoir émergés il y a fort longtemps, et leur grande stabilité les avoir préservés d’une forte variation au cours du temps.

Ainsi, la recherche d’éléments de la langue originelle, même si elle peut être menée à bien, ce que beaucoup d’ailleurs contestent, ne permet pas de conclure à la complexité de cette langue, ou à son statut de langue mère de toutes les langues actuelles.

4.5 Evolution des diversités et complexités linguistiques

Nous avons jusqu’à présent posé les bases d’un modèle d’émergence du langage et des langues. Munis de notions sur les conditions d’apparition des stratégies linguistiques, il nous reste à envisager la question de l’évolution des différentes diversités et complexités linguistiques que nous avons définies dans la première section de ce chapitre. Pour ce faire, nous tenterons de répondre au moins partiellement aux questions qui ont été soulevées à propos de ces notions.

Après avoir entamé notre réflexion par un bref passage sur les tendances évolutives en linguistiques, nous examinons l’évolution de la diversité et de la complexité des états possibles, avant de nous pencher sur les liens que celles-ci ont entretenus avec la diversité et la complexité des états réels. Nous concluons alors en reprenant l’idée de mur de Gould introduite au chapitre 2 pour la diversité biologique, afin de l’appliquer à la diversité et la complexité des structures linguistiques.

4.5.1 Evolution de la diversité et de la complexité des états possibles

Dans cette première partie, nous allons nous intéresser au développement des états possibles, sans nous intéresser à leur utilisation réelle dans les langues de la préhistoire. Nous aborderons le problème de leur complexité dans une première phase, avant d’aborder la question de la diversité.

Pour rendre compte du développement de la complexité des états possibles, il convient surtout de faire rentrer en jeu des arguments relatifs au développement des capacités cognitives et physiologiques. Ceci sera l’objet des prochains paragraphes, où nous recourrons également à une distinction “pédagogique” entre deux périodes d’évolution du langage, que nous détaillons à présent.

Deux étapes dans l’évolution du langage

Plusieurs scénarios de l’évolution du langage mettent l’accent sur un scénario en deux étapes. La transition la plus courante est celle entre une phase agrammaticale (le proto-langage) et une phase syntaxique. Ce point de vue est comme nous l’avons déjà dit soutenu entre autres par le créoliste Derek Bickerton, qui pense qu’une mutation génétique a permis l’apparition soudaine de la capacité syntaxique [Bickerton, 1990] (chapitre 7).

Sans fixer leur attention uniquement sur la syntaxe, Jean-Marie Hombert et Charles Li proposent deux étapes importantes pour l’évolution du langage et des langues [Hombert and Li, 2000] :

- une première phase, la plus ancienne, où des améliorations physiologiques et cognitives viennent progressivement améliorer la qualité du langage humain en tant que vecteur de communication. Une pression de sélection existe en fait pour sélectionner les formes de

communication les plus performantes, et ainsi les évolutions cognitives et physiologiques qui les rendent possibles : meilleur contrôle des articulateurs ou de la respiration, amélioration des fonctions de perception et des traitements cognitifs langagiers. . . ;

- une seconde phase, où le langage est devenu suffisamment sophistiqué et performant pour que la pression de sélection en direction de formes linguistiques plus sophistiquées devienne très faible.

Bien sûr, la distinction en deux étapes bien définies ne doit pas être exagérée, et une transition graduelle entre les deux stades est possible. Elle dépend bien sûr de la nature des modifications cognitives et physiologiques chez nos ancêtres.

Il est nécessaire d'apporter une explication à l'existence d'une force de sélection en direction de capacités cognitives et d'un langage plus sophistiqués. Nous pensons comme déjà énoncé que cette pression est due en fait à un renforcement de l'importance du langage dans les interactions sociales par un phénomène auto-catalytique. L'organisation sociale des individus se complexifiant de plus en plus, des capacités cognitives et linguistiques performantes sont de plus en plus utiles pour permettre la préservation et le succès de cette organisation. En outre, l'adaptation à un milieu de type savane, puis à des milieux écologiques différents et variés rend nécessaire une plus grande adaptabilité des individus à un environnement changeant. La situation est à comparer à celle de primates qui conservent une niche écologique stable (type forêt équatoriale).

Après la phase de développement des capacités linguistiques, Hombert et Li supposent qu'un palier est atteint où les améliorations deviennent superflues. Dans ce second stade, l'absence de pression de sélection rend beaucoup plus significatifs les phénomènes auto-organisés à l'intérieur de la structure linguistique et sous l'influence des phénomènes sociaux (voir chapitre 2).

Evolution de la complexité des états possibles

Nous pensons que la complexité moyenne des états possibles a augmenté tout au long de la première phase du scénario précédent. Les évolutions physiologiques et cognitifs ont intuitivement rendu possible des items linguistiques de plus en plus complexes, tandis que les items plus simples d'origine plus ancienne pouvaient être préservés dans le système. Rappelons en effet que nous traitons ici de l'espace des possibles : si des transformations physiologiques et cognitives rendent de nouvelles structures accessibles, elles ne rendent pas nécessairement impossibles et caduques les structures antérieures et celles-ci demeurent dès lors dans l'espace des possibles. Nous voyons ici qu'il est important de bien juger les transformations évolutives chez l'homme. Si l'on considère l'exemple de l'olfaction, ce sens a vu ses performantes décroître le long de notre lignée évolutive. On peut imaginer de façon similaire qu'une dégradation de l'audition au cours de la phylogénie humaine rendrait le répertoire de sons perceptibles moins riche et moins complexe.

Toutefois, il nous semble que les évolutions cognitives et physiologiques n'ont pas conduit à un remplacement des items linguistiques, mais plutôt à un ajout progressif de nouvelles stratégies. Nous allons tenter d'étoffer ce point dans les paragraphes suivants, et nous verrons en particulier qu'il est possible de s'appuyer sur la notion de complexité *descriptive*, comme nous l'avons mentionné plus haut, pour envisager l'évolution des items linguistiques.

Evolutions physiologiques et cognitives et évolution de la complexité des items linguistiques

Evolution de la production et de la perception. Le développement des capacités de production et de perception a probablement joué un rôle dans l'accroissement de la complexité moyenne des productions.

Tout d'abord, une meilleure maîtrise des articulateurs permet la prononciation d'une plus large et riche palette de sons. Un triangle vocalique plus étendu permet d'envisager un ensemble plus large de voyelles, la maîtrise de traits comme la nasalisation, le trait fricatif ou le trait rétroflexe etc., permettent un jeu de consonnes beaucoup plus sophistiqué. Le contrôle fin de la langue permet par exemple une plus grande maîtrise du continuum antéro-postérieur du lieu d'articulation et du degré d'aperture. De même, un meilleur contrôle du flux respiratoire permet de mieux gérer les pressions orale et sous-glottique.

Studdert-Kennedy mentionne également l'évolution du système de production par l'émergence d'un contrôle indépendant des différents articulateurs, qui permet d'atteindre une grande rapidité de production [Studdert-Kennedy, 1998]. Cette indépendance du contrôle conduit également à plus de degrés de liberté, qui là encore vont conduire à une plus grande complexité des sons produits et perçus.

La perception doit bien sûr suivre la production, afin que les sons qu'il est possible de produire soient effectivement utilisables pour la communication. Il semble cependant que l'évolution de la perception humaine soit encore mal connue, surtout si on la compare aux capacités en production (comme mentionné au chapitre 1, descente du larynx, amélioration du contrôle de la respiration et des articulateurs...). Notons ici l'existence de la théorie motrice de la parole, qui postule que la perception est basée sur des schémas de production.

En terme de complexité descriptive, plus il est difficile de décrire un objet, plus celui-ci peut être jugé complexe. Dans le cas des exemples précédents, un plus grand nombre de traits que l'on peut *utiliser de façon indépendante* conduit à des descriptions plus riches des sons (en terme de présence ou d'absence des traits), et donc à une plus grande complexité de ceux-ci. La figure 4.21 offre une vision des traits des segments des langues du monde, et est extraite de la présentation d'un travail auquel nous avons participé sur la complexité des systèmes phonologiques sur la base des traits qui les composent [Marsico et al., 2002].

La possibilité de produire de nouveaux sons plus complexes par le biais d'une indépendance des traits que l'on peut combiner librement pour produire des segments ne rend pas impossible la production de sons antérieurs à l'amélioration du contrôle articulo-phonatoire et qui combinaient alors différents traits *de façon contrainte*. Ceux-ci se trouvent en fait simplement incorporés dans les nouveaux inventaires définis sur la base de l'ensemble des traits que l'on peut combiner. On retrouve ces différents traits dans les langues du monde actuelles; la plupart recourent en effet à des segments "complexes" combinant différents traits comme la nasalité, le trait fricatif, celui d'aspiration, de palatalisation... (par exemple une voyelle haute périphérique d'avant longue et pharyngalisée), mais comportent également dans leur inventaire des sons plus élémentaires qui ne contiennent pas les traits précédents (en contraste avec la première voyelle, une voyelle haute périphérique d'avant sans les traits de longueur et de pharyngalité).

Développement des capacités cognitives. C'est au niveau cognitif que nous pouvons envisager le plus grand nombre de transformations susceptibles d'accroître la complexité des items linguistiques que l'homme peut manipuler.

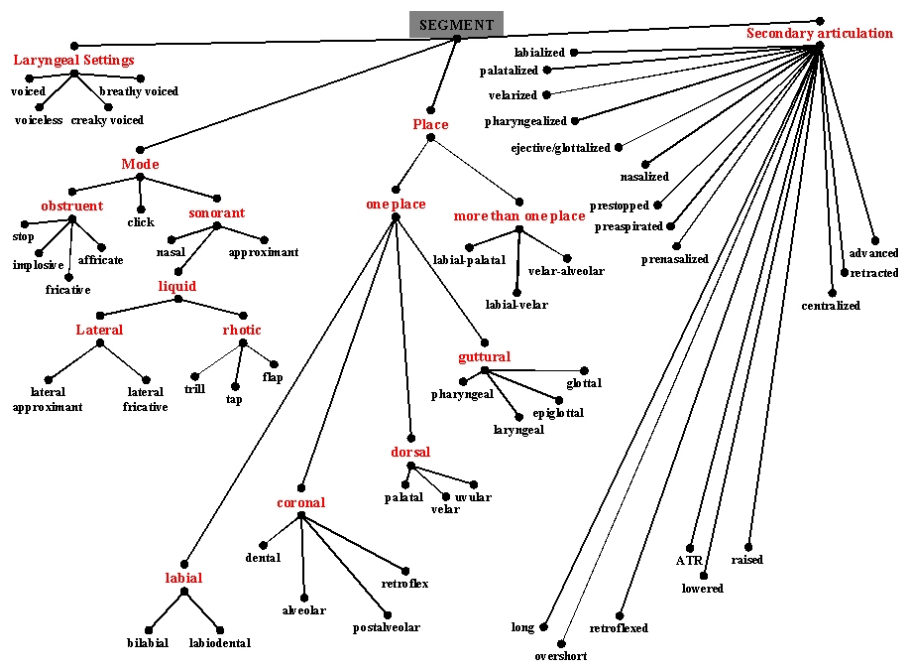


FIG. 4.21 – Traits des segments des langues du monde [Marsico & al., 2002]

Notre idée est que toute **“intégration mentale”** affaiblit les liens directs entre la forme sonore et la représentation cognitive associée. Dit autrement, plus le traitement de l’information linguistique fait intervenir de connaissances externes dans l’analyse de la forme sonore, plus le lien entre les deux est faible. La conséquence en terme de complexité descriptive est immédiate : plus une forme sonore repose sur des éléments externes pour être interprétée, plus sa description est coûteuse, et donc plus elle est complexe. Nous pouvons citer plusieurs exemples de capacité cognitives qui contribuent selon nous à l’affaiblissement du lien précédent.

L’existence de relations internes entre les items linguistiques (voir les travaux de Deacon au chapitre 1), permet de faire reposer sur ces interactions une partie du travail d’interprétation linguistique, et enlève une partie du poids du lien direct entre un référent et son référent. Lors du passage des icônes aux index, un premier pas dans le sens d’une plus grande liberté est franchi car le lien entre objet et signal de communication ne repose plus que sur une contiguïté physique ou temporelle. Il devient possible de “piocher” dans l’une des contiguïtés d’un objet du monde pour le représenter dans le système de communication. Lors du passage aux symboles, le rapport entre signifiant et signifié devient arbitraire et le résultat d’une convention. Ici, le lien disparaît totalement, et les locuteurs peuvent utiliser tel ou tel mot pour représenter un concept, voire plusieurs mots.

Second exemple, l’émergence d’un système phonologique purement mental et de lois permettant le passage des représentations de ce système aux formes sonores est un très bon exemple d’augmentation des degrés de liberté et de la complexité descriptive par une mentalisation du mécanisme communicationnel ([Studdert-Kennedy, 2002] parle de “retreat into cognition”, une retraite qu’il juge difficile à expliquer sur un plan évolutif) : si le fonctionnement cognitif du

système phonologique mental se base bien sur des contrastes entre phonèmes (confère la définition linguistique des phonèmes par paires minimales), alors la variabilité au niveau acoustique peut-être plus importante. En effet, l'utilisation d'informations "internes", comme les liens qu'entretiennent les phonèmes entre eux, permet plus de liberté au niveau phonétique, puisque le lien entre la forme sonore et le phonème est déduite partiellement par les contraintes phonémiques.

Nous pouvons franchir encore un pas et considérer que non seulement le lien entre les items linguistiques mais aussi que la transformation de l'usage de la langue vis à vis des représentations mentales a augmenté la complexité des systèmes linguistiques. Par usage de la langue vis à vis des représentations mentales, nous nous référons à la notion de communication **inférentielle**, telle qu'elle est défendue par exemple par Dan Sperber [Sperber, 1995]. Selon cette position, le langage est très différent d'un code de transmission non référentiel, comme utilisé par exemple en informatique. En effet, dans ce second cas, toute l'information est transmise dans le signal lui-même, et aucune donnée extérieure n'est nécessaire pour l'interprétation de ce message. Si les codes à l'encodage et au décodage sont différents, la transmission de l'information ne peut alors pas se faire.

Dans le cas du langage humain, la situation est extrêmement différente puisque le message est souvent extrêmement contextualisé, et s'appuie sur des informations non-linguistiques pour véhiculer son contenu sémantique. Cette information peut-être présente dans le contexte externe de la communication ou au niveau cognitif des individus, comme l'est par exemple la connaissance partagée. A chaque réception d'un message, un mécanisme inférentiel est déclenché qui permet de mettre en relation données externes et données du message pour l'extraction du sens. Sperber explique que cet effet est "maximal" pour le langage humain, dans le sens où celui-ci ne sert qu'à déclencher (activer) des connaissances dans la mémoire du récepteur. L'exemple suivant permet de bien comprendre la situation [ibid] :

Peter: Do you want to go to the cinema?

Mary: i am tired.

La réponse de Mary ne contient pas l'information qui permet de répondre à la question de Peter, mais une donnée sur l'état de Mary. Peter peut cependant utiliser un mécanisme inférentiel pour comprendre le sens réel du message de Mary : s'il infère que le fait que Mary soit fatiguée est une bonne raison pour ne pas aller au cinéma, alors il comprendra que celle-ci a envoyé l'information sur son état pour qu'il dérive de lui-même la conclusion qu'elle ne souhaite pas y aller. Mary, en n'envoyant pas cette dernière information directement, exprime à la fois son refus et les raisons de celui-ci.

Selon Sperber, un tel mode de communication implique une préséance d'une théorie de l'esprit. Celle-ci serait en effet nécessaire pour que l'allocutaire comprenne les intentions du locuteur lorsqu'il reçoit son message. De même, le locuteur, en anticipant les comportements et les intentions du récepteur, peut adapter son message.

Pour ce dernier exemple, le signal linguistique et les items mis en jeu deviennent plus complexes, car leur signification en contexte est beaucoup plus délicate à définir, puisqu'il faut justement tenir compte de ce dernier. Les pronoms personnels sont un exemple d'items linguistiques complexes à décrire, puisqu'il réfère à un objet extérieur qu'il est nécessaire de connaître pour pouvoir les interpréter.

Encore une fois ici, le développement de certaines capacités cognitives ne rend pas impossible l'utilisation de formes de communication plus simples. Par exemple, même un modèle de communication inférentielle permet l'expression d'énoncés qui requièrent peu ou pas d'inférences. De même, si nous recourons à une communication symbolique, les langues du monde contiennent généralement des éléments comme les onomatopées qui ne mettent pas nécessairement à profit cette capacité de symbolisme.

La conclusion des chapitres précédents est ainsi que la complexité moyenne des items linguistiques s'est accrue au cours de la première phase du scénario de Hombert et Li grâce au développement des capacités physiologiques et cognitives. Ce développement n'a pas supprimé les formes les plus simples, mais a permis le maniement de formes plus complexes, d'où l'augmentation en moyenne.

Nous allons maintenant reprendre les différentes propositions précédentes pour les appliquer non plus à la question de la complexité des états possibles, mais à celle de la diversité de ceux-ci.

Evolutions physiologiques et cognitives et évolution de la diversité des états possibles

L'accroissement de la diversité des états possibles est proche de celle de la complexité de ceux-ci : si comme nous l'avons dit plus haut, le développement des capacités cognitives et physiologiques ouvrent le champ à de nouvelles possibilités linguistiques, à des différences importantes entre les items linguistiques, la diversité des états possibles doit logiquement augmenter.

Il convient de rappeler ici la différence entre diversité et variabilité comme nous les avons définies au chapitre 2. Là où la variabilité des items linguistiques n'entraîne pas de modification des structures qui contiennent ces items, la diversité renvoie à des différences structurelles entre les systèmes linguistiques.

S'il est difficile de conclure quant à l'évolution de la variabilité linguistique (et sur ses liens avec l'évolution de la diversité), nous pensons que la diversité linguistique s'est accrue au cours du temps pour la raison suivante : les différentes évolutions cognitives et physiologiques ont participé à un accroissement des interactions entre items linguistiques au sein de structures de plus en plus nombreuses. Ceci est dû au développement de ce que nous avons appelé des processus d'*intégration mentale*. Nous pouvons citer quelques exemples sans reprendre l'ensemble des propositions citées si-dessous :

- le passage d'un signal holistique à un signal combinatoire conduit à un jeu d'interactions entre les composants de la phrase. Des changements des items en interactions créent des significations différentes ;
- le passage à un codage phonémique des sons (bâti sur des oppositions entre phonèmes) conduit à une structuration de l'espace des sons du langage ; un grand nombre de structures différentes est rendu possible par le grand nombre de traits qu'il est possible de combiner pour créer les segments ;
- un mode d'expression symbolique, en lien avec une communication inférentielle, offre un très large choix (en fait infini) de formes pour représenter les sens. Le symbolisme permet qu'une convention sociale soit à l'origine des formes utilisées, et la possibilité de recourir à des inférences permet aux structures des énoncés d'être très variées, puisque la seul

contrainte est de permettre à l'allocutaire de tracer des inférences à partir d'indices sémantiques, et non de lui transmettre toujours exactement les représentations sémantiques en jeu. Un choix d'indices et de structures linguistiques est toujours possible pour démarrer le processus d'inférence chez le récepteur, et comme nous l'avons souligné déjà plusieurs fois, les langues opèrent des choix sur les éléments sémantiques effectivement transférés dans le message : le français encodera ainsi les marques de pluralité, ce que ne fera pas le chinois...

Notons que des interactions existent entre les mécanismes précédents. Ainsi, une mise en œuvre plus importante de la structure de la phrase permet une plus grande variabilité au niveau acoustique, puisque même si un mot est perçu de façon erronée par le récepteur, l'aide du contexte linguistique et extra-linguistique permettra de corriger le problème au niveau de la transmission sonore (existence de processus top-down de correction). De façon similaire, le contexte linguistique de la phrase permet également de corriger des imprécisions sémantiques dues au choix des mots utilisés.

Nous avons donc proposé un ensemble d'hypothèses sur l'évolution de la diversité et de la complexité des états possibles. Cette évolution s'est produite au cours de la première phase du scénario de Hombert et Li, marquée par un ensemble de changements de la dimension externe du système langage chez les individus concernés. Dans la seconde phase, la fin des transformations de la dimension naturelle fige en quelque sorte l'espace des possibles, qui a atteint la structuration qui est sienne aujourd'hui.

Il nous reste à voir maintenant comment cette évolution a pu se refléter et se projeter dans les états réels des systèmes linguistiques du passé.

4.5.2 Evolution de la diversité et de la complexité des états possibles

Décorrélation entre les évolutions des états possibles et des états réels

Il est important de commencer en rappelant qu'il n'existe *a priori* pas de lien entre la diversité ou la complexité des états possibles et celles des états réels. En effet, posséder certaines capacités ne signifie pas que celles-ci soient nécessairement mises à profit. Au niveau linguistique, des capacités physiologiques et cognitives peuvent très bien ne pas être mises en œuvre pour la transmission d'information.

A partir de ce constat, différentes contraintes peuvent soit aller dans le sens d'une corrélation, soit au contraire contribuer à une décorrélation. Ce sont ces contraintes que nous allons aborder maintenant.

Pression sociale

De nombreux facteurs sociaux entrent en jeu dans la diversité effective des langues du monde. Le chapitre 6 présentant quelques simulations informatiques à ce sujet, nous introduisons juste ici l'idée qu'une pression sociale (bien que peut-être assez faible) ait pu entraîner une augmentation de la diversité linguistique des états réels au cours du passé.

Notre postulat de départ est le rôle fondamental du langage en tant qu'outil de positionnement social dans une communauté d'individus. A partir de ce postulat, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'une pression culturelle existe dans toute communauté en faveur d'une exploration de l'espace des possibles linguistiques, et une évolution plus ou moins rapide des items linguistiques et des structures (quelle que soit leur complexité, pourvu que celle-ci soit acceptable, c'est à dire que ces éléments fassent parti de l'espace des possibles). Cette pression s'explique par le fait

que les locuteurs cherchent en permanence à se positionner socialement, et que la conséquence de cette activité au niveau linguistique est l'apparition, la disparition ou la transformation des composantes du langage.

Conséquence de l'exploration linguistique sur la diversité des états réels

La pression culturelle précédente et l'inconscience des locuteurs vis à vis de leurs évolutions linguistiques conduisent leur système linguistique à évoluer dans l'espace des possibles de façon aléatoire. Nous retrouvons ici la notion de marche aléatoire ou *random walk*. Au fur et à mesure du temps et par simple exploration aléatoire, les nouvelles régions de l'espace des possibles engendrées par des modifications de la dimension naturelle du "système langage" sont découvertes par une partie des locuteurs et des communautés. Les nouvelles possibilités sont ainsi réalisées progressivement. Il semble qu'un intervalle de temps conduise alors à l'apparition au moins une fois de toutes les formes linguistiques possibles dans les systèmes réels.

Cependant, toutes ces nouvelles formes ne seront pas nécessairement présentes dans les systèmes réels à une époque donnée. Une stratégie particulière peut être mise en œuvre une fois par quelques individus, puis disparaître "à jamais". On retrouve ici les idées de facilité d'émergence et de stabilité des items telles que les a conçues Greenberg (voir chapitre 2). Selon ce scénario, la dynamique d'exploration de l'espace des possibles ne change pas selon que celui-ci a déjà été entièrement découvert dans le passé ou non.

Il faut donc bien distinguer la possibilité de voir apparaître certaines stratégies de la diversité des états réels à une époque donnée.

Accroissement des besoins linguistiques

Parallèlement aux idées précédentes, nous pensons que l'augmentation de la taille des communautés humaines, ou plutôt de celle du réseau d'échanges sociaux des locuteurs au cours du temps, ainsi que le développement technique et cognitif a entraîné un accroissement des demandes en termes de stratégies linguistiques. En effet, avec le développement de ces éléments, les locuteurs ont été conduit à la fois à devoir se positionner de façon plus précise et minutieuse dans leur réseau social et exprimer une palette de concepts et de représentations de plus en plus riche. Ceci a induit le besoin de formes linguistiques plus riches et variées.

Une telle pression a dès lors pour conséquence l'accroissement des items et structures mises en œuvre dans les langues et les idiolectes, car elle pousse les locuteurs à explorer plus en détail et rapidement l'espace des possibles pour y découvrir les formes les plus efficaces et y recourir.

Nous pouvons donner ici un exemple qui nous paraît pertinent : certains synonymes diffèrent parfois par une connotation de type social : si par exemple le mot *voiture* peut être utilisé dans de nombreux contextes de communication, les mots *bagnole*, *caisse*... sont restreints le plus souvent à des contextes familiers et peu formels. Une possibilité est que les conditions sociales, qui conduisent une personne à se rapprocher ou à s'éloigner d'une autre par le choix de son vocabulaire, exercent une légère pression sur l'existence et la préservation de synonymes pour décrire les mêmes choses, afin de pouvoir adapter de façon plus riche et plus appropriée son idiolecte à telle ou telle situation. Cette adaptation permettrait une meilleure insertion dans les différents milieux sociaux.

Réflexion de l'espace des possibles sur l'espace des états réels

Si l'on admet l'hypothèse précédente et la possibilité de découvrir les items et les structures linguistiques de l'espace des possibles (ce qui est une évidence, puisque le langage humain tire effectivement parti de nos caractéristiques cognitives et physiologiques, ce qui le rend si différent des autres systèmes de communication animaux), nous pouvons appliquer notre scénario d'émergence structurelle et de diffusion pour les items linguistiques. Une probabilité, peut-être faible (selon la force de la contrainte précédente) mais positive, existe en faveur de l'apparition des items possibles. Ceux-ci apparaissent donc au cours du temps, et l'espace des possibles se réfléchit progressivement dans l'espace des états réels, si les contraintes structurelles qui pèsent sur l'émergence des nouveaux items le permettent.

Dans la première phase du scénario de Hombert et Li, l'exploration de l'espace des possibles conduit à la découverte de nouvelles stratégies qui permettent de satisfaire les besoins sociaux et communicationnels des individus. Les processus stochastiques et auto-organisés sont quelque peu masqués par ces impératifs. Dans la seconde phase au contraire, ils jouent un rôle plus important. Certains items peuvent ainsi apparaître, se stabiliser ou disparaître sous l'effet de simples contingences. On observe alors des évolutions neutres des systèmes, en fonction des contacts linguistiques à tout niveau. . . Les langues évoluent comme elles semblent le faire aujourd'hui, en particulier sans tendance vers plus de complexité.

Les conséquences de la réflexion précédente sur la diversité et la complexité des états réels sont assez immédiates : si la diversité et la complexité de l'ensemble des possibles ont augmenté lors de la première phase du scénario de Hombert et Li, il est vraisemblable que les premières aient fait tout autant. Le mode d'émergence est toutefois un peu différent : un changement cognitif ou physiologique ouvre "immédiatement" un champ des possibles plus ou moins important. La réflexion de celui-ci dans les systèmes réels au contraire prend un certain temps. En lien avec la notion de potentiel cognitif, ceci rejoint à nouveau notre hypothèse selon laquelle les langues ont pu continuer à évoluer et à tirer parti des nouvelles capacités de notre espèce pendant une certaine période de temps après l'événement de spéciation.

Notons enfin que nous parlons de réflexion que de projection, afin d'illustrer l'idée qu'il ne s'établit pas une correspondance "point par point" entre l'espace des états possibles et celui des états réels, mais que l'espace des états réels représente progressivement la richesse et la variété des états possibles.

Nous avons détaillé ici quelques arguments pour expliquer le développement de la complexité et de la diversité linguistiques des systèmes réels. Ils nous faut toutefois nuancer la situation au niveau d'une macro-population d'individus, en modérant et modulant l'accroissement progressif de la diversité et l'exploration de l'espace des possibles selon les diverses influences des forces sociales.

Impact de la paléo-démographie et de la structure de la macro-population humaine

Nous ne souhaitons pas réviser les propositions précédentes, mais souhaitons voir ici comment la structure de la macro-population préhistorique a pu ralentir ou accélérer le *rythme d'exploration* de l'espace des possibles, et consécutivement la découverte de nouvelles stratégies linguistiques.

Trois cas assez généraux peuvent être envisagés, selon le type de relations qu’avaient entre eux les groupes humains.

Nous avons déjà souligné le fait que les contacts entre groupes étaient vraisemblablement très peu fréquents avant les accroissements sensibles de la macro-population à la fin du Paléolithique Supérieur (50,000 - 10,000 BP) et surtout au Néolithique (après 10,000 BP). Si tout d’abord les contacts sont de nature agressive, et que échanges linguistiques extrêmement restreints, les trajectoires linguistiques des groupes humains sont très indépendantes. Dès lors, pour chacun d’entre eux, l’exploration de l’espace des possibles se fait de façon isolée (absence de diffusion d’innovations linguistiques dans le cadre de notre modèle). Cette indépendance nous semble mener à une exploration “efficace” de l’espace des possibles, à comparer à celle des deux cas suivants.

Si l’on considère le cas de contacts non agressifs entre groupes, et l’échange d’innovations linguistiques (en particulier par le biais d’échanges matrimoniaux), deux types de schémas d’interactions peuvent prévaloir : soit la coopération et la proximité sociale est nécessaire, pour l’échange de nourriture, d’outils etc., et des liens sociaux très forts sont établis, soit, sans que les contacts soient agressifs, une certaine opposition sociale, liée à des phénomènes d’affirmation d’identité, existe également entre les différents groupes.

Ces deux schémas sont directement inspirés des propositions de Jacquesson sur l’impact de la densité des populations sur l’évolution des langues [Jacquesson, 1999]. Jacquesson postule que dans des régions de faible densité comme les “quasi-déserts”, la nécessité de maintenir des interactions d’échange et de bonne entente entre les groupes prévient une trop grande divergence linguistique entre ces groupes. Les innovations et les divergences sont en effet réprimées dans ces derniers pour ne pas risquer d’altérer le lien social avec les autres.

Au contraire, dans des zones de plus forte densité et où les ressources sont plus abondantes, la préservation de liens sociaux forts n’est pas aussi nécessaire, et des divergences linguistiques peuvent plus facilement se manifester dans les populations.

Dans le premier cas de figure, si des innovations linguistiques peuvent émerger au sein d’un groupe, les contacts entre les groupes ralentissent l’accroissement global de la diversité des systèmes réels en imposant en quelque sorte une “contrainte de couplage”. Dans le second cas, ce ralentissement est (partiellement ?) compensé par les phénomènes d’opposition sociale, qui pousse les individus à se différencier linguistiquement les uns des autres.

Il est donc nécessaire une fois de plus de prendre en compte les structures sociales pour émettre les hypothèses les plus pertinentes possibles sur l’évolution des langues au cours de la préhistoire. Les données disponibles sur l’art rupestre au Paléolithique Supérieur (une certaine homogénéité des peintures à l’échelle d’une région de plusieurs centaines de km^2 , mais avec des hétérogénéités plus locales [Sauvet and Włodarczyk, 2001] (p. 223-225)) et la vraisemblance des contacts entre groupes humains, même rares, nous entraînent en direction d’un scénario à mi-chemin entre les différents cas que nous avons présentés. Dans les temps les plus reculés, le très faible nombre de contacts a pu permettre aux groupes d’évoluer séparément, avec dès lors une diversité linguistique importante. Avec l’augmentation de la fréquence de contacts pacifiques et les échanges linguistiques entre les groupes, notre préférence va à une certaine réduction de la diversité linguistique, ou tout du moins à un rythme d’accroissement moins important. Enfin, avec l’accroissement important des populations à partir du Paléolithique Supérieur et surtout au Néolithique, l’accroissement des densités de populations a pu entraîner une nouvelle hausse de la diversité par rapport à la période précédente. Il est toutefois difficile d’estimer si la diversité de la première phase était ou non plus importante que celle de la dernière phase. Cette augmentation

importante s'accorderait assez bien à la fois avec l'hypothèse de ponctuation Néolithique de Dixon, et le développement des familles de langues comme suggéré par la linguistique historique.

Il faut toutefois noter qu'aux époques actuelles, les liens sociaux très forts établis entre les populations conduit à une diminution de la diversité linguistique, comme le démontre la disparition de nombreuses langues. L'appréciation fine des liens positifs ou négatifs qui unissent les membres de nos sociétés requiert donc des études plus approfondies.

Les arguments précédentes manquent de substance. L'un des objectifs du chapitre 6 sera de fournir un peu de cette substance grâce à des expériences informatiques. Celles-ci nous seront utiles en particulier pour bien faire la distinction entre diversité et vitesse d'évolution et d'exploration de l'espace des possibles, que nous n'avons pas réellement appréciée plus haut.

4.5.3 Effets de murs et tendances pour l'évolution des diversités et contraintes linguistiques

Pour clore cette section et le chapitre, nous pouvons tenter, à partir des différentes propositions que nous avons détaillées plus haut, d'inscrire l'évolution des structures linguistiques dans un cadre proche de celui utilisé par Gould pour expliquer la diversification des espèces. L'effet de mur suggéré par Gould ne nous semble en effet pas avoir été appliqué tel quel à l'évolution des structures linguistiques, et nous souhaitons établir un certain nombre de parallèles.

Comme pour les parties précédentes, nous allons opérer une distinction entre les items et structures de l'espace des possibles, et celles des systèmes réels.

Distribution des items linguistiques de l'espace des possibles

Les propositions faites plus haut nous amènent à conclure à une tendance évolutive des items linguistiques vers une complexité moyenne plus importante. Cette tendance est due au développement des capacités cognitives et physiologiques, qui rendent possibles des items et des structures de plus en plus complexes. Ceci est valable dans la première phase du scénario de Hombert et Li. Dans la seconde phase, cette tendance s'annule avec la fin des évolutions de la dimension naturelle du système.

Comme le rappelle la figure 4.22, Gould considère la distribution des espèces selon une échelle de complexité. La présence d'un mur de complexité minimale vient bloquer la diversification des espèces dans une des deux directions possibles, et l'accroissement moyen de complexité qui en résulte donne selon Gould l'impression d'une tendance évolutive.

Nous pensons qu'il est possible d'envisager deux murs à un instant donné pour les items linguistiques de l'espace des possibles. D'un côté, une complexité minimale est requise pour exprimer les structures sémantiques manipulées par l'appareillage cognitif humain (et on peut considérer que cette complexité est la complexité descriptive minimale pour un objet); d'autre part, les limites cognitives et physiologiques humaines limitent la complexité des items possibles. Notons ici que ce mur se déplace avec le temps pour refléter l'évolution des limites précédentes.

Entre ces deux murs, les items linguistiques se distribuent selon leur complexité. L'espace des possibles augmente en taille au fur et à mesure du recul de la limite supérieure, mais les items les plus simples, près de la limite inférieure de complexité, ne disparaissent pas au cours du temps. La diversité augmente grâce à l'apparition des items de plus grande complexité dans le système et à leur combinaison dans des structures.

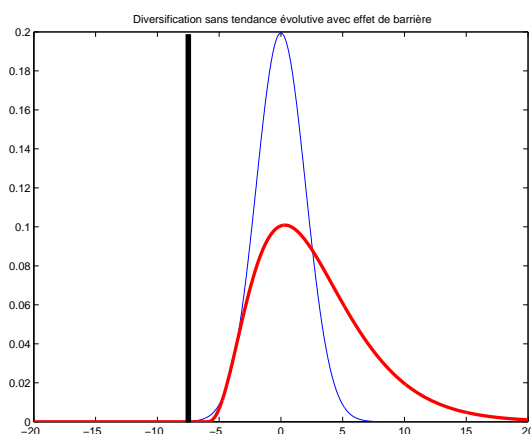


FIG. 4.22 – Evolution par diversification sans tendance évolutive mais effet de barrière

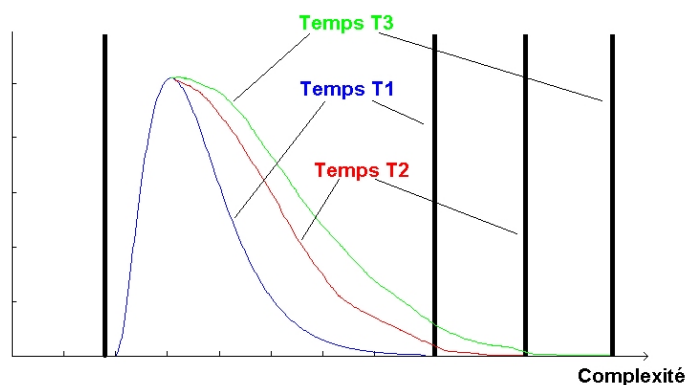


FIG. 4.23 – Evolution de la distribution des items de l'espace des possibles au court du temps

La figure 4.23 résume la situation, en présentant l'évolution que nous proposons pour l'ensemble des items linguistiques possibles.

Distribution des items linguistiques des systèmes réels

Pour décrire cette seconde distribution, nous devons garder en mémoire le scénario en plusieurs phases proposé plus haut, ainsi que la projection progressive de l'espace des possibles dans l'espace des systèmes réels après une modification de la dimension naturelle du système langage.

Les langues piochent leur inventaire typologique parmi les items et les structures de l'espace des possibles. L'ensemble de ces éléments doit permettre de transmettre de façon efficace les informations que requièrent l'environnement et la vie des individus. La conséquence de cet état de fait est la suivante : plus la complexité des messages à transmettre est importante, plus les langues ont recours à des stratégies complexes. Néanmoins, elles utilisent toujours également les stratégies les plus simples qui constituent le cœur de leur inventaire typologique. De la même façon que les bactéries règnent toujours sur le règne animal aujourd'hui, malgré leur grande ancienneté, les items linguistiques les plus simples sont toujours utilisés aujourd'hui, qu'il s'agisse

de sons, d'onomatopées, de structures syntaxiques simples comme l'ordre des mots...

Comme évoqué au chapitre 2, l'échelle d'observation des phénomènes linguistiques peut permettre d'appréhender des dynamiques différentes. Si l'on considère l'évolution de la distribution des items dans les systèmes réels à l'échelle de l'évolution humaine, on observe une progression similaire à celle proposée pour la distribution des états possibles. Si l'on "zoome" maintenant sur les périodes qui suivent un événement de spéciation et le développement de nouvelles capacités cognitives et physiologiques, on peut observer que la même évolution se répète à cette échelle temporelle inférieure ("comme pour une fractale"). Cette fois, le schéma de transformation de la distribution n'est pas dû à un recul de la limite supérieure de complexité des items, mais à l'exploration progressive de l'espace des possibles par les populations de locuteurs.

Enfin, à cette évolution se superpose pour les périodes les plus récentes de la préhistoire une réduction temporaire de la diversité des structures (ou de l'accroissement de diversité), qui correspond à la deuxième période de notre scénario. Cette diminution ne dure qu'un temps, et l'accroissement exponentiel de la population à partir du Néolithique entraîne une nouvelle augmentation majeure et rapide de la diversité des systèmes réels. La tendance semble toutefois s'être à nouveau inversée aujourd'hui avec les phénomènes sociaux de mondialisation.

4.6 Conclusions

Nous avons tenté dans ce chapitre d'aborder les questions de l'émergence des langues et des stratégies linguistiques, et de leur évolution au cours de la préhistoire, en particulier au travers des notions de diversité et de complexité linguistique.

Un de nos travaux a consisté à évaluer la question de la monogenèse ou de la polygenèse des langues. A l'aide d'un modèle probabiliste et de simulations informatiques, nous avons tenté d'évaluer la probabilité de ces deux possibilités pour les différentes stratégies linguistiques qui composent les langues, en fonction des événements de spéciation de notre lignée, ainsi qu'en prenant en compte la structure de la macro-population de nos ancêtres. Nous pensons qu'une polygenèse structurale, suivie d'une diffusion par contacts linguistiques, fut le scénario d'apparition d'une majeure partie des stratégies linguistiques.

Munis de ce scénario d'émergence, nous avons tenté d'évaluer les évolutions de la diversité et de la complexité des états possibles des systèmes linguistiques, ainsi que celles des systèmes réels. En reprenant les notions de dimensions naturelle et structurelle, nous avons formulé différents scénarios pour les quatre notions précédentes : accroissement de la diversité et de la complexité de l'espace des possibles, et projection progressive de cet espace dans les systèmes linguistiques réels, projection ponctuée par les événements de spéciation qui ont mené à notre espèce. Nous avons également tenté de prendre en compte l'impact des contacts entre groupes humains pour moduler la projection précédente par l'accroissement progressif de la macro-population humaine et les modifications sociétales concomitantes.

Différentes questions se posent assez naturellement à l'issue de ce chapitre. Tout d'abord, parmi le grand nombre de stratégies linguistiques de l'espace des possibles des langues actuelles, lesquelles d'entre elles caractérisent les langues modernes par rapport aux langues plus anciennes de la préhistoire. Répondre de façon extrêmement partielle à cette question est l'objectif du prochain chapitre.

Une autre problématique, qui permettra de proposer une approche assez complète de la ques-

tion de l'émergence et de l'évolution des langues, est celle des mécanismes d'évolution des langues au sein des populations humaines. Ces mécanismes, qui prennent en compte les contraintes internes et sociales qui pèsent sur le système langage, sont fondamentaux pour comprendre la micro- et méso-évolution de la diversité linguistique des états réels. Le chapitre 6 tentera de proposer des pistes et des éléments de réponse à ces questions.

Chapitre 5

Emergence des langues modernes : indices paléo-anthropologiques

La seconde question que nous pouvons aborder dans le cadre de la genèse et de l'évolution des langues, après nous être attardés sur leur mode d'émergence et l'évolution de la diversité linguistique, est celle de l'apparition des langues "modernes" : si des caractéristiques ou des structures linguistiques caractérisent et distinguent les langues contemporaines par rapport à des langues plus anciennes, quand ces caractéristiques sont-elles apparues au cours de la préhistoire ?

Un scénario admis par nombre de chercheurs est celui d'une transition linguistique importante lors du passage d'*Homo erectus* à *Homo sapiens*. Notre position, qui postule non seulement une existence du langage mais aussi la présence de langues pré-*sapiens*, rejoint ce scénario. Nous proposons ainsi l'émergence de stratégies linguistiques modernes à partir (et non pas nécessairement dès lors, comme nous l'avons souligné au chapitre précédent) de la spéciation qui a conduit à notre espèce, par opposition aux caractéristiques typologiques plus anciennes. Nous souhaitons pouvoir mettre ici en valeur les indices d'une telle évolution langagière.

Comme nous espérons l'avoir montré dans le 1^{er} chapitre de cette thèse, il est très difficile d'établir des certitudes quant aux dates d'origine du langage et des langues, ou plutôt en ce qui nous concerne des stratégies linguistiques. Comme toute fonction cognitive, le langage "ne fossilise pas", et les données de l'archéologie ou de l'anthropologie ne permettent pas de dater directement de tels phénomènes. Toute étude sur les origines du langage se basent sur des preuves indirectes, comme des manifestations comportementales dont on peut estimer qu'elles nécessitent un système de communication plus ou moins riche.

Un comportement particulier peut nous apporter des indices sur le degré de sophistication du langage de nos ancêtres : les premières traversées maritimes. Celles-ci se manifestent il y a plus de 800,000 ans dans la région indonésienne, et lors d'un événement bien plus récent de l'histoire de nos ancêtres : la colonisation de l'Australie il y a environ 60,000 ans. Déterminer les conditions exactes de ces traversées peut nous renseigner sur les capacités cognitives de nos ancêtres, en particulier pour différencier notre espèce *Homo sapiens* d'*Homo erectus*. Parmi ces capacités cognitives, le langage joue bien sûr un rôle déterminant.

Relier traversées maritimes et capacités cognitives demande au préalable de décrire précisément le contexte paléo-géographique où ces traversées ont pris place, avant de se pencher sur leurs

conditions : étaient-elles ou non intentionnelles, quelles embarcations ont pu être utilisées...? Ces descriptions constituent la première partie de ce chapitre.

Dans une seconde partie, nous examinons différents schémas d'évolution des capacités de navigation. Nous privilégions un scénario particulier basé sur l'hypothèse d'une sortie *Out of Africa* et de migrations côtières. Nous tentons de défendre cette perspective tout en examinant les liens qu'elle entretient avec l'émergence des familles des langues modernes.

5.1 Introductions aux premières traversées maritimes

Les premières traversées maritimes prennent toutes place dans une région spécifique du globe, qui recouvre relativement bien les régions de l'Indonésie orientale contemporaine. Attestées par les localisations des sites archéologiques découverts jusqu'à présent, deux grandes étapes se dessinent : *Homo erectus* serait le premier à avoir pris la mer il y a plus de 800,000 ans pour gagner certaines îles situées au nord-ouest de l'Australie, tandis qu'*Homo sapiens* aurait la primauté des premières traversées vers l'Australie il y a plus de 60,000 ans.

L'écart entre ces dates est d'importance, et le fait qu'à la fois *Homo erectus* et *Homo sapiens* soient impliqués dans ce scénario pose d'emblée la question de la similarité ou non de leurs comportements.

Afin de répondre à cette question, il est nécessaire de déterminer de façon la plus précise possible les conditions dans lesquelles se sont déroulées les traversées. Seul cet examen, qui occupera les prochains paragraphes, peut permettre de déterminer les capacités cognitives nécessaires à telle ou telle traversée. La notion de planification sera en particulier au cœur de notre propos.

5.1.1 Présentation de la paléo-géographie de la région de Wallacea

L'ensemble des cartes qui sont présentées dans les paragraphes suivants ont été réalisées avec la plate-forme LEMMingS, à l'aide de la base de données topographiques aériennes et sous-marines **TerrainBase** [Row and Hastings, 1999]. La résolution de la base est bien sûr limitée, bien que déjà très précise (un point toutes les 5 minutes d'angles), et empêche donc l'affichage de certaines petites îles, ou de détails topographiques fins. Nous nous sommes donc également appuyés sur des cartes commerciales plus précises [Carte, 1993].

Description géographique et écologique de la région contemporaine de Wallacea

L'Australie est aujourd'hui séparée de la péninsule sud-est asiatique par une vaste étendue d'eau constellée d'un chapelet d'îles de plus ou moins grandes dimensions. Comme le montre la carte de la figure 5.1, une partie de ces îles (Bali, Java, Lombok, Timor. . .) forment la pointe de la péninsule précédente, orientée vers l'est, tandis que d'autres îles plus au nord s'étalent entre la grande île de Kalimantan et la Nouvelle-Guinée. Plusieurs îles parsèment également la région à l'est de l'île de Timor, que leurs petites dimensions ne font pas apparaître sur les cartes.

Cette région, qui porte le nom de Wallacea, a joué un rôle écologique important dans le passé. En effet, l'observation de la distribution des espèces met très nettement en évidence l'existence d'une barrière écologique, la ligne de Wallace, qui se situe entre les îles de Bali et Lombok. La conséquence de cette barrière est l'évolution endémique de la faune mammifère australienne, marquée par le développement des marsupiaux et des monotrèmes. Certains mammifères de petite taille, rats et autres rongeurs, ont pu franchir les étendues d'eau pour atteindre l'Australie depuis l'Asie à la fin de l'ère tertiaire ou au début du Pléistocène [Calaby, 1976] (p. 22), mais les grands mammifères asiatiques n'ont jamais dépassé les îles de l'extrémité de la péninsule sud-est asiatique : une espèce d'éléphant et deux espèces apparentées, ainsi que quelques autres ongulés de grande taille ont ainsi pu gagner l'île de Luzon (non visible sur les cartes de ce chapitre ; située au nord de l'île de Kalimantan), et deux espèces de *Stegodon* atteindre les îles de Timor et Florès [Jones, 1992] (p. 289).

L'homme moderne, *Homo sapiens*, fut ainsi le premier grand mammifère à atteindre l'Australie il y a moins de 100,000 ans. Bien que présent dans la région près de 900,000 ans avant lui,

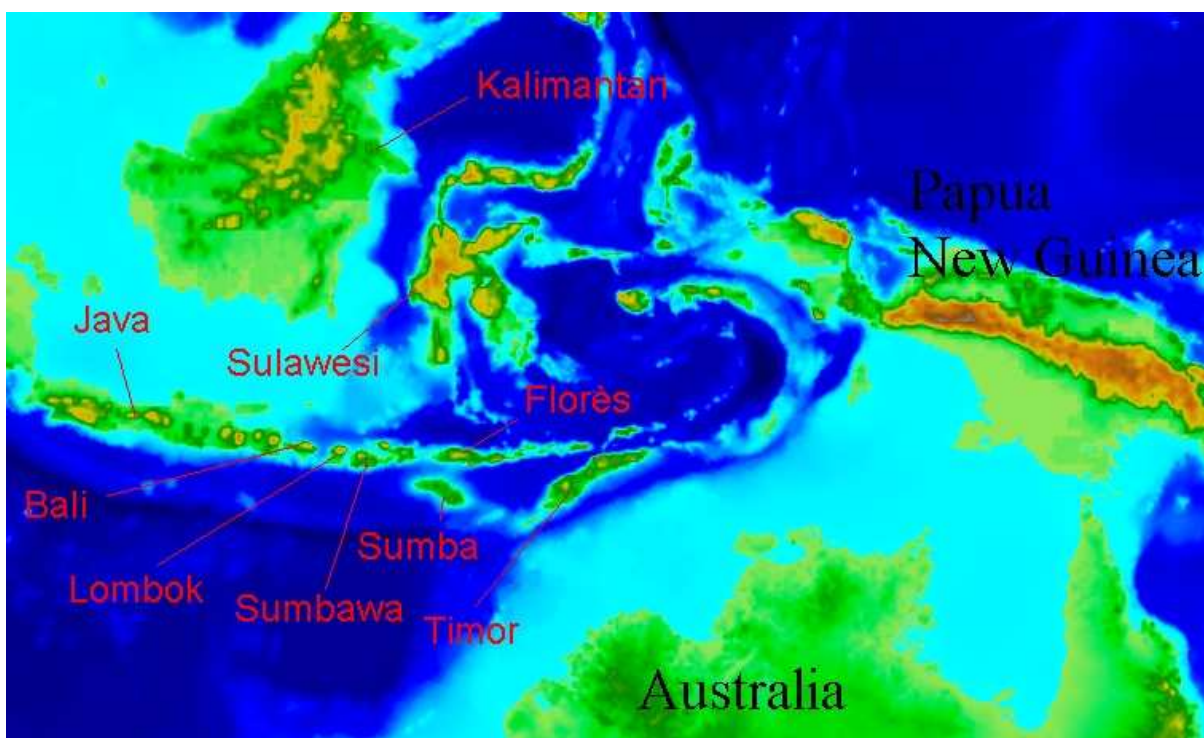


FIG. 5.1 – Topographie contemporaine de la région de Wallacea

la forme locale d'*Homo erectus*, l'Homme de Java, n'a jamais réussi la traversée totale, mais a néanmoins atteint au moins l'île de Florès entre 900,000 BP et 730,000 BP, comme l'attestent les sites de Mata Menge (présence d'artéfacts lithiques) ou Tangi Talo (qui révèle un changement important dans la distribution des espèces après 900,000 BP, attribué à l'arrivée du prédateur humain) [Morwood et al., 1999]. A la fois *Homo erectus* et *Homo sapiens* ont donc traversé des bras de mer à différentes époques.

Afin de mieux définir ces traversées en terme de distances et de difficulté, il est nécessaire de présenter tout d'abord l'évolution géographique de la région de Wallacea au cours du temps.

Evolution du niveau des mers et paléo-géographie de la région de Wallacea

L'évocation du passé terrestre et le terme de paléo-géographie suffisent à projeter dans nos esprits les images de continents en mouvement. Depuis les propositions d'Alfred Wegener (1880-1930) en 1912 sur la tectonique des plaques, nous savons en effet que les plaques océaniques et continentales se déplacent lentement, de quelques centimètres par an (parfois un peu plus), et que la topographie terrestre s'est modifiée de façon spectaculaire au cours du temps. La dérive des plaques n'est cependant pas le phénomène principal qui va nous intéresser par la suite, puisque son impact reste minime sur les échelles de temps en rapport avec l'histoire de notre espèce (ceci ne sera toutefois pas aussi vrai pour des estimations plus anciennes, par exemple autour de 700,000 BP). A raison de 4 centimètres par an, une plaque ne se déplace guère que de 4 kilomètres en 100,000 ans, 40 en 1 million d'années.

Un autre phénomène, mis en évidence par les données paléo-climatiques, a joué un rôle très

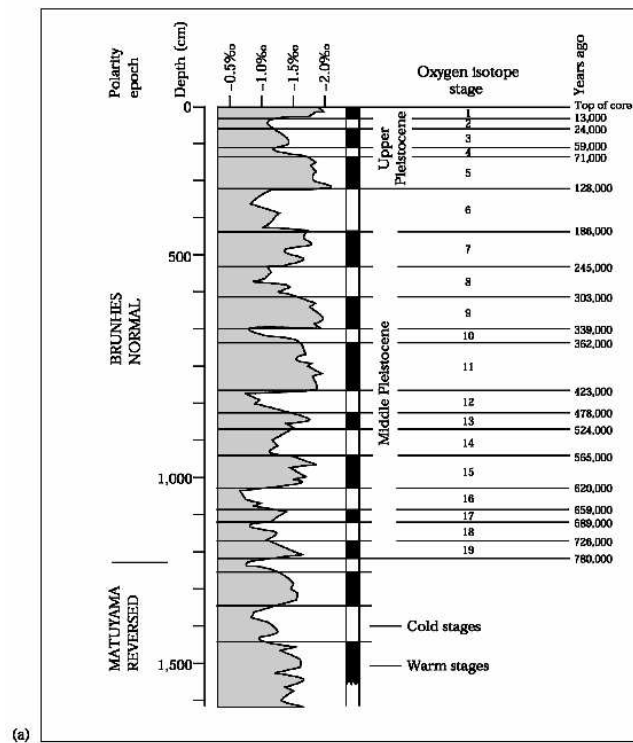


FIG. 5.2 – Evolution du paléo-climat au cours du Pléistocène, d'après [Conroy, 1997]

significatif au cours du dernier million d'années (et également auparavant) : la succession de périodes glaciaires et inter-glaciaires. Ces oscillations périodiques (dont la période est d'environ 130,000 ans) s'expliquent par les variations de la quantité d'énergie solaire reçue par la Terre, quantité qui dépend elle-même de la position et de différents paramètres orbitaux de notre planète, comme l'a montré Milankovitch en 1941 [Pinot, 1999] (p. 13-15). La figure 5.2 permet d'évaluer la fréquence et la durée de ces épisodes climatiques [Conroy, 1997b].

Lors d'une période glaciaire, la baisse de la quantité d'énergie solaire reçue entraîne des phénomènes dynamiques complexes de refroidissement du globe, et l'extension des calottes de glace situées aux pôles. L'eau capturée dans ces calottes provient des océans terrestres, et l'accroissement de la masse de glace conduit donc à une baisse générale du niveau des eaux. Cette baisse peut dépasser les 100 mètres, ce qui entraîne bien sûr une augmentation importante des terres émergées. Pour illustrer les profondes transformations qui peuvent en résulter, la figure 5.3 présente l'Europe après une baisse du niveau marin de 80 mètres.

Au cours des dernières époques glaciaires, la baisse du niveau des mers a eu des conséquences importantes dans la région de Wallacea, en particulier dues à la faible profondeur du plancher océanique dans cette région. Deux masses importantes émergent et s'étendent avec le recul des eaux : d'une part la région baptisée *Sunda*, qui s'établit sur les régions immergées de la péninsule sud-est asiatique, et le *Sahul* d'autre part, qui regroupe l'Australie, la Nouvelle-Guinée et la Tasmanie (la grande île au sud de l'Australie). Entre ces deux masses, les îles s'étendent également, et les distances entre elles diminuent. Les cartes 5.1, 5.6 et 5.7 permettent de mieux visualiser l'évolution des masses terrestres, et en particulier l'avancée de la côte nord-ouest

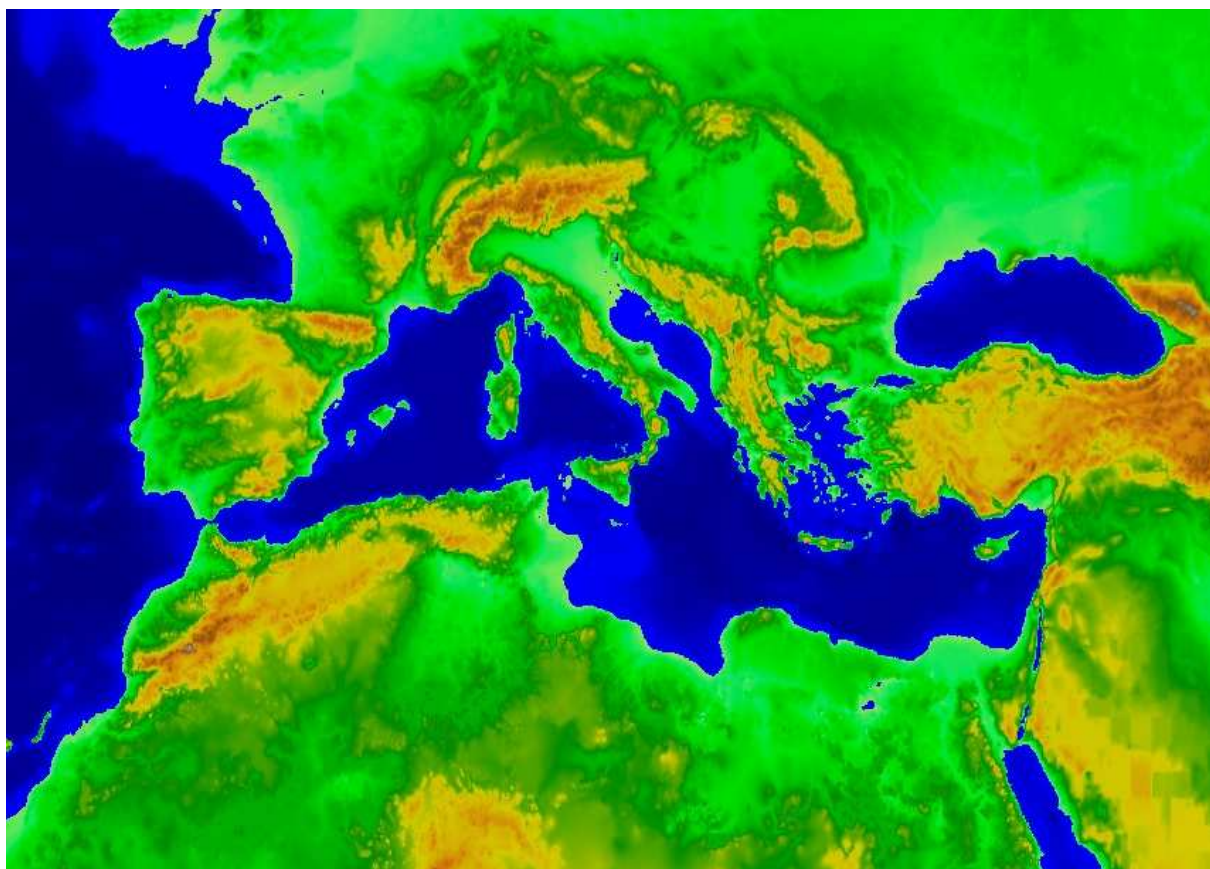


FIG. 5.3 – Carte des terres européennes émergées avec une baisse du niveau marin de 80 mètres

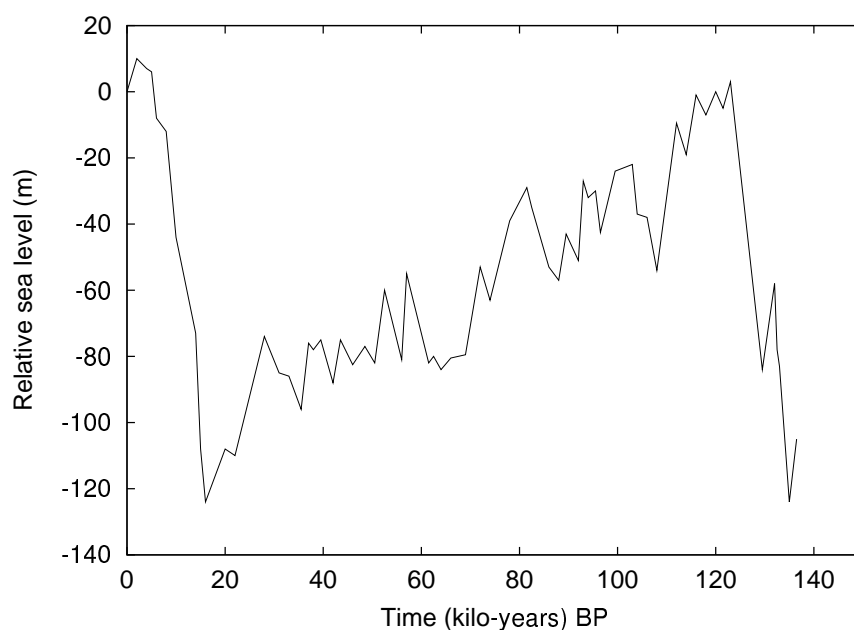


FIG. 5.4 – Evolution du niveau des mers à la Barbade au cours du dernier épisode glaciaire, reproduit d’après [Bard et al., 1990], original de [Schakleton, 1987]

australienne. Les figures 5.4 et 5.5 permettent quant à elles de suivre l’évolution du niveau des eaux au cours de la dernière période glaciaire et de l’avant-dernière période inter-glaciaire (reproduction d’après [Bard et al., 1990] et [Lambeck and Chappell, 2001])³⁶.

Quels renseignements nous apportent ces cartes quant aux premières traversées maritimes ? Elles nous indiquent que certaines périodes ont pu être plus favorables à la traversée de la région de Wallacea pour atteindre d’une part les îles de Florès ou de Timor, et d’autre part l’Australie ou la Nouvelle-Guinée, mais que ces dernières n’ont jamais été connectées au continent asiatique par un lien terrestre. Une baisse du niveau des eaux de plusieurs dizaines de mètres peut correspondre à une avancée des terres émergées de plusieurs dizaines de kilomètres, comme on peut le voir en particulier pour les côtes nord et nord-ouest de l’Australie. Il est possible, si l’on peut estimer la date d’arrivée d’*Homo sapiens* sur les terres de l’ancienne “Grande Australie” (le Sahul), d’avoir une bonne connaissance de la paléo-géographie de la région au cours de la période considérée. En se reportant aux figures 5.4 et 5.5, cette date fournit un niveau marin relatif qui, soumis au logiciel, conduit au calcul de la topographie à l’époque en jeu.

Dates probables de l’arrivée humaine en Australie

Différentes disciplines permettent d’estimer la date d’arrivée des premiers hommes en Australie.

L’archéologie, grâce à la datation des sites découverts, offre une première source de données. Au cours des quarante dernières années, au fil des découvertes des différents sites australiens et papous, les estimations pour l’arrivée des premiers hommes au Sahul ont fait un colossal bond en arrière, passant de moins de 10,000 ans [Clark, 1961] à plus de 60,000 ans. Cette remontée dans le temps emprunte en partie aux différentes méthodes de datation et à leur évolution : anciennes

³⁶Nous nous trouvons actuellement dans une période inter-glaciaire.

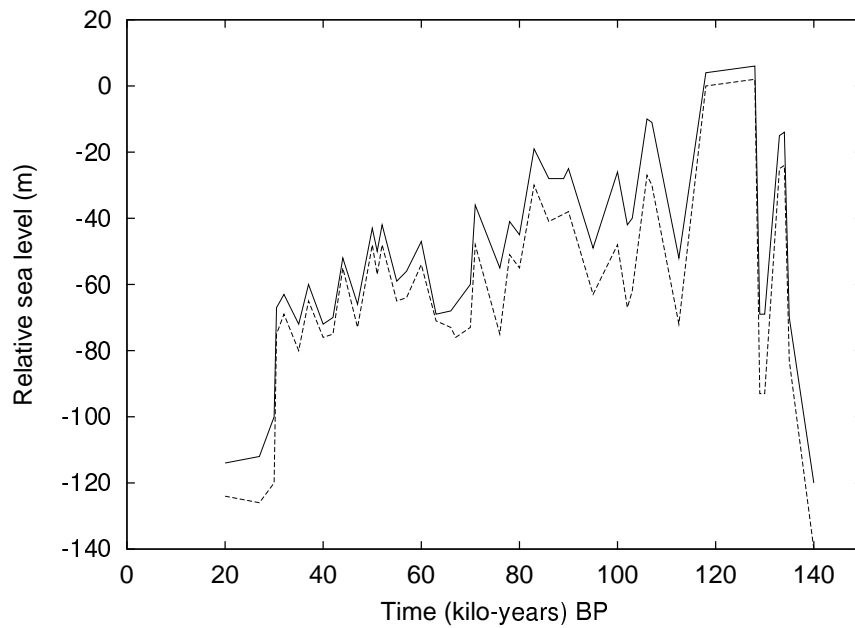


FIG. 5.5 – Evolution du niveau des mers à la péninsule du Huon au cours du dernier épisode glaciaire (minima and maxima), reproduit d'après [Lambeck et al., 2001]

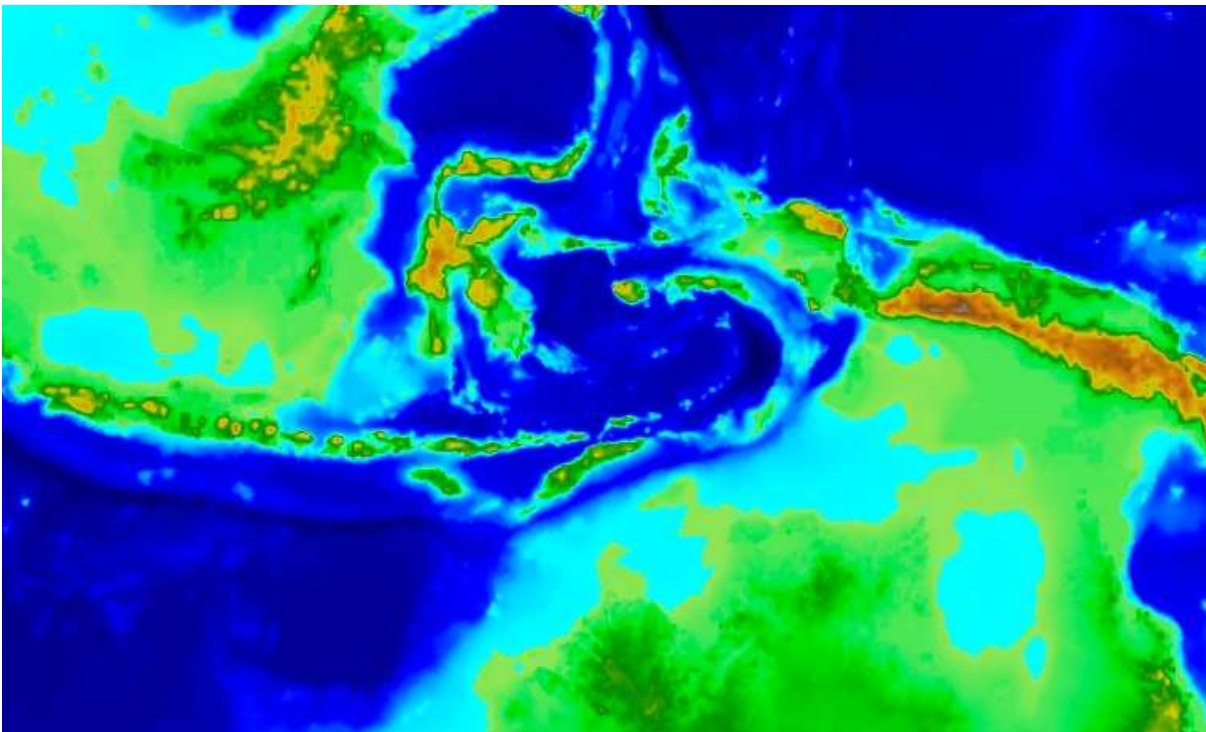


FIG. 5.6 – Région de Wallacea, niveau relatif des mers de -50m

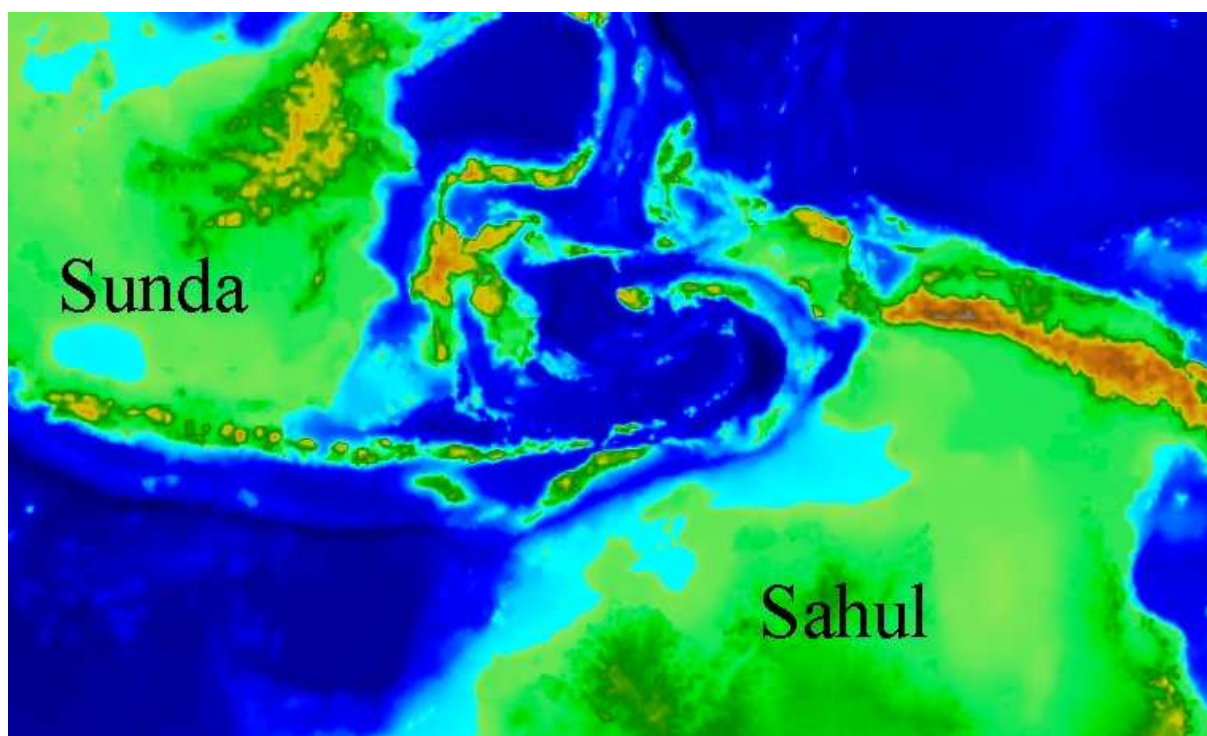


FIG. 5.7 – Région de Wallacea, niveau relatif des mers de -80m

datations au carbone 14, spectrographie de masse ou gamma, résonance de spin électronique (ESR), ou encore thermoluminescence depuis les années 1990. Des débats ont accompagné ces progrès techniques (voir par exemple [Roberts et al., 1994a] et [Allen, 1994] pour des discussions sur les limites temporelles du carbone 14 et la thermoluminescence), mais le recul des dates est aujourd'hui clairement établi, et se poursuivra peut-être encore dans les années à venir.

Sans tenter de dresser une liste exhaustive des sites australiens (une longue liste de sites postérieurs à 30,000 BP se trouve dans [Bowdler, 1992]), nous pouvons néanmoins mentionner les plus anciens :

- Site de *Malakunanja II*, situé dans le Northern Territory au nord-ouest de l'Australie, daté en 1990 à près de 50,000 BP par thermoluminescence [Roberts et al., 1990]. Présence d'artéfacts lithiques (pas de squelettes) ;
- A 70 kilomètres au sud de *Malakunanja II*, site de *Nauwalabila I*, dans la région de la Deaf Adder Gorge, daté par thermoluminescence et mesures optiques. Fourchette temporelle de [53.4±5.4 ka, 60.3±6.7 ka] pour la présence humaine [Roberts et al., 1994b] ;
- A l'extrémité est de la Nouvelle-Guinée, site de la péninsule de Huon (dont les terrasses coralliennes présentent un grand intérêt pour l'étude des variations du niveau marin, voir [Chappell, 1974]). Présence d'artéfacts lithiques. Les datations sur ce site ont évolué de 40,000-60,000 BP il y a une quinzaine d'années [Groube et al., 1986] à 52,000-61,000 BP (par de nouvelles mesures de la terrasse de corail supportant les artéfacts [Chappel et al., 1994]) ;
- Dans la région des Willendra Lakes, à l'ouest du New South Whales, site du lac Mungo (il



FIG. 5.8 – Localisation des plus anciens sites australiens et papous

s'agit d'un lac asséché). Présence de plusieurs squelettes humains. Les datations successives opérées en ces lieux ont produit successivement les dates de 28,000-30,000 BP (datations au carbone 14), puis d'autres entre 36,000 et 50,000 BP (datations par thermoluminescence) et enfin $62,000 \pm 6000$ BP (datations effectuées directement sur les ossements du squelette LM III, selon différentes techniques dont ESR, spectrométries de masse ou gamma sur les isotopes de l'uranium...) [Thorne et al., 1999].

Certaines des datations précédentes sont contestées, en particulier les dates les plus anciennes pour LM III, bien que Thorne insiste sur l'intérêt de dater directement les os. Les datations à $116,000 \pm 12,000$ BP avancées pour le site de Jinnium dans le Northern Territory [Fullagar et al., 1996] ont été fortement contestées, avec le soupçon d'une contamination d'une partie des grains sédimentaires ayant servi à la mesure [Roberts et al., 1998]. La figure 5.8 récapitule les quelques sites que nous venons d'évoquer et donne leur position géographique.

Parallèlement à l'archéologie, d'autres données paléontologiques proposent des indices indirects de la présence humaine.

L'extinction d'une partie de la faune endogène australienne à la fin du Pléistocène (plus de 85% des genres terrestres de plus de 44 kilogrammes, pour la plupart des marsupiaux, ont ainsi disparu [Miller et al., 1999]) a été évoquée comme pouvant résulter d'une activité humaine

[Thorne, 1980]. L'impact humain résulte probablement d'une activité prédatrice, mais aussi de modifications de l'environnement, liées en particulier à des utilisations diverses du feu : techniques de chasse, signalisation, création de nouvelles zones de prairies plus propices à la première activité... [Jones, 1992] En ce sens, l'étude d'une séquence de pollens fossiles par Singh [Singh et al., 1981] a révélé des changements importants au cours du dernier épisode glaciaire : apparition et persistance de fragments importants de charbon, et évolution de la végétation vers des espèces plus résistantes au feu. La zone révélant le début de cette transformation causée par l'utilisation humaine des feux selon Singh fut datée tout d'abord à environ 120,000 ans, puis réévaluée peu après par Wright à environ 60,000 ans [Wright, 1986]. D'autres études se centrent autour de cette même date, avec d'importantes modifications écologiques dues aux feux humains. C'est sur cette base que Johnson et al. analysent par exemple le déclin de la mousson d'été dans la région du lac Eyre : les feux entraînent une diminution des transferts d'humidité entre la biosphère et l'atmosphère qui permettent à la mousson de remonter plus à l'intérieur des terres [Johnson et al., 1999].

Certains auteurs ont avancé qu'aucune extinction animale massive n'a eu lieu avant 30,000 BP [Murray, 1984]. Toutefois des études récentes semblent réviser ce jugement : l'étude de Miller et al. sur la disparition de l'oiseau terrestre *Genyornis newtoni* avance des dates de $50,000 \pm 5000$ BP, à partir de datations des œufs de cette espèce en différents sites australiens à l'est et au sud-est de la région centrale. Des comparaisons avec les œufs d'autres espèces et une étude climatique attribuent cette disparition à l'homme, toujours à travers la chasse et des feux qui auraient modifié la végétation [Miller et al., 1999].

Bien que certaines critiques demeurent, il semble cohérent d'envisager une arrivée humaine il y a au minimum 60,000 ans. Mais cette date constitue une limite inférieure, et l'arrivée a pu être plus ancienne, pour différentes raisons que nous allons maintenant évoquer.

Tout d'abord, le recul des dates d'arrivée de l'homme avec la découverte de nouveaux sites pourrait se poursuivre si l'on en juge l'évolution des vingt dernières années. Ensuite, la position des sites suggèrent qu'un intervalle de temps important a pu séparer l'arrivée en Australie de l'arrivée sur ces sites. Le site de Mungo dans le quart sud-est de l'Australie est ainsi très éloigné des côtes nord-ouest australiennes. L'avancée des terres avec la baisse du niveau des eaux plaçait aussi les autres sites (*Malakunanja II* et *Nauwalabila I*) beaucoup plus à l'intérieur des terres qu'aujourd'hui.

Certains auteurs ont postulé une expansion humaine nord-sud très rapide en Australie (en l'absence de compétition), de l'ordre de quelques milliers d'années [Birdsell, 1957]. Cependant, d'autres ont critiqué un trop grand optimisme dans les possibilités de survie de petits groupes, et proposé également un autre mode de colonisation du territoire, basé sur une expansion le long des côtes puis le long des systèmes de rivières [Bowdler, 1977]. Cette hypothèse nous paraît préférable eu égard à la notion de culture côtière que nous introduirons par la suite. La conséquence d'un tel mode de migration est naturellement un temps plus important pour gagner les sites découverts à l'intérieur des terres.

La nécessité d'atteindre une densité de population significative pour entraîner des modifications globales du climat introduit enfin une décorrélation entre l'arrivée de quelques groupes d'hommes et les modifications climatiques observées il y a plus de 50,000 ans.

A la lumière de ces arguments, la première arrivée d'*Homo sapiens* en Australie pourrait s'inscrire avec confiance dans une fenêtre temporelle de [75,000 BP - 60,000 BP]. L'examen des

variations du niveau marin à cet époque (entre -45 et -70 mètres environ) et celui des cartes topographiques correspondantes permettent dès lors d'envisager la paléo-géographie de la région.

Par comparaison, la présence d'*Homo erectus* est attestée sur plusieurs îles de Nusa Tenggara (nom donné à la région englobant les îles de Lombok, Florès, Timor et Roti) il y a plus de 730,000 ans, mais à une telle profondeur, et avec une imprécision temporelle plus importante, la difficulté de mesurer précisément les effets de la tectonique des plaques dans la région rend difficile la reconstruction d'une topographie exacte.

Traversées et routes migratoires vers l'Australie

Birdsell est le premier à s'être intéressé en détail aux différentes routes possibles pour gagner le Sahul à partir du Sunda [Birdsell, 1977]. La figure 5.9 présente les deux voies principales nord et sud proposées par l'auteur, qui atteignent soit le nord-ouest de l'Australie, soit la pointe ouest de la Nouvelle-Guinée. L'auteur examine les largeurs angulaires et les altitudes des îles intermédiaires, ainsi que les distances entre elles, pour deux niveaux marins de -50 et -150 mètres. En estimant un niveau marin de -150m à 20,000 BP et 53,000 BP (cette dernière estimation est aujourd'hui infirmée), Birdsell conclut que la route sud, et le passage par Timor, sont les plus favorables dans une telle situation. Les routes nord sont plus favorables avec des niveaux relatifs moins importants (-50m), particulièrement à cause de la plus grande distance entre Timor et les côtes nord-ouest de l'Australie.

Suite aux travaux de Birdsell, différents auteurs se sont intéressés à l'hypothèse d'une traversée depuis l'île de Timor, et à la possible expansion des hommes à partir des côtes australiennes (voir [Jones, 1989] pour un résumé de ces recherches).

En ce qui concerne la traversée elle-même, le Barra, vent puissant qui souffle aujourd'hui depuis les îles de Timor, Roti... vers le Arnhem Land en Australie durant les saisons humides, aurait pu pousser des embarcations vers les côtes australiennes. Jones évoque des îles de végétation, de plusieurs mètres carrés de surface, dérivant sur la rivière Sepik dans le nord de la Nouvelle-Guinée, et qui peuvent ensuite parcourir de nombreux kilomètres en mer [Jones, 1992]. Cependant, les distances à parcourir entre les îles sont vraisemblablement trop importantes pour que des îlots flottants de grande taille aient pu dériver sur de si longs trajets. Nos ancêtres ont eu recours à des radeaux, dont la matière première pouvait être le bambou ou d'autres bois résistants communément rencontrés dans le sud-est de l'Asie [Birdsell, 1977]. Jones propose un scénario où des habitants des plages du Sunda naviguant près des côtes auraient été emportés par les courants ou une tempête, et auraient dérivé jusqu'à atteindre les côtes australiennes [Jones, 1989].

Par des simulations, [Thorne and Raymond, 1989] ont évalué le temps de traversée à environ 7 jours. Ce temps relativement long impose de disposer de ressources en eau potable et en nourriture (ou de pouvoir au moins se procurer cette dernière du milieu marin).

L'arrivée d'un groupe très restreint sur les côtes australiennes n'est pas une garantie pour une colonisation réussie. Ce groupe doit en effet pouvoir se développer en une population plus importante et ne pas disparaître à cause de sa faible taille. Calaby a proposé qu'une seule jeune femme enceinte ait pu être le premier maillon de la colonisation [Calaby, 1976], mais une expansion s'est plus vraisemblablement bâtie sur un plus grand nombre d'individus, parvenus au cours de traversées différentes. En prenant pour exemple la colonisation des îles Polynésiennes, Mc Arthur a tenté d'évaluer par des simulations informatiques les possibilités que de telles situa-

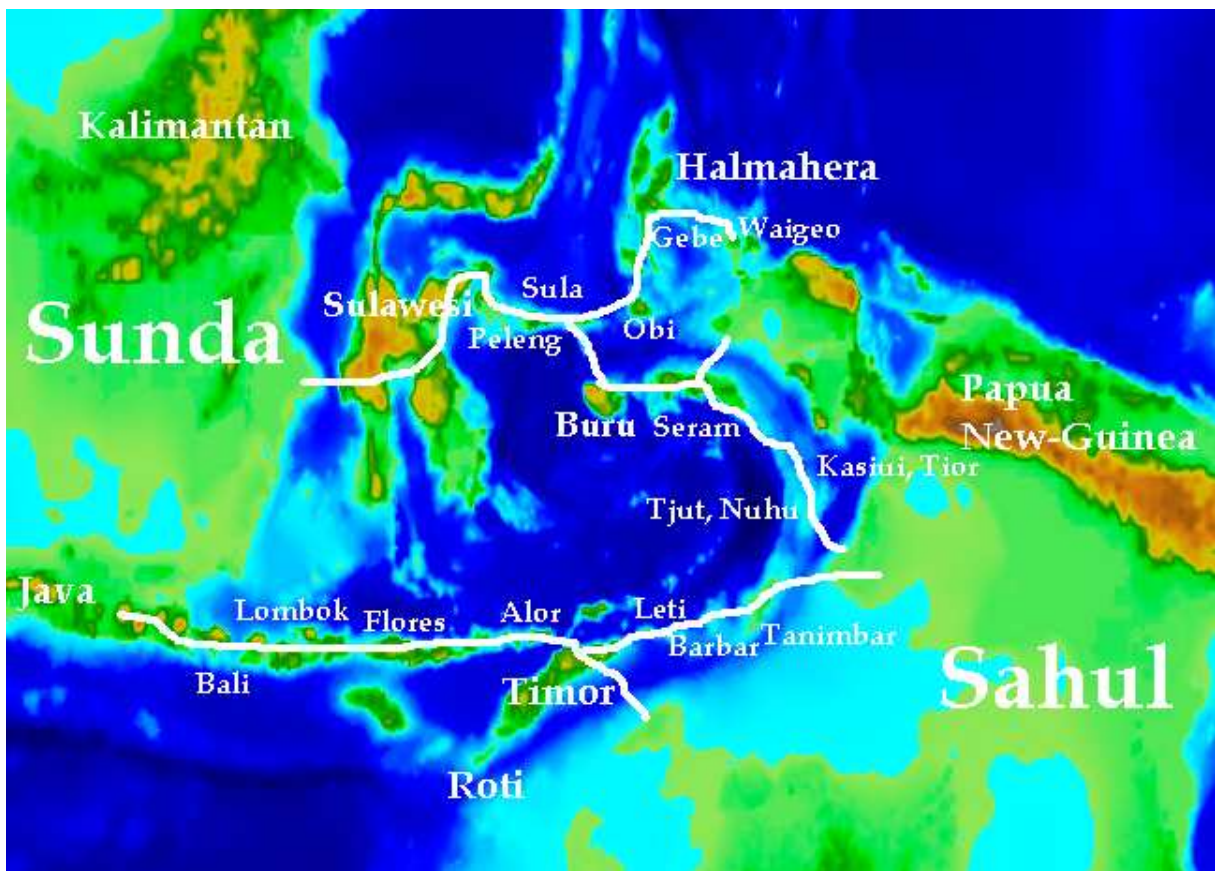


FIG. 5.9 – Routes migratoires proposées par Birdsell [Birdsell, 1977]

tions puissent conduire à des expansions populationnelles réussies, sans tenir compte toutefois des goulots génétiques engendrés par ces situations [McArthur et al., 1976].

Les travaux que nous venons d'énumérer postulent le plus souvent que les traversées maritimes ont été le fruit du hasard, avec de nombreuses tentatives et de multiples échecs. Récemment, certains auteurs ont cependant défendu le point de vue inverse, c'est à dire celui de traversées non accidentelles, et ce non pas seulement pour les *Homo sapiens* ayant gagné l'Australie, mais également pour les *Homo erectus* ayant gagné les îles de Nusa Tenggara [Bednarick, 1999]

L'opposition entre traversées accidentelles et intentionnelles est d'importance, et est liée de façon complexe à la possibilité d'apercevoir ou non les îles de destination, comme nous allons le voir maintenant.

5.1.2 Caractères intentionnel et à vue des premières traversées

A l'encontre de l'hypothèse de traversées accidentelles vers l'Australie, il est possible d'envisager des traversées intentionnelles reliées à la possibilité d'apercevoir une île à l'horizon.

Birdsell avait bien envisagé l'importance de l'altitude des îles de Wallacea, mais sans développer de calculs précis sur la possibilité d'apercevoir ou non une île à partir d'une autre. Une telle possibilité a été envisagée par la suite pour la colonisation des îles du Pacifique [Irwin, 1992]. Irwin offre une carte de la région de Wallacea où la visibilité par une des routes nord semble effective, mais plusieurs travaux qui portent sur les traversées maritimes ne permettent pas de se faire une idée claire et sans contradictions sur la question de la visibilité.

To see or not to see : calcul de la visibilité d'une île cible

Nous nous sommes intéressés à la possibilité d'apercevoir une île cible en fonction de l'altitude du point de départ et de celui d'arrivée, ainsi que de la distance entre ces points. La figure 5.10 illustre la situation.

Des relations trigonométriques dans les deux triangles rectangles qui apparaissent sur la figure conduisent aux deux formules $\cos(a) = \frac{R}{R+h}$ et $\cos(b) = \frac{R}{R+h'}$. Si la distance d est faible, les angles a et b sont faibles également. Par linéarisation des deux cosinus, on obtient alors si l'on néglige aussi h et h' devant R :

$$a = \sqrt{\frac{2h}{R}} \text{ et } b = \sqrt{\frac{2h'}{R}}$$

Avec $d = cR$ et $c = a + b$, nous arrivons à la relation : $d = \sqrt{2R}(\sqrt{h} + \sqrt{h'})$.

Ce calcul suppose une propagation rectiligne des rayons lumineux. Ceci n'est pas la réalité, puisque la structure de l'atmosphère entraîne une réfraction et une courbure des rayons. Pour tenir compte de cet effet, il est nécessaire de modifier le terme constant $\sqrt{2R}$, en considérant un rayon *effectif* supérieur au rayon terrestre d'environ $\frac{4}{3}$ (valeur calculée pour les ondes radio). L'application numérique, avec h et h' en mètres et d en kilomètres donne la relation :

$$d = 4.12(\sqrt{h} + \sqrt{h'})$$

Cette formule est celle utilisée pour les calculs de visibilité par les instances de navigation française [Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, communication personnelle]. Seule la valeur numérique change, puisqu'elle est estimée à 3.85 pour une situation

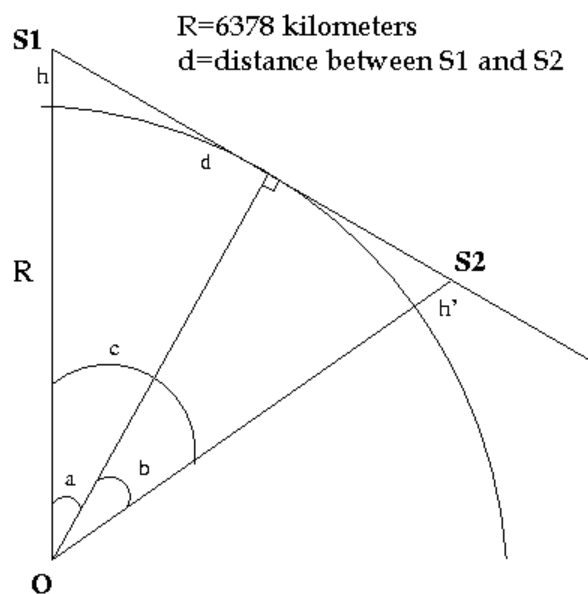


FIG. 5.10 – Visibilité et rotondité de la Terre

moyenne de réfraction des rayons dans l'atmosphère terrestre (la couche de réfraction peut être plus ou moins élevée selon les caractéristiques de la couche atmosphérique).

Dans ce calcul, nous supposons la visibilité parfaite, et nous négligeons l'absorption par la vapeur d'eau, plus importante au-dessus de l'océan que sur terre, et qui diminue la distance de visibilité. Pour un observateur situé à une altitude h , il sera possible d'apercevoir une terre à une distance d si sa hauteur h' est supérieure à la valeur limite $h'_{lim} = (\frac{d}{3.85} - \sqrt{h})^2$. Ceci constitue un cas optimal.

La condition limite n'est pas tout à fait pertinente pour rendre compte de la possibilité d'apercevoir l'île cible. Il faut en effet que celle-ci s'élève assez haut sur l'horizon pour être aperçue. Le pouvoir de résolution de l'œil humain est d'environ 0.31 minute d'angle. Une valeur (assez largement) supérieure est nécessaire pour que la cible soit observable. Nous pouvons calculer sommairement l'angle avec lequel la cible s'élève au-dessus de l'horizon à partir des paramètres d , h et h' précédents. La formule est la suivante (avec toujours certaines linéarisations dues aux faibles angles a et b) :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h' - h''}{d}\right)$$

où α est l'angle recherché exprimé en radian, et h'' la valeur limite calculée précédemment.

Calcul de la visibilité pour les routes de Birdsell

Nous avons appliqué les formules précédentes pour différents couples d'îles, en examinant à chaque fois la situation depuis l'île de départ, soit au niveau de la mer, soit depuis un point élevé de l'île le mieux placé possible afin de déterminer la possibilité de visibilité (le choix du point le mieux placé a été recherché sur des cartes qui ne donnent pas une topographie extrêmement

Source & Ile cible	D_0	D_{-50}	$d_{h'}$	h_{lim}	h'	α	$d_{h,h'}$	h	h'	h_{lim}	α
Routes nord :											
Kalimantan - Sulawesi	128	115	140	1221	3275	50					
Kalimantan - Sulawesi	178	65	75	853	326	24					
Sula - Obi	95	90	123	932	1660	20					
Obi - Halmahera	40	30	44	100	950	66					
Halmahera - Gebe	32	26	40	81	250	14					
Halmahera - Gebe	32	65	239	455	250	11					
Gebe - Gag	38	34	38	71	400	30					
Gag - Batangpele	32	16	28	34	408	46					
(Gebe-) Yu - Balabalak	38	22	49	128	662	37					
Sula - Buru	76	66	82	395	2780	100					
Buru - Seram (Manipa)	28	20	34	55	552	50					
Seram - Misool	96	70	98	578	615	1	146	3000	552	0	≥ 13
Tioor - Kaimeer	51	42	48	122	200	6	56	426	200	0	12
Tioor - Kur	65	48	63	223	473	14					
Kai - Sahul shelf near Kep. Aru	120	108	≈ 130	1046	200	\times	138	850	200	45	4
Kur - Tayandu	36	28	38	71	138	6	46	473	138	0	10
Routes sud :											
Timor/Roti - Sahul shelf	≥ 400	≈ 200	≈ 200	2554	≤ 50	\times	≈ 240	3013	≤ 50	55	\times
Timor - Leti	42	38	46	111	≈ 200	7	70	950	≈ 200	0	10
Sermata - Babar	64	60	62	216	400	10					
Masela - Kep. Tanimbar	98	70	100	603	154	\times	112	350	154	108	1
Kep. Tanimbar - Sahul shelf	230	100	≥ 100	≥ 603	≤ 50	\times	115	290	≤ 50	165	\times

TAB. 5.1 – Distances et visibilité entre les îles de la région de Wallacea

détaillée des îles, mais le processus admet une marge d'erreur si l'on ne se trouve pas trop près des valeurs limites). Nous nous sommes appuyés sur plusieurs sources de données : une carte actuelle de la région de Wallacea [Carte, 1993], les données rapportées par Birdsell [Birdsell, 1977], la base de données *TerrainBase* [Row and Hastings, 1999] et une carte des côtes nord-ouest de l'Australie [Bellwood, 1989] (p. 20-21). Notons ici qu'il serait intéressant de recourir à des bases de données encore plus précises que la base *TerrainBase* pour éviter le lissage des altitudes dû au moyennage des valeurs réelles. Des bases comme GTOPO30 offrent une précision voisine du kilomètre (30 secondes d'arc), mais ne concernent pour l'instant que les terres émergées. Nous avons développé des algorithmes permettant d'examiner de façon exhaustive les possibilités de visibilité entre deux régions spécifiques en prenant en compte tous les points émergés, mais la limite de résolution de notre base de données rendait nécessaire de s'appuyer sur d'autres sources de données. La table 5.1 récapitule les calculs pour différents couples d'îles avec une baisse relative du niveau des mers de 50 mètres.

Il apparaît à travers nos calculs qu'il existe une route au nord (la route 1-A de Birdsell) qui offre toujours la possibilité de voir l'île cible en se plaçant au niveau de la mer (et *a fortiori* à une altitude plus élevée). Les îles de destination sont d'autant plus visibles que le point d'observation est élevé, mais il est dans tous les cas possible de naviguer à vue tout au long de la traversée.

En ce qui concerne l'île de Timor ou les îles voisines jusqu'à Tanimbar, la possibilité de voir les côtes du Sahul depuis le niveau de la mer est nulle quels que soient les époques et les niveaux marins (même au dernier maximum glaciaire). Du haut du point le plus élevé de Timor (3,000 mètres), la distance théorique de visibilité est d'environ 190 kilomètres, et il est *a priori* possible

d'apercevoir les récifs au large des côtes australiennes. Néanmoins, la très basse altitude des récifs à plus de 120 kilomètres du point de vue entraîne un angle au-dessus de l'horizon trop près des limites de l'œil (un peu plus d'une minute d'angle) pour permettre une bonne visibilité, sans compter l'ensemble des perturbations atmosphériques au-dessus de l'eau. Même au dernier maximum glaciaire, la côte australienne était donc invisible depuis Timor.

Ces conclusions sont assez “robustes”, dans le sens où les résultats numériques pour la visibilité sont le plus souvent loin des valeurs limites. En particulier, la route la plus au nord offre des passages à vue même à l'époque actuelle, alors que l'île de Timor n'offre cette possibilité que très difficilement, comme nous venons de le souligner.

Nicholas Evans [communication personnelle] émet l'idée que les feux naturels australiens produisent des colonnes de fumées qui auraient pu indiquer la présence de la côte australienne aux habitants des îles de Timor ou Roti. Ces colonnes peuvent en effet se déployer haut dans le ciel (plusieurs kilomètres), et être visibles à de grandes distances. Les aborigènes actuels retirent ainsi beaucoup d'informations de ces manifestations. La question reste ouverte d'estimer si les feux en Australie auraient pu être mis à profit pour une traversée depuis l'île de Timor jusqu'à l'Australie.

Nicholas Evans rapporte également que les pêcheurs du nord de l'Australie naviguant à quelques kilomètres des côtes peuvent apercevoir des îles qui n'étaient pas visible depuis la terre [communication personnelle]. Ce schéma s'applique pour de faibles distances entre les îles, quand un voyage de plusieurs kilomètres en mer couvre une partie non négligeable de la distance totale. Ceci n'est cependant pas transposable à la situation qui nous intéresse directement, où les îles sont beaucoup plus distantes : une variation de quelques kilomètres ne modifie pas les conditions de visibilité.

Intentionnalité et distances à franchir

Deux possibilités s'opposent quant aux traversées maritimes : celles-ci peuvent être involontaires, accidentelles, ou au contraire intentionnelles. Dans ce dernier cas, l'observation de l'île cible est une information importante qui peut permettre de démarrer le processus général qui s'achèvera par l'arrivée sur cette île.

L'intentionnalité pour une traversée très longue permet une préparation du voyage qui augmente beaucoup les chances de survie du groupe navigant :

- transport d'eau potable et de nourriture en quantité suffisante pour le voyage *et* après l'arrivée. Notons ici que les côtes nord-ouest de l'Australie n'offraient apparemment que peu de ressources alimentaires, et qu'une arrivée accidentelle (ou même intentionnelle) dans cette région rendait la survie plus difficile que dans des zones plus riches comme la Nouvelle-Guinée ;
- départ avec plusieurs embarcations et des groupes plus importants, plus aptes à augmenter les chances de survie et d'expansion de la population après l'arrivée ;
- construction d'embarcations robustes résistant aux conditions difficiles de la haute mer. Les embarcations actuelles des pêcheurs tasmaniens ou australiens ne sont pas assez résistantes pour effectuer des traversées de plus d'une dizaine de kilomètres (perte de flottabilité

après quelques heures le plus souvent). Les embarcations pour des traversées de près d'une centaine de kilomètres nécessitaient une conception beaucoup plus robuste ;

- possibilité de gagner plus directement l'île cible (en ramant). Le problème des vents et des courants est cependant ici délicat. Il est malheureusement difficile de reconstituer ces derniers à des époques reculées. La simple fermeture du détroit de Torrès entre l'Australie et la Nouvelle-Guinée modifiait sûrement les flux marins de façon très significative, sans parler des changements dans les marées et les courants induits par une topographie sous-marine différente.

Une expérience de la navigation et une connaissance du milieu marin sont bien sûr des éléments-clés pour l'hypothèse de traversées planifiées et intentionnelles : connaissances des marées, de la pêche (pour pouvoir sortir sa nourriture de l'océan lors d'une longue traversée), de techniques de rame ou même de navigation à la voile.

Parallèlement aux questions d'intentionnalité, les distances entre les îles pour les deux routes nord et sud sont à prendre en considération. Si les îles à franchir pour gagner la Nouvelle-Guinée par la route nord sont plus nombreuses, les traversées sont moins longues, hormis une traversée de plus de 90 kilomètres entre les îles de Sula et Obi. Pour la route sud, la dernière traversée, que ce soit depuis Timor ou une île voisine, est toujours de plus de 140 kilomètres. Nous pouvons souligner que pour des traversées intentionnelles, la multiplication des voyages pose moins de problèmes que pour des traversées accidentelles.

Notons également que la présence de plusieurs récifs situés entre Timor/Roti et les côtes australiennes, vraisemblablement découverts à des niveaux marins moins importants, auraient pu réduire les distances à parcourir d'une traite pour gagner l'Australie. Cependant, sans ressources en eau ou en matériel sur ces îlots, il n'est pas sûr qu'ils aient été très avantageux pour les immigrants.

Quelles conclusions pouvons nous tirer des paragraphes précédents ? Il semble raisonnable d'envisager des traversées accidentelles dans des cas où les distances à franchir sont peu importantes. Il est alors possible de réussir sans une importante planification, sans de grandes quantités de nourriture ou d'embarcations robustes. En outre, une faible distance, des courants favorables... accroissent la possibilité que ces traversées accidentelles soient fréquentes, et que la colonisation de l'île de destination puisse en conséquence réussir malgré le peu d'individus effectuant les traversées.

En comparaison, des traversées intentionnelles offrent de bien meilleures chances de succès dans toutes les situations (faibles ou grandes distances), et nous semblent indispensables pour de grandes traversées. Le point délicat est bien sûr de déterminer quelle limite sur les distances et sur les conditions de traversée rend improbable tout succès accidentel. L'observation des distributions des autres espèces est un marqueur intéressant pour déterminer la difficulté d'une traversée.

5.1.3 Implications linguistiques des traversées maritimes intentionnelles

Différentes traversées ne requièrent en aucun cas les mêmes capacités cognitives et techniques des individus concernés. Plus une traversée est longue et difficile, plus elle demande une embarcation robuste. D'autre part, alors qu'une traversée accidentelle ne requiert que l'existence d'un canotage à proximité des côtes (par exemple pour la pêche), une traversée intentionnelle est la marque d'un investissement social et cognitif beaucoup plus important.

Constructions d'embarcations et développement technologique

Un premier argument concerne le degré de sophistication des embarcations des premiers marins. Celui-ci devait nécessairement être assez développé pour permettre le franchissement d'étendues d'eau importantes. La construction d'une embarcation impliquait ainsi très probablement l'usage de liens (faits de lianes) pour l'assemblage de polyrites, c'est à dire d'objets composés de différentes parties assemblées entre elles.

Construire des embarcations robustes constitue la preuve d'un développement technologique important. Noble et Davidson relient ces progrès à l'existence d'un système de communication complexe [Davidson and Noble, 1992], nécessaire à la coopération hétéro-technique de plusieurs individus et à la conception avant sa réalisation de l'objet fini (avec donc des représentations mentales de l'objet final au cours de son élaboration). Cette position rappelle celle d'André Leroi-Gourhan sur la taille des outils et les développements linguistique et cognitif associés [Leroi-Gourhan, 1964]. La même critique du lien entre degré de complexité de l'artéfact réalisé et degré de sophistication du langage utilisé est possible.

Intentions et motivations

Si la construction de l'embarcation en elle-même demande des capacités de planification, l'utilisation de cette dernière nécessite elle-aussi une intentionnalité mais sur un plan différent. L'utilisation de radeaux pour la pêche (hypothèse souvent invoquée pour justifier les traversées maritimes accidentelles) requiert des trajets sur l'eau de très faible amplitude comparée à celle de traversées maritimes de plusieurs dizaines de kilomètres. Des trajets le long des côtes de l'île d'habitation ne requièrent pas de planification importante, puisqu'il est possible de se passer de vivres ou d'eau potable, et d'utiliser des embarcations relativement moins robustes. A l'opposé, la traversée intentionnelle de larges distances sur mer requiert :

- de prendre l'observation d'îles distantes en considération ;
- de construire une embarcation robuste et de l'équiper comme il convient (vivres, eau potable, foyer...);
- de construire le but à long-terme et *partagé* entre plusieurs individus d'entreprendre la traversée elle-même, et de construire l'embarcation pour cet objectif.

Il s'agit ici beaucoup plus d'un projet au sens large du terme, qui requiert une planification bien plus importante et qualitativement différente de celle nécessitée pour la construction d'une embarcation. Plus que de planification, il paraît d'ailleurs judicieux de parler ici de *motivation*, car ce terme nous semble mieux refléter la notion de volonté et de construction sociale que celui de planification, qui apparaît plus technique et mécanique.

Un langage sophistiqué apparaît comme une nécessité pour aboutir à la motivation *partagée* de prendre la mer pour atteindre l'île cible. Le projet se base sur la coopération et l'agrément de plusieurs individus et il est difficile d'envisager cette coopération autrement qu'avec un langage permettant une vaste palette d'expressions, et non limité comme le proto-langage de Bickerton à un lexique rudimentaire et une absence de syntaxe [Bickerton, 1990]. En particulier, élaborer une justification pour entreprendre le voyage et aller s'établir sur une île à distance nécessite probablement une projection de la situation sur cette île, et donc un langage qui permette d'exprimer des situations détachées de l'"ici et maintenant" et existant dans un futur conditionnel. Nous pensons comme d'autres qu'un tel langage se rapproche beaucoup des langues contemporaines,

mais nous reviendrons plus en détail sur ce point dans la suite de ce chapitre.

Dans un milieu où les faibles densités de population et un environnement vraisemblablement riche en nourriture n'imposaient pas des déplacements fréquents causés par une compétition entre groupes humains, les motivations des traversées ont pu reposer sur des éléments métaphysiques ou religieux. La recherche d'une "terre promise" aurait pu être un motif de départ. Plus concrètement, les vols de femmes, courants dans de nombreuses populations de chasseurs-collecteurs, auraient également pu pousser certaines groupes au départ. Le volcanisme enfin, particulièrement important au cours du Paléolithique dans l'actuelle région indonésienne, pouvait effrayer ou menacer les populations et les faire gagner des îles plus rassurantes. Le caractère dangereux des traversées maritimes devait probablement être connu des hommes de l'époque, qui ne se seraient alors pas lancés sans raison dans une aventure où ils risquaient facilement de perdre la vie.

5.1.4 Intentionnalité sans visibilité

Comme précisé plus haut, la visibilité d'une destination peut jouer un rôle important dans l'élaboration du but d'atteindre cette destination. Toutefois, la conquête des îles de Polynésie, d'Austronésie et de Micronésie il y a plus de 3,000 ans lors de la vague d'expansion austronésienne met en jeu une navigation où les îles de destination ne sont pas visibles depuis le point de départ. Un pas de plus est encore franchi en comparaison de la situation précédente de visibilité, puisque d'une part l'objet physique et réel sur lequel la motivation s'articule est absent, et que d'autre part, une longue traversée en mer risque de ne jamais aboutir. La connaissance des vents et des courants dominants est nécessaire, et permet à un navire d'explorer l'océan jusqu'à la moitié de ses vivres, avant de faire demi-tour. La motivation doit être encore plus importante, et associée à une grande confiance dans ses capacités de navigation.

L'ensemble de ces arguments et de ces distinctions entre types de traversées entraîne logiquement la question suivante : à quelles époques sont apparues les unes et les autres, et de quelles espèces humaines étaient-elles l'attribut ?

5.2 Traversées maritimes : un point d'ancrage des scénarios de l'évolution humaine et de l'origine des langues

Répondre à la question qui clôturait la première partie de ce chapitre est loin d'être évident. Nous pouvons distinguer trois scénarios majeurs bien distincts, qui définissent chacun de façon fort différente les capacités d'*Homo sapiens* et d'*Homo erectus* à différentes époques.

5.2.1 Trois scénarios d'évolution des techniques de navigation

Ces trois scénarios peuvent être classés selon l'ancienneté de l'apparition des types de navigation et des capacités cognitives sous-jacentes.

A un extrême, une proposition postule des traversées accidentelles pour la conquête de l'Australie, et donc logiquement la même caractéristique d'accidentalité pour les premières traversées d'*Homo erectus*. Les techniques d'une navigation intentionnelle, à vue ou non, se seraient développées plus tardivement.

A l'autre extrême, Robert Bednarik postule que les traversées d'*Homo erectus* étaient déjà extrêmement planifiées et intentionnelles. Des expériences de réplique [Bednarick, 2001] ont

souligné d’une part la coopération nécessaire pour planifier la traversée et construire une embarcation robuste ; d’autre part, la possibilité de construire une telle embarcation avec des matériaux de l’environnement et des outils voisins de ceux qui existaient au Paléolithique Moyen. Bednarick en arrive à postuler un développement en 4 étapes [Bednarick, 2001] :

- une navigation côtière avant 850,000 BP, avec de plus en plus fréquemment des trajets plus éloignés des côtes ;
- entre 850,000 et 60,000 BP, une navigation parfois intentionnelle en direction de destinations visibles, avec un nombre d’individus suffisant pour permettre la colonisation du lieu de destination ;
- entre 60,000 et 35,000 BP, la capacité de naviguer vers des destinations invisibles, mais prédictibles par des indices comme les vols d’oiseaux ou les fumées de feux naturels (conquête de l’Australie) ;
- et finalement, après 35,000 BP, une navigation permettant la conquête d’îles non détectables et distantes de plusieurs centaines de kilomètres, par la maîtrise des vents et des courants pour regagner son lieu de départ en cas d’échec.

Si l’on s’appuie sur les éléments développés dans la première partie de ce chapitre, ce schéma attribue de grandes capacités cognitives et linguistiques aux *Homo erectus*, sur lesquelles nous reviendrons par la suite.

Nous proposons un troisième scénario, à mi-chemin entre les deux précédents, et qui s’appuie d’une part sur nos résultats sur la visibilité entre les îles, et d’autre part sur un cadre anthropologique plus large que nous allons introduire après avoir précisé les étapes suivantes pour notre proposition :

- l’existence d’une navigation côtière chez *Homo erectus*, et dans les premiers temps après l’apparition d’*Homo sapiens*, avant 80,000 BP. Occurrences de traversées accidentelles, qui ont permis aux Erectus de gagner les îles de Nusa Tenggara ;
- le développement d’une navigation intentionnelle avec des traversées à vue chez *Homo sapiens* entre 90,000 et 70,000 BP. Conquête de l’Australie ;
- après 70,000 BP, le développement progressif d’une navigation sans visibilité, avec des distances franchies de plus en plus importantes. Ce développement mène à la conquête des îles d’Océanie au cours des derniers millénaires.

5.2.2 Les migrations côtières hors d’Afrique

Comme nous l’avons déjà vu au chapitre 1, deux modèles théoriques majeurs s’opposent pour rendre compte de l’apparition et du développement des hommes modernes ou *Homo sapiens*. Le premier modèle est celui de la **continuité régionale** qui postule une évolution locale de l’ensemble des populations d’*Homo erectus* vers l’espèce *Homo sapiens*. Le second correspond à l’hypothèse **Out of Africa**, qui postule l’émergence de l’homme moderne en Afrique de l’est, puis sa sortie hors d’Afrique et le remplacement de l’ensemble des populations Erectus et Néandertaliennes. Ce dernier scénario a aujourd’hui les faveurs d’une majorité de la communauté scientifique concernée, et c’est lui que nous retenons pour les propositions qui vont suivre.

Migrations côtières vers l'Asie

Dans le cadre de la théorie *Out of Africa*, il est nécessaire d'expliquer comment l'expansion humaine hors d'Afrique a débuté et s'est prolongée sur les différents continents.

Une hypothèse assez récente est celle d'une migration le long des côtes sud-asiatiques, qui aurait précédé les migrations vers l'Europe. Plusieurs éléments sont avancés pour justifier cette migration. Tout d'abord, des preuves d'une utilisation très ancienne, aux alentours de 125,000 BP, des ressources marines ont été mises en évidence sur les bords de la Mer Rouge en Eritrée [Walter et al., 2000]. Cette découverte atteste d'une adaptation très ancienne au milieu côtier. Les auteurs proposent que cette adaptation soit une réponse aux changements dans le paléoclimat au cours du dernier cycle glaciaire. La croissance humaine et la compétition le long des côtes lors de périodes arides auraient alors poussé au départ certains groupes humains. Une telle période d'aridité est attestée dans le sud-ouest de l'Afrique entre 110,000 BP et 90,000 BP. Bien que les connaissances actuelles à propos du climat dans les autres régions africaines soient faibles, la probabilité est grande que ce contexte ait été celui de la majeure partie du continent [Adams, 1997].

[Stringer, 2000] propose que les migrations côtières aient permis de conserver un environnement relativement uniforme lors des déplacements, alors que les émigrants auraient dû s'adapter à des environnements beaucoup plus changeants s'ils avaient progressé plus à l'intérieur des terres. Ceci expliquerait également le faible nombre de contacts avec des populations plus anciennes d'*Homo erectus* [ibid].

Les récentes données de la génétique ont confirmé cette idée d'une migration côtière : les mutations du chromosome Y permettent en effet de suivre ces mouvements de population spécifiques [Underhill et al., 2001], tout comme celles de l'ADN mitochondrial [Quintana-Murci et al., 1999].

Une étude de Redd et Stoneking sur l'ADN mitochondrial (segments hypervariables HV I et HV II de la région contrôle) met en évidence une filiation très ancienne de certaines populations des Highlands de Nouvelle-Guinée dans l'arbre génétique des hommes modernes. Les temps de coalescence pour ces populations sont estimés à environ 80,000 et 122,000 BP selon les séquences génétiques [Redd and Stoneking, 1999]. Si les temps de coalescence doivent être considérés avec précaution et ne renseignent pas sur une date d'arrivée au Sahul, ils permettent cependant d'aller dans le sens d'un clivage très ancien de certaines populations modernes, qui auraient quitté l'Afrique en des temps reculés (ce qui expliquerait leur différenciation génétique avec les populations restées sur ce continent à l'époque).

Culture côtière et développement de la navigation

Dans le cadre du troisième scénario que nous avons détaillé plus haut, une étape est le développement de la navigation intentionnelle entre 90,000 et 70,000 BP. Ces dates ne sont pas à prendre au pied de la lettre, mais correspondent globalement à la première migration côtière vers l'Asie. Nous pensons en effet que c'est le long de ce trajet menant de l'Afrique de l'est à la péninsule sud-est asiatique que s'est développée la navigation, ainsi qu'une véritable *culture côtière*.

Plusieurs obstacles "aquatiques" se sont nécessairement situés sur ce long parcours, qui auraient conduit les populations en mouvement à développer progressivement des techniques permettant de les surmonter.



FIG. 5.11 – Principales routes menant vers l'Asie depuis l'Afrique de l'est

Plusieurs routes permettent de quitter l'Afrique de l'est pour se rendre en Asie. Une première suit la côte ouest de la Mer Rouge pour gagner le Moyen-Orient. A partir de là, elle traverse soit directement vers l'est en direction des côtes de l'Iran actuel, ou bien suit les côtes de la péninsule arabique (tracés en pointillé de la figure 5.11). Une seconde passe par la corne de l'Afrique (entre l'actuel Yémen et l'Arabie Saoudite) et longe ensuite les côtes de la péninsule arabique [Lahr and Foley, 1994] (tracé continu sur la figure). Elle implique le franchissement d'un détroit qui n'excède pas 20 kilomètres avec le niveau des eaux actuel, et qui aurait été beaucoup plus étroit (zones de faibles profondeurs) au cours du début de la période glaciaire (-30 à -40 mètres il y a 100,000 ans). Ce détroit aurait pu constituer une première expérience de la navigation, comme les nombreuses îles de la Mer Rouge et du golfe Persique³⁷. Ce dernier peut également être contourné ou franchi facilement en période de plus faible niveau des eaux. La quasi-absence de sites archéologiques le long des côtes de la péninsule arabique peut s'expliquer par le fait que ceux-ci soient aujourd'hui immergés. En outre, le style de vie mobile et nomade de ces populations pouvaient limiter l'utilisation d'abris naturels comme les grottes. Murray invoque en tout cas cet argument pour l'Australie, où l'extinction de certaines espèces n'est pas corrélée avec la présence de restes dans les grottes découvertes [Murray, 1984].

Par la suite, les embouchures de fleuves importants comme l'Indus et le Gange (dont le delta est extrêmement large), la présence de mangroves... ont du contraindre les groupes humains soit à franchir l'obstacle, soit à le contourner. Le développement progressif de la navigation pourrait

³⁷Les routes ont bien sûr pu être toutes utilisées, simultanément ou non à différentes époques.

assez intuitivement résulter du fait qu'il était plus facile de traverser l'étendue d'eau plutôt que de la contourner à pied.

Dans le même temps, la mer offrait une source abondante de nourriture, sous la forme de poissons, de crustacés et de coquillages que l'on pouvait pêcher ou récolter. La facilité d'accès à ces ressources peut expliquer que les migrations aient suivi les côtes, conjuguant exploitation de la mer et chasse et récolte plus à l'intérieur des terres. Notons ici que la pêche s'est surtout développée avec l'apparition d'*Homo sapiens*, et qu'elle n'était par exemple apparemment pas pratiquée de façon intensive par les populations de Néandertals. Les techniques de nage, de pêche, de couture de filets, de navigation, de transport d'eau douce dans des containers, la connaissance des marées etc. ont pu se développer progressivement, et être transmises de génération en génération.

La conséquence du développement de cette culture côtière est que les *Homo sapiens* parvenus dans la région de Wallacea possédaient déjà une solide expérience de la navigation, qui ne serait donc pas développée *in-situ* pendant une période plus ou moins longue.

Dates des migrations

Plusieurs dates ont été avancées pour les migrations précédentes. Dans leur modèle de "dispersion multiple", Lahr et Foley postulent un large intervalle de temps entre 100,000 et 50,000 BP [Lahr and Foley, 1994]. Ils citent également la proposition de Kingdon d'une date de 90,000 BP pour une migration du Moyen Orient vers l'Asie [Kingdon, 1993].

Klein propose une expansion hors d'Afrique plus récente, aux alentours de 45,000 - 50,000 BP, qu'il relie à la transition vers le Paléolithique Supérieur en Europe et au "Later Stone Age" en Afrique [Klein, 1999] (p. 588). Toutefois, il reconnaît le problème posé par les datations australiennes antérieures à ces dates (p. 593).

Le temps nécessaire pour gagner le Sunda à partir de l'Afrique est difficile à estimer. L'absence de sites le long du trajet, et les incertitudes temporelles importantes pour les données génétiques ne permettent pas de se faire une idée précise à ce sujet, tout comme il est difficile de dater exactement la première sortie hors d'Afrique. En s'appuyant sur les estimations de Cavalli-Sforza des vitesses moyennes de déplacement des premiers agriculteurs en Europe [Cavalli-Sforza et al., 1993], environ 1 kilomètre par an, il est possible d'estimer grossièrement le temps de migration entre 10,000 et 20,000 ans. Les populations de chasseurs-cueilleurs-pêcheurs ont pu se déplacer plus rapidement que des populations d'agriculteurs plus sédentaires. Ceci est renforcé par le fait que suivre les côtes conduit à des mouvements très directionnels et à une distance parcourue plus importante que lors de déplacements de type "browniens" (mouvements aléatoires des particules dans un liquide chaud).

Pour conclure, un départ de l'Afrique entre 110,000 et 70,000 BP pourrait coïncider avec une arrivée en Australie il y a environ 60,000 ou 70,000 ans. Les différentes dates proposées par les acteurs de différentes disciplines s'inscrivent correctement dans cet intervalle. Nous allons examiner maintenant un cas de migration particulier qui renforce ce contexte temporel et spatial.

5.2.3 Le cas des îles Andaman

Si l'on suit les côtes sud du continent asiatique, la sortie du sous-continent indien et le parcours des côtes du Golfe du Bengale font apparaître la possibilité de premières traversées intentionnelles avant l'arrivée au Sunda. Situées dans le golfe du Bengale, les îles Andaman

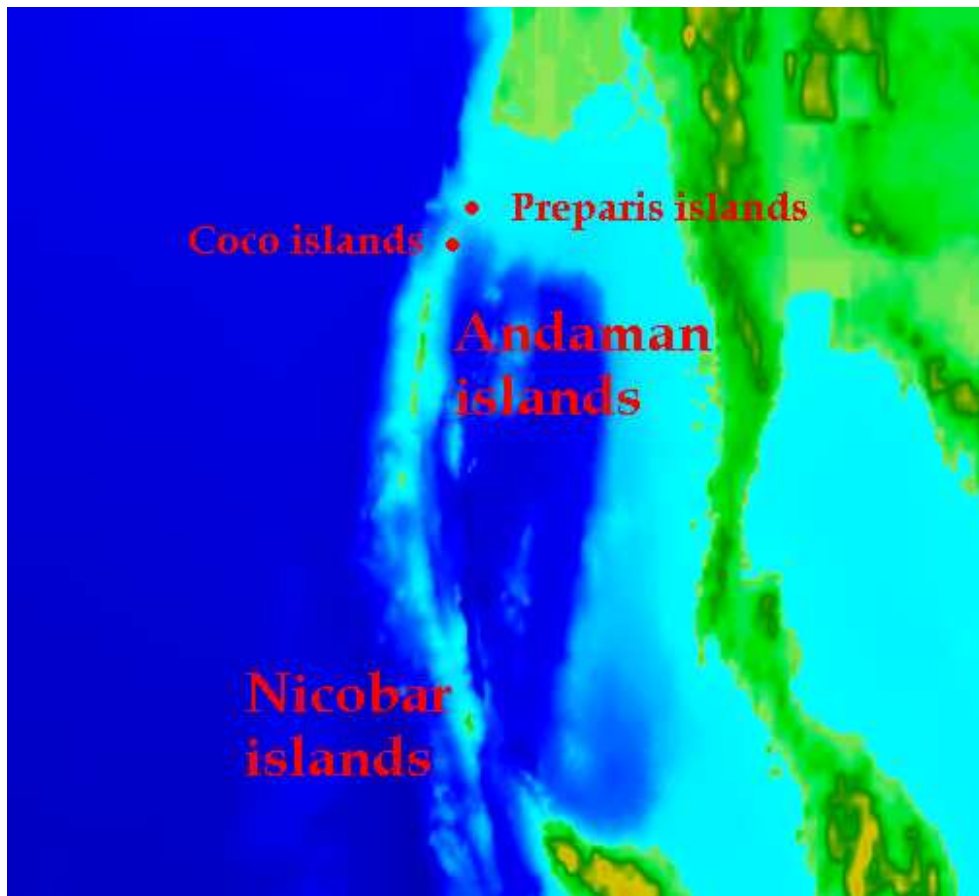


FIG. 5.12 – Topographie contemporaine des îles Andaman et Nicobar

et Nicobar se trouvent aujourd'hui à plusieurs centaines de kilomètres des côtes malaysiennes (voir figure 5.12). Elles constituent les arêtes émergées d'une grande chaîne de montagnes sous-marines. Lors de la période glaciaire, l'avancée des côtes asiatiques et la plus grande surface de ces îles ont considérablement réduit les distances maritimes à parcourir pour atteindre ces dernières (figure 5.13, à comparer à la figure 5.12).

L'utilisation de notre base de données et d'autres cartes des îles Andaman nous permet de conclure que pour une baisse du niveau marin d'environ 60 mètres, la distance à franchir est d'environ 70 kilomètres. Les îles Andaman s'étendent alors jusqu'aux actuelles îles Coco, tandis que le continent atteint les îles Preparis. L'application des formules de visibilité, avec une estimation de 100 mètres d'altitude pour les îles Great Coco et Preparis contemporaines (nous n'avons pas pu encore réussi à nous procurer des données réelles sur ces îles), conduit à un angle de 10 minutes au-dessus de l'horizon, et donc à la visibilité des îles Andaman depuis le continent dans de bonnes conditions. Des groupes humains apercevant ces îles à l'horizon auraient donc pu chercher à s'y rendre, comme ils l'ont fait dans la région de Wallacea. En comparaison, les îles Nicobar ne sont jamais visibles du continent (ou des îles Andaman), même avec des niveaux marins plus faibles, en raison d'une distance plus importante à franchir (plus de 200 kilomètres). Notre hypothèse serait dès lors qu'une partie des populations des îles Andaman puisse provenir des premières migrations hors d'Afrique et que ceci puisse s'observer au niveau génétique (à moins que tous les descendants aient disparu), sans que cela soit le cas pour les populations des

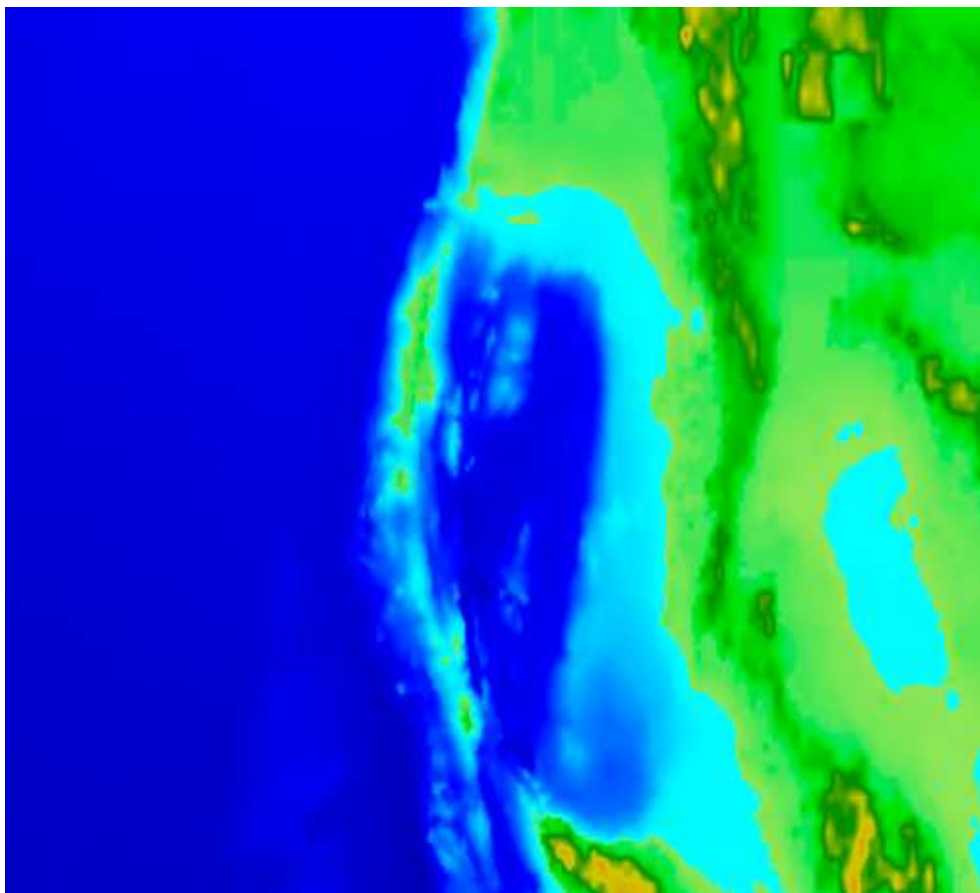


FIG. 5.13 – Iles Andaman et Nicobar, niveau relatif des mers de -60m

îles Nicobar.

Un tel scénario s'inscrirait tout à fait dans le contexte global des migrations et de la culture côtières, et supporterait l'hypothèse de traversées à vue et intentionnelles. Il devient intéressant de rechercher des indices qui puissent conforter cette hypothèse.

Quatre tribus de chasseurs-collecteurs vivent encore aujourd'hui dans les îles Andaman : les Andamais, les Sentinelles, les Onges et les Jarawa. Dans les îles Nicobar, les Shompens et les Nicobaraïses forment deux tribus [Naswa, 1999]. Parmi ces tribus, les Jarawas, qui vivent dans les forêts denses des îles South Andaman et Middle Andaman, restent hostiles et refusent le contact avec les populations et la civilisation modernes. Les Sentinelles, qui vivent sur Sentinel Island, sont encore plus isolés et demeurent eux aussi très réticents aux contacts avec l'administration indienne. Les origines des membres de ces deux tribus sont très difficiles à tracer. La tentation est ici grande de vouloir relier ces tribus à des migrations anciennes de populations, mais bien sûr ceci ne peut-être établi sans données génétiques. Jusqu'à présent, il semble qu'aucune étude ne détaille les caractéristiques génétiques des différentes tribus. Notre hypothèse serait encore une fois de retrouver les "motifs" génétiques caractéristiques de la première migration vers l'Asie sur les îles Andaman, et non sur les îles Nicobar.

Il faut souligner que ces îles ont également été touchées par des vagues de migrations beaucoup plus récentes, remontant à quelques milliers d'années. Comme nous l'avons déjà souligné, les migrations austronésiennes ont d'une part colonisé les îles du Pacifique, tandis que les migrations austro-asiatiques s'étendaient sur une large partie du sud-est asiatique. Ce sont ces dernières qui ont touché les îles Nicobar et Andaman, bien après les premières migrations de l'homme moderne.

En lien avec ces migrations, la situation linguistique des îles Andaman et Nicobar est intéressante. Les langues des îles Nicobar appartiennent sans discussion à la famille austro-asiatique. Cette famille s'est étendue lors des migrations du même nom, et s'étend aujourd'hui de l'est de l'Inde au Vietnam. A l'opposé, une partie des langues des îles Andaman n'appartient à aucune des grandes familles linguistiques d'Asie du sud-est. Elles forment ainsi un *isola linguistique*, sans présenter toutefois de structures typologiques très particulières. Les langues des Andaman pourraient être ainsi considérées comme des vestiges des premières populations arrivées sur les îles Andaman. L'isolation marquée de certaines tribus, encore manifeste aujourd'hui, pourrait expliquer la préservation de ces langues malgré les migrations austro-asiatiques plus récentes.

5.3 Origine des comportements et des stratégies linguistiques modernes

5.3.1 Développement de la navigation dans un contexte évolutif

Le débat entre les différents scénarios de développement de la navigation concentre et retrace les principales thèses sur les capacités cognitives et les comportements de nos différents ancêtres. A un extrême se trouvent des propositions comme celle de Leroi-Gourhan, qui associent le développement de la taille de pierre chez *Homo habilis* à l'émergence du langage [Leroi-Gourhan, 1964]. A un autre extrême se trouvent des positions qui voient dans la révolution culturelle il y a environ 50,000 ans la véritable émergence du comportement moderne de notre espèce et l'apparition du langage.

Le débat est particulièrement vivace à propos de la transition entre *Homo erectus* et *Homo sapiens*. En particulier, la question des capacités à attribuer aux *Homo erectus* est difficile à estimer. Les arguments de Bednarik, et son étude très précise des traversées des hommes de Java, jouent un rôle important dans l'attribution de capacités cognitives, linguistiques et de planification aux *Homo erectus*.

Si l'on considère le fait que ce sont bien des *Homo sapiens* qui ont colonisé le Sahul, le problème de la continuité de la culture côtière et de la navigation se pose. L'hypothèse de la continuité régionale semble ici être la plus probable, et les *Homo sapiens* qui ont colonisé l'Australie seraient alors les descendants directs des populations Erectus locales.

Dans le cas contraire, il faut envisager soit une transmission des techniques des Erectus locaux aux Sapiens venant d'Asie, soit une émergence indépendante de la navigation chez ces derniers (une **polygenèse**), puisque la navigation chez Erectus semble restreinte à la région de Wallacea. C'est cette dernière hypothèse qui reçoit nos faveurs.

Le scénario que nous avons défendu nous semble le plus cohérent, mais sans qu'il soit possible de vraiment pouvoir réfuter les propositions de Bednarik. On peut argumenter que les distances à franchir pour gagner l'île de Lombok, puis celles de Florès ou Timor, étaient bien moins importantes que celles à franchir pour gagner l'Australie (près de 100 kilomètres). En effet, les distances entre les îles de Nusa Tenggara sont inférieures à 20 kilomètres avec une baisse importante du niveau marin pour la topographie terrestre actuelle ; bien que Bednarik propose une distance de plus de 30 kilomètres pour le franchissement de la ligne de Wallace, les incertitudes quant aux courants ou à la paléo-géographie il y a plus de 800,000 ans dans la région rendent difficile toute conclusion ferme. On peut aussi relever qu'au cours d'une période de plusieurs centaines de milliers d'années, les populations d'Erectus ne sont jamais parvenues à gagner l'Australie ou les îles du nord de la région de Wallacea, ce qui semble contradictoire avec le grand développement cognitif et technique postulé par Bednarik. Enfin, il peut sembler étrange qu'à capacités cognitives voisines, les Néandertals ou Erectus du pourtour méditerranéen n'aient laissé aucune trace sur les nombreuses îles de Méditerranée.

Ce sont plutôt le contexte des migrations vers l'Asie à partir de l'Afrique, de plus en plus vraisemblable si l'on considère la convergence des données anthropologiques, archéologiques et génétiques, et le contexte plus général de l'évolution comportementale d'*Homo sapiens* qui nous font opter pour le scénario que nous avons présenté. De nombreuses activités de notre espèce, comme la modification intentionnelle de l'environnement [Groube et al., 1986], l'apparition de sépultures de portée symbolique non équivoque, le développement de l'art pariétal et plus récemment celui de l'agriculture attestent en effet de transformations comportementales radicales.

5.3.2 Quelques indices sur les langues du Paléolithique Moyen et du Paléolithique Supérieur

Nous avons rapidement introduit la linguistique historique au cours du premier chapitre de cette thèse. Nous avons mentionné le problème des limites des reconstructions, que la plupart des linguistes établissent vers 8,000 ans environ. Ce seuil est très récent par rapport aux dates qui ont parsemées les paragraphes précédents. Certains chercheurs pensent cependant qu'il est possible de retrouver des indices des langues qui auraient pu être parlées il y a plusieurs dizaines de milliers d'années, et nous pensons que leur démarche est utile parallèlement aux reconstructions précises sur des périodes de temps plus proches de nous. Une approche pluridisciplinaire est ici très pertinente pour se dégager du cadre strict de la linguistique historique, et mettre en oeuvre des convergences d'idées et d'hypothèses. C'est le cas des recherches de Merritt Ruhlen, qui

parallèlement à ses propositions à partir du seul matériel linguistique, tente en outre de mettre à profit des données extra-linguistiques pour étayer ces hypothèses.

Famille indo-pacifique et langues andamanaises

Le cas précédent des langues des îles Andaman peut être un exemple d'indices de l'existence de langues de type moderne très anciennes. Deux possibilités s'offrent en fait si l'on suppose que les populations de chasseurs-collecteurs des îles Andaman parlent une langue qui n'a pas été apportée depuis l'extérieur par des migrations postérieures à la migration initiale. Le premier cas est que les premiers arrivants parlaient déjà une ou des langues de forme moderne (c'est à dire comparables en sophistication aux langues actuelles), qui auraient ensuite évolué *in-situ* sans aucun contact. Une autre possibilité, ou plutôt un continuum de possibilités, serait que les premiers immigrants ne possédaient pas encore de stratégies linguistiques modernes, ou seulement un nombre restreint. Dans ce cas, la complexification de la langue se serait opérée sur place de façon indépendante. On aurait ici un scénario de polygenèse, à mettre en relation avec les propositions du chapitre 4 (impact de la fréquence des contacts sur la monogenèse ou la polygenèse des innovations).

Un élément intéressant à noter ici est l'existence et l'emploi fréquent d'une langue des signes dans les populations des îles Andaman, qui peuvent refléter les besoins de communication avec des étrangers ne parlant pas la langue locale, mais semblent plutôt corrélés à une tradition prononcée pour une représentation "théâtrale" et par gestes de différentes situations. Nous pouvons citer ici un passage de [Weber, 2002] :

"Play-acting often took the place of conventional verbal communications, an aspect of Andamanese that could be of interest to those concerned with the origins of language. There is a good description in Portman's book of how two Aka-Bea guides gave warning of nearby Jarawa to a British explorer in 1863, thereby providing the earliest known reference to that tribe :

Jacko pointed at my heart and represented the act of a savage aiming at me with his bow and arrow piercing my heart and my falling wounded, closing my eyes and expiring. Topsy also pathetically enacted the death scene, and both waved their hands deprecatingly in the direction disapproved of, and entreated me not to proceed further but to return... No doubt in this case inability to understand each other's language forced the two guides to use play-acting in order to make their point. Among Andamanese, returning successful hunters often told their tale not in words but by acting out the scenes of the hunt for the delectation of the spectators.

Il est possible de se poser la question de l'origine de cette tradition particulière, et se demander si elle ne trouve pas son origine dans un développement culturel local plus ou moins ancien.

Si nous avons mentionné plus haut la situation d'isolat linguistique des langues des tribus de chasseurs-collecteurs des îles Andaman, certains chercheurs ont néanmoins proposé des liens entre celles-ci et des langues de régions non adjacentes au Golfe du Bengale. Dans le cadre de sa proposition d'une macro-famille indo-pacifique, Greenberg a mis en particulier en avant la similarité des caractéristiques des systèmes pronominaux de nombreuses langues de Nouvelle-Guinée. Comme nous l'avons déjà mentionné, les systèmes pronominaux, et en particulier les formes des première et seconde personnes du singulier, sont censés être parmi les éléments linguistiques les plus stables et les plus robustes. Les cinq caractéristiques énoncées par Greenberg

pour les langues indo-pacifiques sont les suivantes [Whitehouse et al., 2002] :

1. un pronom de la première personne basé sur le son T ;
2. un pronom de la seconde personne basé sur le son N ou le son “ng” (comme dans le verbe anglais “to bring”) ;
3. un pronom de la troisième personne basé sur G ou K ;
4. une alternation vocalique entre la première et la seconde personne selon laquelle **u** est présent dans les formes sujets et **i** dans les formes possessives (ou obliques) ;
5. un suffixe possessif **-yi** trouvé dans tous les pronoms de la troisième personne ;

Les structures des langues des chasseur-collecteurs des îles Andaman, et en particulier leur système pronominal, se rapprochent de ceux des langues des îles de Nouvelle-Guinée, ce qui a conduit Greenberg à classer ces langues dans la famille indo-pacifique. Nous pouvons illustrer ceci de façon superficielle par un rapide examen des systèmes pronominaux. La table 5.2 rapporte les pronoms de plusieurs langues des chasseurs-collecteurs andamais, selon une transcription qui est précisée en annexe de cette thèse (et accompagnant une classification des langues andamaïses) [Weber, 2002].

person	Aka-Bea	Akar-Bale	A-Pucikwar	Oko-Juwoi	Aka-Kol	Onge
1st pers. sing.	dol-la	dol	tu-le	tu-le	la-tu-le	mi
2nd pers. sing.	ngol-la	ngol	ngu-le	nga-kile	la-ngu-le	eti
3rd pers. sing.	ol-la	ol	u-le	a-kile	laka-u-le	ngi
1st pers. plural	moloi-chik	maulo-chit	mu-le	me-kile	la-mu-le	ni
2nd pers. plural	ngoloi-chik	ngaulo-chit	ngu-wel	ngel-kile	la-ngu-wel	gi
3rd pers. plural	oloi-chik	aulo-chit	nu-le	ne-kile	kuch-la-nu-le	ekwi

TAB. 5.2 – Pronoms personnels des langues andamaïses

Nous pouvons analyser très sommairement cette table. Comme on peut le constater, les pronoms de la première personne du singulier sont effectivement basés sur le son [t] pour les langues A-Pucikwar, Oko-Juwoi et Aka-Kol. Deux formes voisines basées sur le son [d] sont utilisées pour l’Aka-Bea et l’Akar-Bale, et peuvent résulter d’un voisement d’un son [t] initial. En ce qui concerne la seconde personne du singulier, toutes les formes sauf celle de l’Onge sont basées sur le son “ng”. Le son [k] à la troisième personne se retrouve dans deux langues uniquement, mais une partie des autres formes peuvent résulter de la perte de ce phonème. Les sons [t] et [n] se retrouvent également dans les formes “thiobi” (“je suis”) et “niobe” (“tu es”) en Aka-Jeru.

Le système d’affixes des langues andamaïses est un système complexe qui ne trouve pas de semblable dans le reste de l’Asie, et dont le fonctionnement détaillé reste mal compris. Des préfixes peuvent être ajoutés pour indiquer les propriétés comme le genre, la longueur, la flexibilité, la rondeur. . . Des infixes en Onge ou Aka-Jeru sont utilisés pour marquer le singulier ou le pluriel, et enfin des suffixes peuvent marquer des fonctions ou des relations grammaticales [Weber, 2002].

Pour finir, le système numéral des langues des îles Andaman présente lui aussi quelques aspects intéressants. Nous pouvons une fois de plus rapporter les propos de Weber [ibid] :

“The Andamanese languages have only two cardinal numbers : in Aka-Bea this was uba-tul (“one”) and ikpor (“two”). Beyond that they had arduru (“several”), jegchau (“many”/human) jibaba (“very many”/human), ubaba (“very many”/non-human), atubaba (“countless”/human) and otubaba (“countless”/non-human). This is correct as far as it goes but it is not the whole story. The daily life of a simple hunter-gatherer society rarely needed counting beyond two, but if necessary, the Andamanese could express higher numbers by using sign language as we have briefly mentioned above. Portman lists numerals up to “five” in four southern languages but clearly limits their meaning by saying that “three” really meant “one more”, “four” meant “some more” and “five” meant “all.” These expressions of Andamanese higher mathematics have nevertheless found their way into some otherwise reliable works of reference as genuine numerals.

La table 5.3 présente pour finir les expressions numérales dans plusieurs langues des îles Andaman.

English	Aka-Bea	Akar-Bale	A-Pucikwar	Oko-Juwoi
one	ubatul	uba	lutuba	a-lungui
two	ik-paur	id-paurotot	ir-paur	re paur
three (“one more”)	ed-ar-ubai	ar-ubao-at	ar-lungi	n’ra-lungui
four (“some more”)	e-iji-pagi	idi-pagi-ke	iram-pai-ke	rem-pa-ke
five (“all”)	ar-duru	ar-pulia	ar-dire	a-chapar

TAB. 5.3 – Nombres des langues des îles Andaman

Ces particularismes donnent une fois de plus à réfléchir sur l’isolation et l’origine des populations andamaïses.

Kusunda, famille indo-pacifique et migrations humaines

Beaucoup plus récemment, et toujours en s’appuyant sur les systèmes pronominaux, Whitehouse et al. pensent avoir trouvé un lien entre une langue pratiquement disparue du Népal, le Kusunda, et les langues de la macro-famille indo-pacifique [Whitehouse et al., 2002]. Des évidences lexicales sont aussi proposées pour renforcer la plausibilité du lien linguistique.

L’hypothèse de travail est que l’ensemble des langues de la famille indo-pacifique peuvent être reliées à la première migration *Out of Africa* vers l’Asie, qui tout en suivant les côtes sud du continent asiatique, aurait pu s’aventurer jusqu’au Népal, avant d’atteindre la Nouvelle-Guinée. La proximité des systèmes pronominaux ne peut en effet pas s’expliquer selon eux par des emprunts ou des ressemblances fortuites :

“Certainly this unique pronominal pattern shared by Kusunda and Indo-Pacific languages cannot be a case of accidental convergence since the probability that Kusunda could have independently invented this intricate pattern is vanishingly small. Borrowing is equally unlikely since there is no evidence that Kusunda has ever been in contact with any Indo-Pacific language and, furthermore, Kusunda does not appear to be more closely related to one branch of Indo-Pacific than to another, which would be the case in the event of borrowing.” [Whitehouse et al., 2002]

Nos propositions sont pour partie en adéquation avec l’hypothèse de Ruhlen et des autres auteurs de l’article. Un lien entre langues des îles Andaman et certaines langues de Nouvelle-Guinée serait pertinent dans le cadre d’une migration hors d’Afrique le long de côtes asiatiques,

laissant son empreinte linguistique une première fois dans l’Océan Indien, puis au bout de sa course dans l’Océan Pacifique. Le lien supplémentaire avec une langue du Népal, pays très éloigné des côtes sud-asiatiques, est cependant plus difficile à expliquer.

Le cas des îles Andaman est de plus particulièrement intéressant pour nos hypothèses de polygénèse des structures linguistiques. En effet, nous pensons que la langue des signes qui s’intègre de façon particulière aux langues orales (en particulier au niveau des systèmes numériques) aurait pu apparaître de façon endogène dans les îles Andaman après les premières migrations intentionnelles. Dès lors, une partie des composantes qui forment les langues andamaïses pourrait provenir de formes ancestrales nées peu de temps après la spéciation qui a mené à notre espèce, alors que d’autres seraient apparues plus tardivement dans les populations isolées.

Pour conclure, nous pouvons dire qu’une confirmation génétique de l’ancienneté des populations andamaïses fournirait une nouvelle pièce à un puzzle qui semble de plus en plus cohérent, tant au niveau comportemental (culture côtière, navigation...), qu’aux niveaux génétique (évidences de la migration, divergence importante des populations papoues des Highlands) et linguistique (propositions de Greenberg et Ruhlen).

5.3.3 Apparition d’*Homo sapiens*, liage spatio-temporel et stratégies linguistiques modernes

Dans cette dernière section de chapitre, nous souhaitons déterminer partiellement les sous-bassements des stratégies linguistiques modernes.

Au cours des lignes précédentes, nous avons insisté de façon plus ou moins manifeste sur le rôle de la planification des actions pour nombre de manifestations comportementales d’*Homo sapiens*. En particulier, la traversée de larges étendues d’eau nécessite une préparation importante avant le départ. Si la planification nous semble un élément clé de la modernité des comportements de notre espèce, nous allons cependant tenter dans les prochains paragraphes de l’inclure dans un mécanisme cognitif plus général, que nous appellerons *liage représentationnel spatio-temporel*. Après avoir détaillé ce mécanisme, nous tenterons de le relier à l’existence de certaines structures linguistiques, avant de conclure en examinant les possibles modifications cérébrales ayant pu conduire au développement de cette capacité.

Planification et liage représentationnel spatio-temporel

La planification telle que nous l’avons évoquée plus haut nécessite une certaine projection dans le futur : elle nécessite en effet, afin d’envisager certaines actions et d’évaluer leurs possibles conséquences, de créer des représentations mentales de situations ultérieures. En outre, ces situations ne se trouvent pas nécessairement dans l’environnement spatial immédiat de l’individu. Il existe donc une discontinuité spatio-temporelle entre ce qu’il est convenu d’appeler l’“ici et maintenant” et la situation qui fait l’objet de représentations.

L’élaboration de représentations cognitives sur des situations futures ou distantes spatialement n’est pas le seul élément significatif. Il importe en effet de réaliser une liaison entre ces représentations et celles liées à la situation actuelle de l’individu.

Nous souhaitons introduire la notion de *liage représentationnel spatio-temporel* ou plus simplement de *liage spatio-temporel* pour rendre compte du phénomène précédent. Cette expression désigne la faculté de lier des représentations portant sur différentes époques temporelles et/ou différentes régions spatiales. Par époque temporelle, nous englobons des notions comme celles de passé, présent ou futur au sens large. La projection peut être plus ou moins distante,

c'est à dire considérer des époques plus ou moins éloignées dans le temps, et de façon identique des lieux plus ou moins distants de la sphère immédiate d'activité du sujet.

Par la suite, nous allons néanmoins surtout nous concentrer sur la dimension temporelle du liage, et réduirons le terme défini plus haut à celui de "liage temporel".

Si la planification repose sur l'établissement de liens entre présent et futur, le liage temporel s'étend en fait pour nous aux deux directions de l'axe temporel. Dans les exemples qui suivent, nous insistons également sur le fait que le liage spatio-temporel peut porter non seulement sur des représentations cognitives mettant un jeu le seul individu qui les produit, mais également sur des représentations faisant intervenir différents individus. Ceci nous semble souligner une fois de plus l'importance de la sociabilité de notre espèce, et le fait que nos représentations cognitives portent en bonne partie sur nos interactions avec autrui. Les nombreux exemples donnés par de Waal sur les interactions complexes entre individus dans les communautés de primates laissent supposer que les singes ont déjà (sur l'échelle évolutive) la capacité de former des représentations cognitives mettant en scène plusieurs individus, et non seulement eux-mêmes [De Waal, 1998]. Plus précisément, des relations causatives sont vraisemblablement déjà présentes, puisqu'un singe peut imaginer des plans faisant intervenir un autre individu (par exemple pour le protéger, ou se joindre à lui dans une coalition).

Notons pour conclure la proximité de la notion de *liage représentationnel spatio-temporel* telle que nous l'avons introduite ici avec celle de *scope blending* développée par Fauconnier et Turner. Ce concept est utilisé dans certains modèles de grammaires cognitives [Fauconnier and Turner, 1996], et plus généralement dans de nombreuses disciplines s'intéressant aux capacités conceptuelles humaines. Comme nous l'avons déjà souligné au chapitre 1, les deux auteurs insistent sur l'importance du *blending* conceptuel pour rendre compte des comportements modernes de notre espèce. Toutefois, tout en reconnaissant la richesse de ce cadre dont nous sommes inspirés, nous nous concentrerons par la suite sur les aspects des relations (spatio-)temporelles entre représentations cognitives.

Liage temporel et comportements modernes de notre espèce

Nous pouvons lister un ensemble de comportements spécifiques à notre espèce, et qui nous semblent relever de la notion précédente.

En ce qui concerne les traversées maritimes et l'idée de motivation que nous avons introduite pour les justifier, une mise en relation entre le présent d'une existence sur le site de départ et un futur possible dans un autre endroit rend possible l'existence d'un but à long terme partagé entre les individus.

Si l'on songe à la proposition de Victorri [Victorri, 2000] d'une utilisation du langage pour éviter les conflits par la ré-activation en mémoire collective de conflits passés, on peut y voir une autre liaison cognitive entre des événements appartenant cette fois au passé et des événements du présent ou d'un futur proche. L'utilisation de représentations cognitives qui portent sur des événements passés permet de modifier des représentations d'une époque différente.

L'existence de sépultures accompagnées d'offrandes est un troisième exemple de liage temporel : les offrandes sont souvent analysées par les archéologues ou les anthropologues comme des présents ou des aides pour une vie future après la mort. Si l'on se fie aux religions de peuples sans écriture, l'enterrement lui-même peut être justifié par le fait qu'il assure la croissance d'un nouvel être, la résurrection ou encore une destinée végétale impliquant la survie dans l'au-delà. . . [Mircea and Couliano, 1990] (p. 263). Encore une fois, la conception d'événements futurs entre

en lien avec des événements présents, et les offrandes traduisent de façon concrète le liage temporel entre le présent et un futur hypothétique. Notons ici que les représentations cognitives ne se rapportent pas nécessairement à soi, comme mentionné plus haut, et que le futur ici envisagé est de nature beaucoup plus abstraite, car hors de portée des individus qui le conçoivent.

L'art présente aussi un rapport particulier à la temporalité, dans le sens où il représente une a-temporalisation de la scène représentée. Si l'on songe aux représentations picturales de scènes de chasse, le lien entre l'homme et la nature se trouve inscrit sur la pierre et acquiert une dimension religieuse ou méta-physique par son caractère représentationnel et détaché de la réalité immédiate. Cette vision particulière de l'art comme moyen d'échapper au temps se retrouve tout au long de la réflexion philosophique sur ce sujet. Citons ici Oscar Wilde :

“La statue est concentrée dans un unique moment de perfection. L'image qui colore la toile ne possède aucun élément spirituel qui la ferait progresser ou changer. Si image et statue ne savent rien de la mort, c'est parce qu'elles ne savent pas grand chose de la vie, car les secrets de la vie et de la mort appartiennent à ceux, et seulement à ceux qu'affecte le déroulement du temps et qui ne possèdent pas seulement le présent mais aussi le futur et peuvent se relever d'un passé de honte ou sombrer après un passé de gloire.” [Wilde, 1995] (p. 60-61)

La maîtrise de plus en plus grande de son environnement par l'homme moderne nous semble être un dernier exemple d'une meilleure maîtrise de la temporalité.

Un premier élément concerne la modification des activités de chasse chez *Homo sapiens*. Ce dernier se démarque de ses prédécesseurs *erectus* en s'appuyant sur le rythme des saisons pour la capture du gibier. Cet aspect dénote encore une fois une plus grande maîtrise de la temporalité, avec une planification de l'abondance des ressources à des époques futures plus ou moins éloignées du présent.

Un second exemple de meilleure maîtrise de l'environnement concerne la modification de celui-ci pour le développement de cultures. Le développement de l'agriculture il y a environ 10,000 ans est un événement majeur dans ce sens : elle s'appuie sur des cycles temporels de plusieurs mois, et les paysans doivent comprendre et suivre les rythmes de développement des différents végétaux pour tirer leur subsistance du sol. Nous pouvons noter toutefois que la modification de l'environnement à des fins de subsistance est probablement plus ancienne que le Néolithique. Plusieurs études ont insisté sur le probable développement des populations de Nouvelle-Guinée il y a plusieurs dizaines de milliers d'années, en particulier en ce qui concerne leur maîtrise de l'environnement. Groube et al., à partir de l'analyse des outils de la péninsule du Huon, proposent qu'ils aient pu servir à abattre les arbres aux abords des forêts. L'arrivée conséquente de la lumière jusqu'au sol aurait alors favorisé la croissance et l'expansion de différentes plantes comestibles, comme la canne à sucre, les bananes... [Groube et al., 1986]. Si l'on ne peut pas encore parler d'agriculture au sens propre, l'exemple précédent peut néanmoins être considéré comme une étape préliminaire. Ces propositions vont dans le sens d'une modification intentionnelle et planifiée de l'environnement, mettant en jeu des raisonnements sur la temporalité des actions entreprises :

“... it is quite astonishing to consider that people in New Guinea were using such tools and modifying their environment in such a way at a time when there were still Neanderthal people occupying western Europe.” [Jones, 1992] (p. 297)

Notons pour conclure que le liage temporel n'était probablement pas absent chez nos ancêtres plus lointains, et existe également de façon rudimentaire chez de nombreux animaux,

par le biais par exemple d'une mémoire apte à mémoriser des séries d'éléments³⁸. Ceci est démontré par exemple par les tâches d'ordonnancement sériel chez des espèces de singes ou d'oiseaux [Terrace, 2000]. Néanmoins, nous émettons l'idée qu'un saut qualitatif s'est produit lors de l'émergence de notre espèce. Si les comportements de notre espèce que nous venons d'évoquer étaient sous-tendus par des raisonnements plus élémentaires, nous devrions alors retrouver leur trace chez des espèces plus anciennes, ce qui n'est apparemment pas le cas.

Liage temporel et structures linguistiques

Si le liage temporel nous semble participer à l'explication d'une partie des comportements modernes, nous pensons qu'il a pu jouer également un rôle important au niveau linguistique. La liaison entre des représentations appartenant à des séquences temporelles différentes nous semble avoir de multiples instanciations au niveau linguistique.

La notion d'aspect pour les actions permet tout d'abord de représenter partiellement la temporalité d'événements ou de séquences d'événements. Si l'on considère l'exemple suivant en français "Il pleuvait depuis des heures quand tout à coup le soleil réapparut", la différence d'aspect entre les deux verbes permet de lier temporellement une période et un événement. En mandarin, des particules comme *le*, qui exprime l'aspect accompli, ou des structures comme les complexes (verbe d'action principale + verbe résultatif) (par exemple le verbe résultatif *wán* qui signifie finir), marquent également la liaison entre des périodes temporelles différentes.

Le mode est une autre caractéristique linguistique qui peut mettre en valeur des relations temporelles entre différents prédicats. On distingue par exemple en français les 4 modes indicatif, impératif, conditionnel et subjonctif, bien que la frontière entre ces deux derniers soit assez floue. L'utilisation du conditionnel en particulier renvoie à un futur hypothétique qui nécessite un liage temporel entre des représentations de ce futur et d'autres liées à la situation actuelle de l'individu.

L'expression linguistique de la causation est un autre sujet intéressant vis à vis de nos propositions, et renvoie à la remarque formulée plus haut sur l'utilisation du langage dans un contexte social. Shibatani et Pardeshi, dans leur présentation de la causation, mettent en évidence différents types causatifs illustrés par la figure 5.14 (**A** signifie *Agent* et **P** *Patient*) [Shibatani and Pardeshi, 2001] (p. 101). Un premier type est celui de la causation directe, située à gauche sur la figure, qui correspond à une intervention physique et active du causateur dans la réalisation de l'événement causé. Dans le second cas dit de causation indirecte, le causateur n'intervient pas directement dans la réalisation concrète de l'action causée : un causataire entre en jeu pour servir de lien entre le causateur et l'événement causé. Alors que dans le premier cas, le causateur joue en fait le rôle de causataire et qu'un seul contexte spatio-temporel peut être mis en jeu (mais pas nécessairement), le second cas de figure implique nécessairement la mise en relation de deux contextes différents, qui se distinguent soit au niveau spatial, soit au niveau temporel, voire les deux [Thèse en cours de Sylvie Nougulier et communication personnelle].

La causative indirecte met en jeu un individu ou une entité différent de soi, et nécessite la possibilité de pouvoir formuler cognitivement et manipuler des raisonnements incluant ces derniers. Si l'on se réfère à la notion de liage représentationnel, il apparaît que les causatives indirectes ne sont possibles à un niveau cognitif que si le locuteur est capable de "gérer cognitivement" les différents contextes temporels et éventuellement spatiaux dans lesquels il se trouve

³⁸Il est en fait difficile de tracer une frontière entre de réelles représentations cognitives et des comportements plus automatiques, et le passage des seconds aux premières s'est sûrement effectué de façon graduelle.

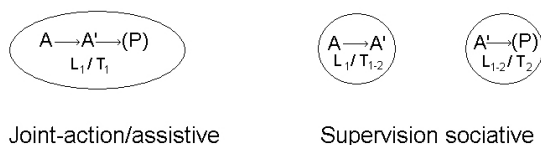


FIG. 5.14 – Différents types causatifs, reproduction d’après [Shibatani & Pardeshi, 2001] (p. 101)

et où se trouve le causataire. Ceci renvoie à la capacité de pouvoir se projeter dans la situation du causataire, et de lier cette dernière aux représentations sur l’“ici et maintenant”.

La maîtrise de telles représentations cognitives rend alors envisageable une projection linguistique du lien qui les unit. Des stratégies linguistiques spécifiques peuvent alors être mises en oeuvre pour réaliser cette opération.

Notre approche générale du langage en tant que phénomène cognitif est une approche de type fonctionnaliste. Nous pensons que les mécanismes cognitifs langagiers s’inscrivent dans un cadre cognitif plus général, et qu’incidemment, le développement des capacités cognitives générales a conduit au développement du langage. La logique de nos arguments est alors la suivante : lors de l’émergence de notre espèce, une modification partielle de la cognition générale de nos ancêtres a conduit à une plus grande maîtrise des liens temporels entre représentations cognitives, qualitativement différente de celles des espèces précédentes. Pour reprendre une notion introduite au chapitre 4, ce *potentiel cognitif* s’est ensuite instancié dans les langues selon différentes stratégies, comme celles qui peuvent correspondre aux exemples précédents. En plus des progrès liés à la nouvelle capacité de liage temporel à un niveau purement cognitif, son expression dans le langage a selon nous augmenté de façon très significative la capacité de transmission des représentations cognitives des locuteurs. Ceci a permis la réflexion et l’extension au niveau communal de la capacité initialement individuelle, avec de nombreuses conséquences sur le mode de fonctionnement des sociétés humaines (confère exemples donnés précédemment).

Les stratégies linguistiques qui ont permis la projection de la capacité cognitive de liage temporel au niveau linguistique sont pour nous une partie des stratégies qui caractérisent les langues dites modernes. Ce sont elles qui représentent partiellement les dernières transformations linguistiques menant aux langues contemporaines, et leur émergence a pu éventuellement se produire par polygénèse (voir chapitre 4). Les traversées maritimes vers l’Australie et les îles Andaman nous amènent en outre à penser que les populations concernées possédaient déjà de telles stratégies, et parlaient donc des langues aux caractéristiques déjà très modernes.

Pour clore notre argumentation, il nous reste à examiner comment la fonction cognitive de liage temporel a pu émerger lors de la spéciation vers notre espèce. Si cette question ne peut être résolue nettement, les paragraphes suivants ouvrent quelques pistes de réflexion.

Emergence de l’espèce et accroissement des capacités de planification et de liage

Différentes pistes nous ont conduit à la formulation de nos hypothèses sur le liage temporel. L’évolution du lobe frontal est un premier aspect que nous allons développer.

Les lobes frontaux sont considérés comme le centre de contrôle de nos émotions et de nos

actions, et participent de ce fait à la construction de notre personnalité [Lehr Jr., 2002]. Ces aspects concernent entre autres le langage, et plus particulièrement les associations entre le sens et la forme des mots. Des lésions de cette région peuvent conduire à des difficultés pour la résolution de problèmes, des phénomènes de persévération ou de perte d'attention, une aphasie de Broca, ainsi que des modifications du comportement en communauté du sujet, comme une levée de certaines inhibitions sociales ou des changements de la personnalité [ibid]. Phileas Gage, dont le lobe frontal fut gravement endommagé à la suite d'une perforation par une poutrelle métallique en 1848, est un exemple célèbre des altérations de la personnalité qui peuvent survenir en cas de lésion du cortex frontal [Coolidge and Wynn, 2001] (p. 255).

Le cortex pré-frontal, situé à l'avant des cortex moteurs du lobe frontal, joue un rôle majeur dans le contrôle et la planification des actions. Ceci est rendu possible par les nombreuses connexions de cette région avec d'autres aires corticales, et en partie le système limbique. Le cortex frontal peut-être divisé en plusieurs sous-régions de cyto-architectures et de fonctions différentes [Lehr Jr., 2002] :

- les lobes frontaux dorso-latéraux sont associés aux fonctions de mémoire de travail et de planification ;
- les parties plus médiales sont proches du cortex cingulaire et des aires motrices supplémentaires, et jouent un rôle dans l'initiation des programmes moteurs ;
- le cortex orbito-frontal est connecté au cortex limbique dans les aires temporales antérieures, et paraît jouer un rôle dans les associations émotionnelles et motivationnelles.

Étudiées en particulier par le neuro-psychologue Luria dans les années 1970, les "fonctions exécutives" regroupent les capacités du lobe frontal à prendre des décisions, former des buts, planifier et organiser des stratégies pour atteindre ces buts, ou encore changer de stratégies lorsque des premières tentatives ont échoué [Coolidge and Wynn, 2001] (p. 256). La capacité à intégrer des informations le long des dimensions spatiale et temporelle est une autre caractéristique des fonctions exécutives (p. 256), qui est bien sûr à mettre en relation avec nos propositions.

Le développement du cortex pré-frontal est une caractéristique de la phylogénie de notre espèce. Deacon insiste sur ce point, en lien avec l'émergence des capacités symboliques, et met en valeur la transition qui s'est vraisemblablement opérée entre les Australopithèques et le premier représentant du genre *Homo* : *Homo habilis* [Deacon, 1997] (p. 343-344).

Coolidge et Wynn proposent pour leur part qu'une mutation génétique, apparue entre 30,000 et 100,000 BP, soit à l'origine de modifications importantes des fonctions exécutives chez notre espèce [Coolidge and Wynn, 2002]. Sans nécessairement invoquer une telle mutation, de nombreux neurologues associent le cortex frontal aux comportements modernes d'*Homo sapiens* [Balter, 2002] (p. 1222). La figure 5.15 illustre le développement de ce cortex à travers l'évolution de la boîte crânienne entre *Homo erectus* et *Homo sapiens*.

Une partie des fonctions du cortex frontal est en lien avec le liage spatio-temporel. En effet, que ce soit la planification, l'expression d'inhibitions sociales ou la résolution de problèmes, toutes requièrent une association entre des représentations cognitives sur l'état présent du sujet et des représentations sur des états futurs hypothétiques (par exemple sur la situation négative dans laquelle se trouvera le sujet s'il produit telle ou telle action en société). Dès lors, on peut envisager raisonnablement que le développement volumique du cortex frontal au cours de l'évolution s'est accompagné d'un renforcement de ces fonctions, parallèlement aux capacités symboliques, comme le suggère Deacon. Les liaisons avec le système limbique ont probablement permis en particulier de réfréner les actions de type émotionnel, qui sont fréquentes chez les

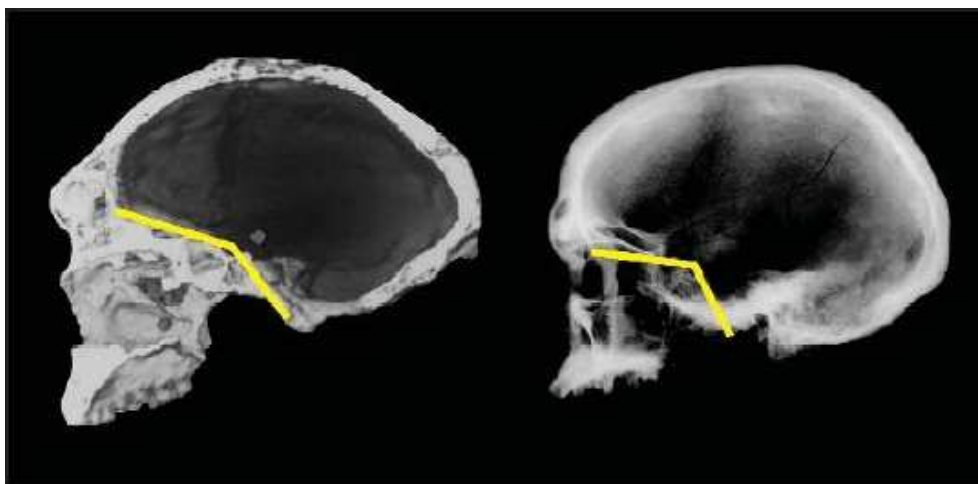


FIG. 5.15 – Comparaison des structures crâniennes d'*Homo erectus* (gauche) et d'*Homo sapiens* (droite), reproduction d'après [Balter, 2002] (p. 1220)

primates, y compris pour l'émission de vocalises. Cet accroissement du contrôle de son comportement ouvre la voie à de nombreuses activités élaborées, soit en se projetant de façon interne dans le futur ou en un autre lieu, soit en tenant compte de façon plus précise des événements passés mémorisés.

Le liage spatio-temporel a pu commencer à se développer dès *Homo habilis*, et permettre au sujet de commencer à se dégager de l'“ici et maintenant” dans ses activités. L'apparition de pierres taillées présentant une symétrie, et donc une pré-conception de l'état final de l'artéfact, va dans ce sens. Une évolution qualitativement significative s'est cependant produite plus tardivement, lors de l'émergence de notre espèce.

5.4 Conclusions

Les traversées maritimes intentionnelles sont pour nous la preuve d'un développement technologique et linguistique. Pouvoir attribuer leur maîtrise à une espèce humaine et une époque de la préhistoire peut permettre de mieux déterminer les capacités cognitives et langagières de nos ancêtres. Les *Homo erectus* de la région indonésienne avaient-ils atteint ce degré de développement, ou celui-ci reste-t-il le propre d'*Homo sapiens*? La question n'est pas résolue. Tout au plus pouvons nous dire que les capacités symboliques, les manifestations de planification, et les comportements complexes des *Homo sapiens* semblent les différencier nettement de leurs ancêtres, et attribuer à notre espèce les premières traversées intentionnelles et motivées.

La convergence de données archéologiques, anthropologiques et génétiques convergent de plus en plus vers un scénario d'apparition des hommes modernes en Afrique en l'est, suivie d'une première migration vers l'Asie le long des côtes asiatiques. Jeter un pont entre l'émergence et la diffusion d'*Homo sapiens*, et celles du langage moderne et des langues est un défi pour la linguistique et les disciplines qui s'y associent dans l'étude de l'Homme. Nous pensons que les îles Andaman, ainsi que les langues de leurs habitants les plus anciens, représentent la trace des premières migrations hors d'Afrique, et associent donc celles-ci avec les langues contemporaines. Nous estimons en outre que ces dernières peuvent éventuellement renforcer nos hypothèses sur

la polygenèse des stratégies linguistiques, puisque des manifestations spécifiques séparent les langues andamaïses des autres langues de la famille indo-pacifique.

Par l'analyse plus précise des comportements spécifiques de notre espèce, nous pensons que les capacités de planification, et plus généralement de liage représentationnel cognitif, sont à la base d'une partie de notre distinction cognitive et comportementale par rapport à nos ancêtres plus lointains. Tout en reprenant ce schéma d'évolution déjà introduit par d'autres, nous proposons que ces capacités se soient traduites dans les langues du monde par l'émergence de stratégies linguistiques permettant l'encodage des relations temporelles entre représentations cognitives. Ces relations peuvent s'étendre à des représentations mettant en jeu l'individu lui-même ou ses congénères, et ont ainsi joué selon nous un rôle fondamental dans la réflexion au niveau social des capacités cognitives précédentes, permettant une complexification très importante du lien social entre individus et surtout de la représentation de ce lien par ces derniers. L'ensemble de ces caractéristiques sociales et cognitives se sont développées suite à la spéciation de notre espèce, par des modifications cérébrales, en particulier au niveau du cortex frontal.

Insistons ici sur le fait que nous ne pensons pas que la distinction des langues modernes se trouve dans le passage d'un proto-langage à un stade syntaxique. Nous pensons plutôt que l'évolution des langues s'est toujours faite de façon grammaticale, et que des structures syntaxiques de plus en plus complexes ont accompagné l'évolution des langues. L'évolution des langues est plus à rechercher dans la réflexion linguistique des capacités cognitives qui se sont développées au cours du temps.

A la suite de ce chapitre et du chapitre précédent, qui ont permis de détailler quelques aspects de l'émergence des langues modernes, il nous reste à nous pencher sur l'évolution de celles-ci, en particulier au cours des Paléolithiques Moyen et Supérieur. La question principale est de savoir s'il est pertinent de contraster l'évolution des langues à cette époque par rapport aux époques contemporaines beaucoup mieux connues. Une fois de plus, des modèles informatiques nous seront utiles pour aborder cette problématique, vers laquelle nous nous tournons maintenant.

Chapitre 6

Un modèle préliminaire des changements linguistiques

*Une somme d'expériences ne peut jamais me prouver que j'ai raison ;
une seule expérience peut n'importe quand me prouver que je me suis trompé.*
Albert Einstein.

Nous avons tenté dans le deuxième chapitre de cet ouvrage d'offrir une vision générale des changements linguistiques. Pour cela, nous avons d'une part abordé les concepts de la sociolinguistique pour rendre compte du problème de l'implémentation du changement dans une communauté linguistique et du poids des liens sociaux. D'autre part, nous avons insisté sur les aspects internes et systémiques des systèmes linguistiques, dans la lignée de l'approche structuraliste Saussurienne. Ces phénomènes jouent également un rôle dans l'actuation et dans l'implémentation d'un changement. Toutefois, aujourd'hui, si les travaux portant sur l'un ou l'autre de ces aspects sont nombreux, l'étude de l'intersection des contraintes sociales et des contraintes systémiques des langues demeure un problème difficile, de part la difficulté de pouvoir étudier "naturellement" (en situation) l'interaction des structures linguistiques dans un contexte social.

Nous souhaitons aborder ici ce problème de façon très modeste. Dans la lignée des travaux de Nettle [Nettle, 1999b] [Nettle, 1999c] [Nettle, 1999a], nous pensons que les modèles informatiques constituent un outil utile pour dégager les tenants et les aboutissants de ces phénomènes.

A cette fin, nous présentons tout d'abord un modèle des changements linguistiques, que nous détaillons selon ces composantes internes et sociales (externes).

Ceci fait, dans une seconde partie, nous présentons différentes expériences informatiques afin de dégager quelques implications de notre modèle, et voir si celles-ci ont une pertinence vis à vis des changements réels des langues du monde. Nous examinons ainsi successivement la dynamique d'évolution d'un unique système soumis à un certain jeu de contraintes naturelles et distribuées, puis l'impact des interactions sociales entre les individus. Dans le cadre de notre questionnement sur l'origine et le développement des langues, notre dernier objectif est alors de mettre à profit les résultats précédents pour contraster même très partiellement les évolutions des langues contemporaines et celles des langues de la préhistoire. L'influence des structures démographiques décrites au chapitre 4 sera au cœur de nos interrogations.

6.1 Description du modèle

6.1.1 Introduction à la notion d'optimisation et aux techniques mathématiques de minimisation de fonction

Avant de rentrer précisément dans le modèle qui nous intéressera dans ce chapitre, il est nécessaire d'introduire rapidement quelques concepts mathématiques liés à l'optimisation de fonction. Ces notions seront en effet utiles pour comprendre les différentes dynamiques d'évolution des systèmes linguistiques que nous introduirons par la suite.

Notion d'optimisation de fonction et paysages énergétiques

Le domaine mathématique des techniques d'optimisation a pour objet la recherche des optima de fonctions de une ou plusieurs variables de la façon la plus efficace qui soit. L'optimisation de fonction joue un rôle important dans le domaine de l'analyse numérique, qui concerne des problèmes mathématiques qu'il n'est pas possible de traiter de façon analytique, et qui requièrent donc des approches numériques pour être résolus³⁹.

Nous avons rapidement présenté au chapitre 2 la notion de paysage énergétique (*fitness landscape*) et l'existence dans ces paysages de puits qui correspondent à des minima énergétiques. Le plus souvent, le but d'une étude est la découverte des puits de plus grande profondeur, qui correspondent à des états particuliers et "intéressants" du système, par exemple en termes de performances pour un ingénieur. L'optimisation correspond le plus souvent à une minimisation de fonction (bien que minimisation ou maximisation soient des opérations totalement symétriques), et la fonction à minimiser est le plus souvent celle qui permet le calcul de l'énergie du système à partir des paramètres qui régissent ce dernier.

Nous pouvons citer comme exemple très actuel la découverte des minima énergétiques dans l'espace des conformations de molécules, qui correspondent aux formes que pourra prendre une molécule en réponse à ses contraintes internes.

Découvrir un minimum d'énergie (un puits) est une tâche relativement difficile puisque la topographie du paysage est généralement inconnue et qu'un nombre de paramètres un tant soit peu élevé conduit à un immense domaine dont l'exploration exhaustive à la recherche de minima énergétiques est computationnellement trop difficile.

Différentes techniques sont envisageables pour rechercher les minimaux énergétiques (voir par exemple [Ciarlet, 1982]). Une classification de ces méthodes peut se faire selon leur ordre, c'est à dire selon leur utilisation des dérivées de la fonction de calcul d'énergie. Une méthode d'ordre 0 consiste simplement à calculer la valeur de l'énergie en des points formant un maillage de l'espace des paramètres, et à choisir le point d'énergie minimale. Bien sûr, plus la densité du maillage sera fine, plus la valeur trouvée sera proche de l'optimum réel. Encore une fois, le problème est qu'un grand nombre de paramètres conduira à un nombre gigantesque de points pour un maillage de forte densité, forte densité nécessaire pour surmonter les possibles variations abruptes de la fonction selon certains paramètres.

D'autres méthodes d'ordre 0 peuvent emprunter à ce qu'il est convenu d'appeler les méthodes de Monte-Carlo (sous ce terme se cachent un grand nombre de méthodes dans de multiples dis-

³⁹C'est le cas actuellement de très nombreuses équations aux dérivées partielles, que ce soit en physique, en chimie...

ciplines), qui consistent à effectuer des échantillonnages stochastiques de l'espace énergétique pour tenter de découvrir les minima à l'aide de méthodes statistiques.

Les méthodes d'ordre 1, comme la méthode de plus grande pente (*steepest descent*) ou celle des gradients conjugués (*conjugated gradients*) mettent à profit la dérivée première de la fonction énergétique. Les méthodes d'ordre 2, comme la minimisation de Newton-Raphson, prennent en compte la courbure de la fonction d'énergie pour converger encore plus vite vers un minimum. Dans tous les cas, le principe est de partir d'une position initiale dans l'espace des paramètres, et d'envisager une évolution du système (par modification des paramètres) qui suive les structures du relief vers les points de plus faible altitude (plus la méthode est d'ordre supérieur, plus le relief est suivi "intelligemment" et rapidement vers le minimum). Arrivé à un minimum (dérivée de la fonction d'énergie nulle, courbure positive), le système se stabilise.

Le principal problème dans la recherche des minima absolus (c'est à dire les puits les plus profonds) est la possibilité que les méthodes précédentes (d'ordre 1 ou plus) conduisent à un minimum **local**. Par la nature même du procédé de calcul, il est en effet possible que le système se stabilise dans un minimum qui ne soit pas le minimum absolu du système, mais seulement un minimum pour une partie de l'espace des paramètres.

Suivant la position initiale du système dans le paysage énergétique et la topographie de ce dernier, un chemin qui suit les reliefs va emmener le système vers un puits du paysage où il se stabilisera. La notion d'**attracteur** dans un paysage énergétique définit un point de ce dernier qui "attire" à lui les éléments en déplacement. Le **bassin d'attraction** correspond quant à lui à la région du paysage où un système sera capté et attiré par l'attracteur, et se dirigera vers lui au cours de son évolution. Dans notre cas, les puits d'énergie correspondent aux bassins d'attraction d'attracteurs constitués des points de plus faible altitude dans ces puits. Suivant le bassin d'attraction dans lequel se trouvera initialement un système sur le relief, la progression se fera vers l'attracteur correspondant.

Différentes méthodes permettent d'essayer de se sortir de la situation délicate des minima locaux (ceci ne constituera cependant pas un problème pour nous par la suite). Il est tout d'abord possible d'examiner un ensemble de configurations initiales réparties dans l'espace des paramètres. Une seconde possibilité est, lorsque le système s'est stabilisé dans une certaine configuration des paramètres, de tenter des sauts aléatoires, sans tenir compte du relief (autrement dit des barrières énergétiques). Ceci permet de voir si le système, après un saut, peut voir son énergie diminuer par rapport à la valeur du premier minimum. Si tel est le cas, le minimum était local et non absolu, et le système peut recommencer son évolution graduelle et conforme au relief à partir de la nouvelle position atteinte. La méthode emprunte donc à différentes techniques d'ordres différents.

Les figures 6.1 et 6.2 permettent d'illustrer différents types de situation (surfaces dessinées grâce au logiciel Matlab 6.0). Dans le premier cas, un optima absolu existe dans le paysage et son bassin d'attraction (quoique peu marqué) couvre l'ensemble du paysage. Quel que soit le point de départ de l'évolution du système, ce dernier finira par rejoindre au bout d'un certain temps le minimum absolu.

Dans le second cas, deux minima relatifs existent dans le paysage. Suivant la configuration initiale du système et le bassin d'attraction dans lequel il se trouve, il rejoindra l'un des deux minima, comme le montrent les deux évolutions représentées par les trajectoires rouges.

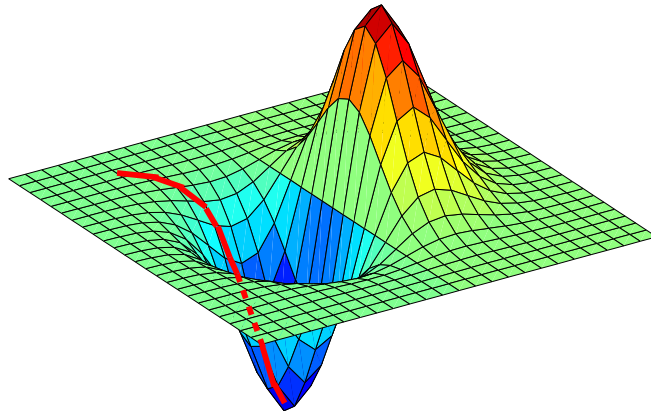


FIG. 6.1 – Paysage énergétique avec un minimum absolu

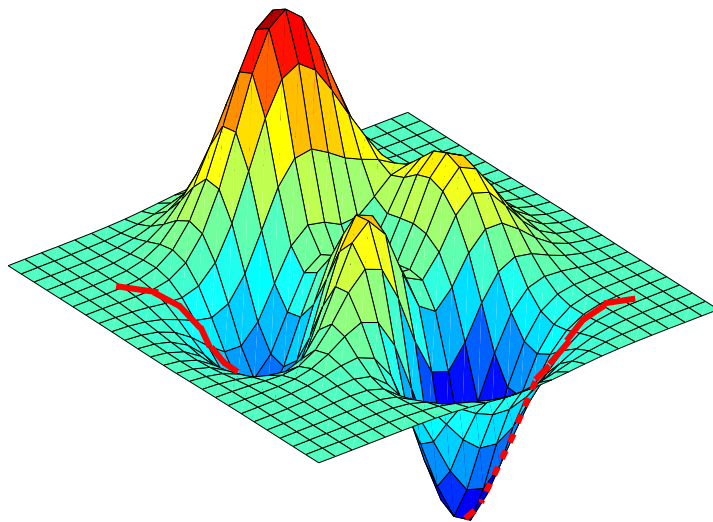


FIG. 6.2 – Paysage énergétique avec deux minima locaux

Introduction mathématique aux techniques de descente de gradient

Afin d'aborder correctement les paragraphes suivants et le modèle d'évolution linguistique, il nous paraît préférable de commencer par présenter la technique de recherche de minimum de fonction par méthode de *steepest descent* dans un cas général.

Soit une fonction f de n paramètres (x_1, x_2, \dots, x_n) . La méthode de *steepest descent* permet de mettre à jour le minimum local de la fonction "le plus proche" (selon la notion de bassin d'attraction et non de distance euclidienne) d'un jeu de paramètres initial $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$. L'idée est d'envisager une suite de modifications locales des paramètres qui suivent le chemin de plus grande pente du paysage énergétique (déterminé par la fonction f) vers le minimum. Dit autrement, chaque modification des paramètres est localement optimale : chaque paramètre varie indépendamment de façon à diminuer la valeur de la fonction f sur sa dimension.

Une analogie de raisonnement est ici l'algorithme de rétro-propagation du gradient qui permet l'apprentissage des perceptrons multi-couches. Une évolution au cours du temps vers un minimum de la fonction f se traduit par la condition suivante :

$$\frac{df}{dt} \leq 0$$

La fonction f est une fonction des paramètres (x_1, x_2, \dots, x_n) . Puisque nous envisageons une évolution de ces paramètres au cours du temps, ils dépendent également de cette variable, et il est dès lors possible de décomposer la dérivée $\frac{df}{dt}$ comme suit :

$$\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \times \frac{\partial x_i}{\partial t} \right)$$

La première condition devient dès lors :

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \times \frac{\partial x_i}{\partial t} \right) \leq 0$$

Une des façons de définir l'algorithme de *steepest descent* est de remplacer cette nouvelle condition par l'ensemble des conditions suivantes⁴⁰ :

$$\forall i \in [1, \mathbf{n}], \quad \frac{\partial f}{\partial x_i} \times \frac{\partial x_i}{\partial t} \leq 0$$

En définissant un paramètre réel α positif, il est encore possible de réécrire ces conditions de la façon suivante :

$$\forall i \in [1, \mathbf{n}], \quad \frac{\partial f}{\partial x_i} = -\alpha \times \frac{\partial x_i}{\partial t}$$

⁴⁰Notons ici que la condition peut-être satisfaite de multiples façons, certains produits de la somme pouvant être positifs bien que la somme soit négative. Considérer tous les produits comme négatifs correspond à l'idée de caractère localement optimal des transformations.

L'évolution au cours du temps par *steepest descent* peut dès lors s'écrire :

$$\forall i \in [1, \mathbf{n}], \mathbf{x}_i(t + \partial t) = \mathbf{x}_i(t) - \alpha \times \partial t \times \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_i}$$

La valeur de α doit être très faible afin de respecter la localité des changements. Autrement dit, une faible valeur permet d'épouser fidèlement le relief du paysage énergétique. Dans un mode discret (non continu), une valeur trop importante risque de "faire manquer" au système certains optima à cause de sauts de trop forte amplitude. L'optimalité locale n'est alors plus respectée.

Si comme nous l'avons déjà précisé, les méthodes de minimisation d'ordre 1 ou plus cherchent à épouser de façon performante le relief du paysage énergétique pour converger vers un minimum, l'algorithme de *steepest descent* suit en fait le chemin de *plus grande pente*, comme son nom le laisse deviner. Les figures 6.1 et 6.2 illustrent ce type de déplacement sur le paysage. La pente en un point de l'espace des paramètres est donnée par le vecteur dérivé $\Delta \mathbf{f}$:

$$\Delta \mathbf{f} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_1} \\ \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x_i} \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix}$$

Les formules données précédemment et ce vecteur permettent de constater comment chaque paramètre x_i suit bien la pente de sa propre dimension.

6.1.2 Objectifs et présupposés théoriques du modèle

Au cours du deuxième chapitre, nous avons abordé les changements linguistiques selon une approche systémique, en mettant l'accent sur les structures linguistiques internes (que ce soit aux niveaux phonologique, lexical, syntaxique... Il s'agit ici de la dimension structurelle.) et sur leur évolution en fonction de contraintes internes (naturelles) et externes (les facteurs sociaux). Nous souhaitons ici développer un modèle simple qui prenne en compte les relations structurelles entre les composants linguistiques et qui soumette leur évolution "structurelle" aux contraintes naturelles et à des phénomènes de type social. Notre but sera entre autres de mesurer l'impact des phénomènes sociaux sur les changements linguistiques.

La notion d'item linguistique

La notion d'item linguistique telle que nous l'avons utilisée au cours des chapitres précédents constitue la base de notre modèle.

Comme déjà mentionné au chapitre 2, la notion d'item linguistique est très abstraite, mais elle a l'avantage d'être assez générale pour permettre une approche formelle apte à fournir des résultats quantitatifs et qualitatifs. Elle convient ainsi bien au modèle que nous souhaitons développer.

Notion de contexte

Un item linguistique prend toujours place dans un **contexte** linguistique particulier. Cette notion est très vaste, et regroupe des niveaux plus ou moins abstraits et généraux : les segments prennent place dans des contextes phonétiques et des morphèmes, les mots du lexique dans des contextes syntaxiques, les phonèmes de la langue dans un système phonologique. . . Un contexte contient ainsi un ou plusieurs items, qui sont éventuellement en compétition avec d'autres items.

Le modèle doit prendre en compte cette notion de contexte. Un contexte peut être occupé par un certain nombre d'items. Dès lors, chacun d'entre eux est représenté dans le contexte selon une **fréquence d'occurrence**. Deux cas sont envisageables : si l'item ne peut être considéré que comme présent ou absent du contexte (par exemple, dans le contexte théorique formé par une voyelle, le trait de nasalité ne peut être que présent ou absent), sa fréquence est soit nulle, soit égale à 1. Si au contraire l'item peut être présent dans le système selon une fréquence plus ou moins importante, celle-ci varie entre 0 et 1.

L'évolution d'un système se traduira par l'évolution des fréquences des différents items en contexte, sous la pression de différentes contraintes que nous décrirons ci-dessous.

Pour un ensemble d'items donné, un contexte linguistique est *a priori* constitué d'autres items linguistiques. Nous ne décrirons cependant pas le contexte en fonction d'une partie des items du système, et postulerons dans notre modèle qu'il existe de façon indépendante des items considérés en son sein. Ceci revient en fait à faire l'hypothèse simplificatrice qu'il existe des stratifications relativement indépendantes le long de la dimension structurelle du système langagier ; même si cette hypothèse n'est pas vérifiée, elle nous permettra de mieux évaluer la situation à l'aide d'un modèle nettement plus simple.

Selon les cas, le contexte pourra être défini comme **exclusif** ou **inclusif**. Dans le cas exclusif, la somme des fréquences des items du contexte devra être égale à 1. Ceci ne sera pas nécessaire dans le cas inclusif. Ces deux possibilités permettent de laisser une certaine liberté sur la définition du contexte linguistique, et ainsi d'envisager différents cas.

Par exemple, si l'on considère le système phonologique d'une langue comme le contexte des différents phonèmes qui le composent, un contexte inclusif permettra de faire co-exister différents éléments de fréquence soit nulle, soit égale à 1. Si l'on considère maintenant le lexique comme une collection de contextes qui représentent les mots de ce lexique, des contextes inclusifs permettront de composer les mots grâce à des segments selon une certaine distribution de fréquences. Ceci permettra d'illustrer par exemple la variabilité phonétique qui peut exister lors de la prononciation de certains mots chez un individu.

Impact des contraintes naturelles et distribuées sur l'évolution des items linguistiques

L'idée du modèle est de représenter par des outils mathématiques les interactions entre composants des structures linguistiques. Le postulat de base développé dans le chapitre 2 est l'existence d'un certain nombre de contraintes qui pèsent sur ces composants, sur leurs interactions et leurs évolutions. Le terme de **contraintes naturelles et distribuées** est à envisager au sens large, et reflète la façon dont les dimension naturelle et distribuée du système langage viennent peser sur la dimension structurelle de celui-ci. Rappelons ici en particulier que ce sont les contraintes naturelles et distribuées qui viennent définir les structures linguistiques, en sé-

lectionnant les combinaisons d'items cohérentes vis à vis de leur caractéristiques. Parmi ces contraintes, nous pouvons citer :

- des contraintes de production et de perception, liées aux structures physiologiques humaines mises en jeu pour l'utilisation du langage. Il est par exemple plus efficace d'employer des sons faciles à prononcer et à percevoir ;
- des contraintes cognitives, qui correspondent aux aspects cognitifs du langage, comme l'encodage et le décodage des phrases ;
- des contraintes de l'environnement, qui traduisent l'utilisation du langage pour échanger des informations à propos d'objets et de concepts de l'environnement des locuteurs (environnement dont font entre autres partie les autres individus) ;
- des contraintes interactionnelles, qui correspondent à l'idée d'une transmission efficace des informations précédentes grâce au langage.

Afin de rendre compte de ces contraintes naturelles et distribuées, il est possible de définir une notion de **compatibilité** des items, qui caractérisera leur adéquation par rapport aux contraintes (de façon globale) et leur assemblage en structures. Cette compatibilité et les contraintes en jeu sont définies par rapport au contexte dans lequel les items prennent place.

La notion de compatibilité englobe à la fois l'adéquation d'un item aux contraintes hors du cadre défini par un système linguistique particulier, et l'adéquation de ses interactions avec les autres items. S'il est bien sûr possible d'argumenter sur le fait que les items n'apparaissent qu'*en contexte* dans les énoncés linguistiques, il nous paraît pédagogique de distinguer les deux phénomènes précédents, à l'aide des deux dénominations suivantes.

Tout d'abord, chaque item possède une compatibilité propre ou **compatibilité intrinsèque** vis à vis des contraintes naturelles et distribuées. Cette compatibilité est supposée indépendante des autres items du système. Un exemple simple mais abstrait est par exemple d'envisager un segment phonétique particulier, et de mesurer ses facilités de production et de perception hors des contextes de co-articulation (ce qui peut être discutable). La combinaison de ces deux variables permettrait alors d'approcher la compatibilité de ce segment vis à vis d'une partie des contraintes naturelles. Autre exemple, l'examen des fréquences des ordres des mots (SOV, SVO, VSO... voir chapitre 2) pourraient donner des indices sur la compatibilité intrinsèque de ces items linguistiques.

Encore une fois, la possibilité d'isoler un item hors du contexte linguistique des phrases est théorique, mais permet de clarifier la situation. Dans l'exemple précédent, la plus grande rareté de l'ordre OSV [Black, 1999] (p. 19) peut peut-être s'expliquer par des contraintes cognitives qui rendent plus difficile à traiter une phrase dont le sujet et le verbe arrivent après l'objet. Un item linguistique représentant la construction OSV aurait ainsi une moins grande compatibilité intrinsèque que l'item représentant par exemple la construction SOV, mais il est également possible que les plus grandes fréquences de certains ordres soient la conséquence d'interactions systémiques avec d'autres composants structuraux, et qu'elles aient peu à voir avec leur compatibilité intrinsèque.

En plus de leur compatibilité intrinsèque, les items entretiennent des relations entre eux, qui vont elles aussi être soumises aux différentes contraintes naturelles et distribuées (ce qui va conduire à l'apparition de structures). Nous nous proposons de dénommer ces phénomènes par la notion de **compatibilité relationnelle**. *A priori*, estimer le poids des contraintes sur

les interactions entre items requiert l'évaluation de toutes les combinaisons systématiques d'items possibles. Cette description exhaustive est néanmoins difficile à transcrire dans un modèle si le nombre d'items est important, et il est possible de recourir à la simplification suivante : la compatibilité relationnelle peut être définie pour chaque paire d'items, et représenter la compatibilité d'un item vis à vis des contraintes lorsqu'un second item est présent dans le système linguistique. La présence du second item peut entraîner une bonne ou une mauvaise compatibilité du premier item. Nous pouvons citer ici l'exemple de la relation entre ordre des mots et position de la tête que nous avons introduite au chapitre 2.

Cette définition simplifiée de la compatibilité relationnelle repose sur l'hypothèse qu'il est possible de considérer la compatibilité d'un item en co-occurrence avec un système d'items grâce à une décomposition de la compatibilité relationnelle globale en compatibilités deux à deux avec les différents items du système linguistique.

Cette dernière notion n'est *a priori* pas symétrique mais ordonnée : nous distinguerons ainsi la compatibilité relationnelle d'un item i en présence d'un item j de la compatibilité relationnelle de l'item j en présence de l'item i dans le système. L'idée sous-jacente est que si un item linguistique favorise l'apparition d'un autre item, la réciproque n'est pas forcément vraie (la notion de compatibilité ne recouvre cependant pas la notion de facilité d'émergence, comme nous le verrons par la suite). La relation porte donc en fait non pas sur une paire d'éléments non-ordonnés, mais sur chaque item en fonction de la présence ou non d'autres items dans un système. Une des conséquences de cette proposition est la possible existence d'universaux *implicationnels*, comme ceux rencontrés dans les langues du monde.

Si la compatibilité relationnelle est définie pour chaque paire *ordonnée* d'items, nous pouvons enfin utiliser les termes de **compatibilité en situation** ou **compatibilité systémique** d'un item pour désigner la compatibilité globale de celui-ci dans un système particulier, déterminée par sa compatibilité intrinsèque et la présence de l'ensemble des autres items qui forment le système. Le terme de **cohérence systémique** définira quant à lui l'adéquation aux contraintes, non pas d'un item particulier en interaction avec d'autres items, mais celle d'un ensemble d'items, c'est à dire d'un (sous-)système linguistique. Cette cohérence pourra être construite à partir des compatibilités intrinsèques et relationnelles des éléments qui composent le système.

Une compatibilité pourra être négative, positive ou nulle. Dans le premier cas, elle traduira le fait qu'un item va à l'encontre des forces du système (plus ou moins fortement), dans le second cas, que sa présence va dans le sens des contraintes qui pèsent sur le langage (plus ou moins fortement), et dans le troisième cas, que sa présence est neutre vis à vis du jeu de contraintes.

Deux approches peuvent être envisagées pour mettre en jeu la compatibilité des items. Une première approche très abstraite, dont le but est plus d'investir les phénomènes dynamiques de l'évolution d'un système sous contraintes, présuppose une fonction d'énergie donnée *a priori* pour le système linguistique. Les valeurs de cette fonction pour l'ensemble des configurations du système linguistique définissent la cohérence systémique de celui-ci dans son ensemble de façon immédiate, sans décomposition selon les items. Ce cas est le plus général possible, puisque tout repose sur une unique fonction, qui capture l'ensemble des contraintes qui pèsent sur les items et leurs interactions. Cependant, il est bien sûr presque impossible de définir cette fonction pour un objet aussi complexe que le langage. Nous référerons à cette approche grâce à l'expression **approche holistique**, dans le sens où elle ne décompose pas la cohérence du système selon les compatibilités des éléments qui le composent.

Une seconde approche, moins générale et donc moins puissante, mais peut-être plus utile pour approcher des phénomènes linguistiques réels, consiste à faire apparaître de façon explicite les différentes compatibilités que nous avons définies plus haut. Nous appellerons cette approche **approche combinatoire**.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l'approche holistique et sur les aspects dynamiques de l'évolution des systèmes linguistiques, qui peuvent être étudiés à l'aide d'un modèle abstrait. Nous présenterons toutefois en annexe les principes et les outils mathématiques pour implémenter l'approche combinatoire, que nous souhaitons mettre à profit dans le futur pour ancrer notre modèle dans la réalité (voir les conclusions du chapitre 7).

Situation mono- ou pluri-contextuelle

Nous avons introduit plus haut la notion de contexte pour l'existence d'items dans un système linguistique. Nous avons également écrit que les différentes notions de compatibilités et de contraintes étaient définies par rapport à un contexte particulier.

Il est tout à fait possible d'envisager la co-existence de plusieurs contextes de type similaire ou non dans le système : par exemple, les mots du lexique représentent des contextes de type similaire pour les segments, de même que différentes structures syntaxiques peuvent accueillir les mots d'une langue particulière.

Parallèlement aux contraintes naturelles et distribuées prises en compte par les différentes compatibilités des items, des **contraintes contextuelles** doivent être ajoutées au modèle lorsque plusieurs contextes co-existent.

Il est important de bien voir ici que ces contraintes contextuelles font elles aussi partie des contraintes naturelles et distribuées qui pèsent sur les systèmes linguistiques, mais qu'elles interviennent à un niveau différent des contraintes précédentes, qui étaient elles spécifiques à un contexte donné. Pour reprendre l'exemple des segments dans les mots du lexique, des contraintes naturelles et distribuées pèsent sur les segments à l'intérieur des mots (qui représentent des contextes de nature identique), tandis que d'autres pèsent sur les mots eux-mêmes.

La distinction entre les deux dénominations utilisées n'est donc pas très pertinente, puisque les contraintes contextuelles sont elles aussi naturelles ou distribuées, mais ces deux expressions serviront à simplifier notre discours, ainsi qu'à envisager simplement les cas où un seul contexte est en jeu.

Si des items peuvent apparaître dans des contextes de nature différente, alors pour chaque type de contexte, il sera nécessaire de définir les contraintes qui pèsent sur l'item *dans* ce contexte. Par soucis de simplicité, nous n'envisagerons par la suite que des contextes de nature similaire, c'est à dire dans lesquels les contraintes naturelles et distribuées qui pèsent sur les items sont identiques.

Notre proposition est que les différents contextes entretiennent entre eux des relations de répulsion ou d'attraction, de la même façon que les individus entre eux (rappelons que nous souhaitons souligner les similarités entre dimensions distribuée et interne du langage au cours de notre travail). Un exemple assez abstrait est le suivant : les mots ou plutôt les différentes syllabes ou plus généralement "sous-parties" qui composent les mots du lexique forment un ensemble de contextes pour les sons de la langue. Il existe une certaine pression pour que les sons dans des

contextes identiques soient similaires, afin de simplifier la mémorisation du lexique, mais également des contraintes pour éviter des phénomènes comme une homophonie trop importante. Le phénomène de diffusion lexicale, où des changements se répandent de façon graduelle dans le lexique d’une langue, traduit selon nous une pression due à une certaine contrainte de similarité des sons dans des contextes similaires (par exemple les consonnes finales dans les dialectes chinois), liée à des phénomènes cognitifs sous-jacents.

Probabilité d’émergence et stabilité des items

Dans le modèle, aucune assertion directe n’est formulée quant à la stabilité et à la “facilité d’apparition” des items. De telles notions ont été discutées par Greenberg en lien avec l’existence d’universaux linguistiques et la fréquence de certains éléments typologiques dans les langues du monde [Greenberg, 1978]. Nous avons détaillé ces propositions au chapitre 2.

Dans le modèle, les cas de figures proposés par Greenberg doivent logiquement émerger comme “produits dérivés” des différentes interactions structurelles et des compatibilités intrinsèques des items, et il sera possible de déterminer sous quelles conditions les différents scénarios sont réalisés. Nous avons déjà souligné plus haut que la compatibilité d’un item vis à vis d’un système était en lien avec les possibilités d’apparition et de persistance de cet item dans le système, ou au contraire avec celle de son éviction du système, mais la relation n’est pas forcément directe et linéaire. Plus généralement, les évolutions du système résultent en partie des compatibilités intrinsèques et relationnelles des items linguistiques.

Prise en compte des facteurs sociolinguistiques

Système linguistique d’une communauté d’individus. Deux approches sont envisageables pour étudier l’évolution d’un “système linguistique” : soit on construit un système abstrait représentant une langue, sans se soucier des locuteurs et des différences inter-individuelles, soit on considère l’ensemble des locuteurs et leurs proximités linguistiques et sociales. Ceci revient en fait à proposer un choix pour la définition d’un système linguistique : soit celui-ci représente une langue de façon abstraite, soit chaque individu possède son propre système linguistique (un idiolecte), plus ou moins proche de ceux des autres individus. Nous pouvons rebondir ici sur le concept de langage communal introduit au chapitre 2, et envisager de construire une représentation moyenne des systèmes linguistiques des individus d’une communauté.

Dans le premier cas, il n’est pas nécessaire d’envisager les constructions sociales de façon directe, mais elles peuvent néanmoins être incluses de façon indirecte dans le modèle. Les prochains paragraphes concernent quant à eux le second cas.

Modélisation des structures sociales. Afin d’ancrer notre modèle dans la réalité des interactions sociales qui existent entre les individus, il nous paraît utile et nécessaire de nous appuyer sur des modèles théoriques simples de celles-ci. Cette approche est rare en modélisation de l’évolution du langage, comme nous l’avons vu au chapitre 3, mais des modèles ont été proposés par les sociolinguistes, comme celui des réseaux de Milroy que nous avons brièvement présenté au chapitre 2.

La représentation de la dimension distribuée du système langage passera donc par la modélisation de réseaux sociaux entre les individus d’une communauté linguistique. Les liens pourront être plus ou moins forts, et caractériser une attraction ou une répulsion. Ils ne seront pas nécessairement symétriques, ce qui traduira le fait que la façon dont un individu considère une

seconde personne peut ne pas être réciproque. Des situations comme l'existence d'individus très influents mais qui ne prêtent que peu d'attention aux autres sont ainsi très faciles à mettre en place. Le point de vue suivant de Labov résume la "philosophie" du modèle :

"Like linguists, sociologists are prone to explain social behavior by inferring a series of covert attitudes for which the main evidence is the behavior itself. Anspach in The Why of Fashion (1967) argues that "the initiating spark is the need of people to be like others and yet to be distinct from others" (pp. 5-6). A theory that embraces the need to be like others and the need to be distinct from others is capable of explaining any combination of events." [Labov, 2001] (p. 361)

L'intérêt de ces liens réside bien sûr en ce qui nous concerne dans leurs conséquences au niveau linguistique. Nous reprenons partiellement une des caractéristiques du principe de densité de Bloomfield, édicté en 1933, et que Labov rapporte de la façon suivante :

"... from Bloomfield's principle of density, which argues that each communicative act is accompanied by a slight degree of convergence of linguistic systems of speaker and interlocutor." [Labov, 2002].

Le but de notre modèle n'est pas de détailler le contenu des interactions linguistiques, mais de regarder comment les différents liens sociaux et les contraintes naturelles et distribuées viennent peser sur les changements linguistiques. L'adoption de principes généraux et plus abstraits comme celui de Bloomfield permet de regarder l'évolution du système à un niveau global, sans rentrer dans les extrêmes complications d'une modélisation des interactions sous forme syntaxique, lexicale...

Nous étendons légèrement le principe de Bloomfield tel qu'il est rapporté par Labov en supposant que la convergence lors des actes communicatifs se produit lorsque le lien entre les individus est attracteur (les deux individus se reconnaissent comme proches socialement), et qu'au contraire une légère divergence se produira lors d'une interaction entre deux locuteurs unis par un lien de valeur négative (les deux individus s'opposent partiellement sur le plan social). En outre, comme cela était le cas dans la *Social Impact Theory* mise à profit par Nettle, nous postulons que l'intensité de la convergence ou de la divergence linguistique est reliée de façon *non linéaire* à l'intensité du lien entre les deux individus : les convergences ou divergences linguistiques croissent de moins en moins vite lorsque l'attraction ou la répulsion sociale augmente.

La propagation des changements linguistiques dans une communauté va ainsi reposer sur le schéma des liens entre individus, et nous pouvons parler en un certain sens de **contraintes sociales**. Comme nous l'avons déjà souligné, de très nombreuses situations peuvent être envisagées, et nous espérons pouvoir les examiner plus précisément (en définissant des typologies de schémas sociaux) dans un futur proche. Nous nous limiterons cependant dans ce chapitre à des cas simples, afin de ne pas nous détourner des résultats les plus fondamentaux que nous souhaitons mettre en exergue.

Distribution des changements vis à vis des contraintes internes et externes

Deux opinions s'opposent souvent dans la littérature linguistique. D'un côté, certains articles ou travaux insistent sur certains changements en démontrant comment (ceci est notre interprétation vis à vis de notre cadre théorique) ils peuvent entraîner une meilleure adéquation du

système linguistique aux contraintes. D'un autre côté, les études sociolinguistiques ou sur les contacts linguistiques insistent sur le fait que des changements de tout type peuvent se produire, et qui peuvent transformer des composantes structurelles *a priori* très centrales des langues : ordre des mots, systèmes tonaux. . .

Cette opposition conduit donc à première vue à devoir choisir entre une absence de contraintes dans la sélection des transformations qui pèseront sur les langues, ou une existence de changements qui vont toujours dans le sens d'une meilleure adéquation des langues vis à vis des contraintes internes (naturelles et distribuées).

Nous proposons d'opter pour une **distribution probabiliste** des changements qui touchent les langues, vis à vis des multiples contraintes, externes (sociales) ou internes (naturelles, distribuées ou contextuelles), qui pèsent sur eux. Le but de cette distribution est simplement de traduire l'idée que des changements plus en adéquation avec l'ensemble des contraintes auront tendance à se produire plus souvent que des changements qui déstabilisent le système. Nous calculerons donc concrètement dans nos simulations une distribution des changements possibles à partir des contraintes naturelles et distribuées, contextuelles et sociales qui pèsent sur l'évolution d'un système linguistique. Cette distribution représentera la façon dont chaque changement potentiel répond à l'ensemble des contraintes. Une projection sera alors effectuée entre la pertinence des changements potentiels vis à vis des contraintes et la probabilité qu'ils se réalisent dans le système linguistique.

La raison intuitive de ce choix est la suivante : à chacune de leur utilisation, les formes linguistiques se trouvent confrontées au jeu de l'ensemble des contraintes, et sont donc évaluées vis à vis de lui. Même si des processus contingents sont toujours à l'œuvre, l'apparition et la persistance d'un changement sont donc le résultat d'une évaluation permanente vis à vis des contraintes. Selon l'orientation et la force respectives des contraintes naturelles et distribuées, contextuelles ou sociales, certains changements pourront apparaître plus ou moins facilement, des transformations persister plus ou moins longtemps, et se répandre ou non dans une communauté de locuteurs.

Par exemple, des changements introduisant une perte de stabilité du système vis à vis des contraintes internes, et donc une plus grande difficulté d'utilisation, pourront apparaître et persister pour caractériser la position sociale de certains locuteurs, mais auront des difficultés à s'étendre au-delà du cadre de la sous-communauté où les processus d'identification sociale les rendent possibles et persistants.

Notons ici que l'idée d'une distribution des changements peut s'appliquer au système linguistique d'un locuteur comme au système linguistique d'une langue abstraite. Par le biais du phénomène d'implémentation des changements dans une communauté, on peut espérer une certaine similarité entre les deux niveaux considérés.

Différents scénarios d'évolution

Si l'on se réfère à l'opposition partielle soulevée dans les derniers paragraphes précédents, ainsi qu'à notre proposition de distribution des changements potentiels, nous pouvons envisager différents scénarios d'évolution linguistique. Notre but sera bien sûr d'examiner les dynamiques d'évolution résultantes, et de les contraster avec la situation des langues réelles.

Un premier point préliminaire à souligner est qu'hormis peut-être dans des conditions sociales

et linguistiques très extrêmes, les évolutions du système sont le plus souvent **locales**. Ce caractère est d'importance, et peut se justifier de la façon suivante : hormis de très rares cas, les locuteurs n'ont pas conscience de la façon dont les langues évoluent, ni de comment les contraintes pèsent sur les changements linguistiques, même s'ils peuvent détecter des variations dans les différents parlers qui les entourent ou dans le leur propre. Si des changements se produisent dans un système linguistique, qu'ils stabilisent ou déstabilisent celui-ci (en augmentant ou diminuant l'adéquation aux contraintes), ils porteront sur un faible nombre d'items, en réaction à des caractéristiques locales du paysage énergétique et/ou pour manifester des phénomènes sociaux. Les locuteurs n'ont en effet pas l'intuition que toute une cascade de changements pourrait éventuellement conduire à une amélioration ou à une détérioration tangible de leur système. Notons toutefois qu'une telle réflexion n'est pas impossible, et que des langues construites de façon théorique comme l'espéranto avaient pour but d'être aisément apprises par un grand nombre de locuteurs de langues natives différentes (même si le problème d'une adéquation à un jeu de contraintes n'était pas posé en ces termes, le principe est assez proche).

Pour énoncer la situation en d'autres termes, la langue et les locuteurs n'ont aucune idée des puits d'énergie du paysage énergétique du langage, et *a fortiori* aucune idée de l'existence et de la localisation de minima absolus ou très importants. Le schéma d'évolution possible repose sur un **mécanisme** de mouvement dans l'espace des possibles linguistiques, en utilisant (de façon inconsciente) les informations sur la *topologie locale* du paysage énergétique à l'emplacement du système : énergie, valeurs locales des dérivés de la surface qui renseignent sur les directions et les inclinaisons des pentes du paysage énergétique. Ceci correspond en fait à l'évaluation permanente des formes linguistiques, et c'est par une itération du mécanisme d'évolution locale que se construit l'évolution au cours du temps.

Il est tout d'abord possible de s'intéresser à des évolutions du système qui cherchent à maximiser de façon continue et **localement optimale** la cohérence systémique du système linguistique vis à vis des contraintes. Dans une vision énergétique de la situation, le système se dirige vers l'attracteur, situé au fond d'un puits d'énergie, dont le bassin d'attraction contient sa configuration initiale. En outre, le déplacement se fait d'autant plus rapidement que la pente menant à l'attracteur est importante.

Si l'on se réfère au cadre mathématique défini au début du chapitre, il est possible de mathématiser la situation précédente à l'aide de dérivées partielles, et donc d'obtenir une description **continue** du mécanisme. Néanmoins, cette approche est idéale, et dans les techniques d'optimisation réelles, comme vraisemblablement également pour les phénomènes linguistiques, l'aspect continu est remplacé par des sauts discrets de faible portée. La faible distance parcourue à chaque saut permet de ne pas briser le caractère (idéal et) local des évolutions. Les propriétés de convergence vers des états stables des méthodes d'optimisation détaillées plus haut sont ainsi conservées.

Nous pouvons recourir au terme de **mutations** pour désigner ces petites transformations discrètes du système linguistique. Une mutation fait passer le système d'un état **A** à un état **B** voisin, et peut donc être définie par le vecteur reliant ces deux états. Dans le cas d'items ne pouvant être que présents ou absents, les mutations font passer leur fréquence d'une valeur à une autre (de 0 à 1, ou de 1 à 0). Dans le cas de fréquences pouvant varier continûment entre 0 et 1, les mutations peuvent être plus ou moins importantes, allant de quelques pourcents à des changements plus radicaux. Dans ces derniers cas, l'aspect local de l'évolution vis à vis d'un item pourra être remis en cause, mais globalement, l'évolution du système restera locale vis à vis du vaste ensemble d'items linguistiques qui composent celui-ci.

Dans le premier scénario précédent, les vecteurs des mutations sont toujours proportionnels aux vecteurs de plus grande pente du système (méthode de *steepest descent*). Toutefois, d'après ce que nous venons de dire plus haut, nous envisagerons en fait des mutations partiellement stochastiques au niveau temporel : si le résultat au bout d'un temps infini d'évolution sera le même que dans le premier cas continu, le décours temporel des changements sera lui stochastique.

Deux autres scénarios peuvent être construits en faisant varier les directions des vecteurs de mutation.

Un second scénario consiste à faire évoluer le système selon des mutations aléatoires, sans se soucier des pentes du paysage énergétique. Ceci correspond à une évolution sans contraintes du système. Le scénario d'évolution sera alors à la fois stochastique au niveau temporel et au niveau des variations des paramètres du système.

Enfin, un troisième scénario correspondra à notre proposition de **distribution** des changements. Les directions des mutations se feront donc selon la distribution probabiliste utilisée : la majeure partie d'entre elles aura donc tendance à renforcer l'adéquation du système vis à vis des contraintes, mais certaines plus rares iront au contraire dans la direction opposée. Les conséquences dynamiques de cette évolution seront particulièrement intéressantes à observer.

6.1.3 Description mathématique du modèle

Nous ne présentons ici que la mathématisation de l'approche holistique, plus aisée que celle de l'approche combinatoire décrite en annexe.

Compatibilité et énergie d'un système linguistique

Notre hypothèse de départ est l'existence d'un ensemble d'items linguistiques fini, composé de n éléments, dans lequel une langue va pouvoir "piocher" un certain nombre d'éléments afin d'être apte à véhiculer de l'information entre ces locuteurs (cette définition qui fait de la langue une entité presque douée de volonté n'est bien sûr qu'une figure de style).

Comme nous l'avons dit plus haut, nous supposons dans l'approche holistique que nous disposons d'une fonction d'énergie qui donne pour chaque configuration d'un ensemble d'items une valeur numérique qui correspond à l'adéquation du système vis à vis du jeu de contraintes naturelles et distribuées. Dans les expériences développées plus bas, nous ne considérons que des items dont la fréquence peut varier de façon continue dans le ou les contextes.

Nous définissons l'énergie d'un système linguistique comme l'inverse de son adéquation vis à vis des contraintes, ce qui permet de parler de minimisation comme dans la plupart des cas d'étude d'autres domaines (même si minimisation et maximisation sont deux processus tout à fait symétriques).

Rappelons ici (voir chapitre 2) que l'espace énergétique engendré par la fonction d'énergie va être bâti sur l'espace des états possibles du système linguistique. Par exemple, si l'on envisage deux items dont les fréquences peuvent varier entre 0 et 1, ce qui sera le cas dans toutes les expériences suivantes, alors l'espace des états possibles sera composé de tous les doublets possibles (a,b) choisis dans l'intervalle $[0, 1] \times [0, 1]$. L'espace énergétique sera lui composé en ajoutant une troisième dimension qui associe une valeur d'énergie à chaque couple de fréquences.

Représentation d'un contexte et d'un ensemble de contextes

Il nous faut maintenant définir une représentation pour la notion de contexte que nous avons introduite plus haut. La modélisation la plus simple consiste en un vecteur de \mathbf{n} éléments caractérisant les fréquences d'occurrence des différents items linguistiques dans ce contexte. Les fréquences varient entre $\mathbf{0}$ et $\mathbf{1}$, une valeur nulle traduit l'absence de l'item linguistique dans le contexte, alors qu'une valeur de $\mathbf{1}$ traduit la présence permanente de cet item. Selon la caractéristique inclusive ou exclusive du contexte, la somme des fréquences dans un contexte devra ou non être égale à 1.

Dans le prolongement de la notion de contexte unique, un système linguistique pourra être défini comme une collection de contextes. Là où un simple vecteur détermine un contexte, un système linguistique composé de \mathbf{q} contextes sera dès lors représenté par une matrice de dimensions $\mathbf{n} \times \mathbf{q}$, où chaque colonne représentera un contexte, et chaque ligne \mathbf{i} les fréquences de l'item \mathbf{i} dans les différents contextes.

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_i \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$\mathbf{V}[\mathbf{i}] = \mathbf{f}_i =$ fréquence de l'item \mathbf{i} dans le contexte \mathbf{V}

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} & f_{1,3} & \dots & \dots & \dots \\ f_{2,1} & f_{2,2} & f_{2,3} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & f_{i,j} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

$\mathbf{S}[\mathbf{i}, \mathbf{j}] = \mathbf{f}_{i,j} =$ fréquence de l'item \mathbf{i} dans le contexte \mathbf{j}

Les contextes peuvent être indépendants ou non. Pour chaque couple de contextes, une valeur numérique réelle définit le **couplage** entre ces deux contextes. Une valeur positive définit un phénomène d'**attraction** entre les deux contextes, qui auront tendance à rapprocher les fréquences de leurs items linguistiques au cours du temps (phénomène d'**homogénéisation**). Si la valeur est négative, une répulsion se produira entre les deux contextes qui auront tendance à faire diverger les fréquences de leurs items respectifs. Nous supposons ici que la relation de couplage entre deux contextes est symétrique.

Il est ainsi possible de définir les relations entre un ensemble de contextes grâce à une *matrice de relations contextuelles* \mathbf{RC} . Cette matrice de dimensions $\mathbf{q} \times \mathbf{q}$ sera triangulaire supérieure ou inférieure et à diagonale nulle, en conséquence de la symétrie de la relation de couplage.

Représentation des liens sociaux entre individus

Pour les simulations où nous envisagerons une population de locuteurs et non une “langue” abstraite, il sera nécessaire de définir les liens sociaux entre les individus.

L’implémentation informatique est la même que pour un ensemble de contextes. Nous définissons la relation entre deux individus \mathbf{I}_1 et \mathbf{I}_2 grâce à deux valeurs numériques réelles qui représentent l’influence de \mathbf{I}_1 sur \mathbf{I}_2 et celle de \mathbf{I}_2 sur \mathbf{I}_1 . Une valeur positive traduit une attraction, qui correspond en fait à une proximité sociale, et une valeur négative une répulsion. La valeur absolue traduit la force de l’attraction ou de la répulsion.

Pour une population de \mathbf{m} individus, La *matrice de relations individuelles* \mathbf{RI} , de dimensions $\mathbf{m} \times \mathbf{m}$, regroupe l’ensemble des relations précédentes : la valeur de la cellule $\mathbf{RI}[\mathbf{i}, \mathbf{j}]$ correspond à l’influence de l’individu \mathbf{j} sur l’individu \mathbf{i} . Contrairement à la matrice de relations contextuelles, la matrice de relations individuelles n’est pas triangulaire. Toutefois, sa diagonale est également nulle⁴¹.

Evolution de la structure d’un système linguistique : sélection des changements

Nous atteignons ici le cœur de notre modèle, puisqu’il s’agit de traduire dans l’évolution du système linguistique à la fois l’influence des contraintes naturelles et distribuées et de celles du milieu social.

Dans le cadre de l’approche holistique et de sa représentation grâce à des paysages énergétiques, l’évolution d’un système linguistique va correspondre à une trajectoire à la surface du paysage. Notons toutefois que la visualisation d’une trajectoire à une date t ne fournit aucune indication sur le décours de l’évolution au cours du temps, et que d’autres indicateurs doivent être mis à profit pour bien analyser l’évolution d’un système.

Chaque position sur le paysage énergétique correspond à une configuration particulière du système. Le paysage d’un système de \mathbf{n} items est de dimension $(\mathbf{n} + 1)$ (un espace des paramètres de dimension \mathbf{n} et une dimension supplémentaire pour la valeur de l’énergie). Il est impossible de se représenter visuellement un espace à plus de trois dimensions, mais l’observation des évolutions en dimension 2 ou 3 nous permettra une extrapolation conceptuelle aux dimensions supérieures, ceci à cause de l’indépendance des dynamiques d’évolution vis à vis du nombre d’items du système linguistique.

Afin d’expliquer de façon claire la façon dont les changements linguistiques vont s’opérer, nous allons commencer par aborder le problème d’une façon générale, avant de montrer comment les contraintes naturelles et distribuées, contextuelles et sociales s’y intègrent.

Un changement linguistique se traduit par une variation de la fréquence d’un item dans un contexte linguistique. De nombreuses variations (en fait une infinité dans le cas continu), plus ou moins importantes, et dans un sens ou dans l’autre (vers une fréquence plus faible ou plus forte), peuvent être envisagées. Supposons que la qualité de ces variations soient représentée par une distribution continue ou discrète (le cas échéant) de probabilités \mathbf{d} : plus une variation d’intensité i et de sens s améliorera la “qualité” du système, donc sera de bonne qualité, plus la

⁴¹On peut également envisager une diagonale non nulle pour doter chaque individu d’une certaine inertie au changement.

valeur de la distribution sera importante pour cette variation. Nous souhaitons que la probabilité qu'elle soit choisie lors d'une évolution du système soit alors plus importante.

Concrètement, étant donné une distribution de qualité pour les changements possibles d'un système, nous postulons que la probabilité d'apparition effective d'un changement est proportionnelle à sa qualité. A chaque pas de temps, un jeu de tirages aléatoires permettra de déterminer si oui ou non le changement choisi se produit effectivement dans le système. Le caractère contingent des changements se traduit ici par l'utilisation de ce tirage aléatoire.

Grâce à cette méthode, nous obtenons à la fois une distribution des changements et un déroulement temporel de leur apparition influencés par leur qualité.

Nous pouvons maintenant rentrer plus en détail et décomposer cette notion de qualité. Il s'agit en fait de l'adéquation à l'ensemble des contraintes externes (sociales) et internes (naturelles, distribuées et contextuelles) qui pèsent sur le système linguistique. Chacun de ces trois ensembles de contraintes va en fait définir sa propre distribution de qualité pour les changements possibles. La distribution finale utilisée pour déterminer l'apparition des changements devra donc être la composition des sous-distributions de chaque ensemble de contraintes.

Les paragraphes suivants expliquent comment calculer la distribution de chaque sous-ensemble.

Distribution liée au jeu de contraintes naturelles et distribuées

En chaque point du paysage énergétique des contraintes naturelles et distribuées, l'étude de la topologie locale du paysage permet de connaître comment le système peut évoluer pour obtenir une meilleure adéquation aux contraintes, ou au contraire une moins bonne. Le gradient nous donne en effet les pentes du paysage pour les différentes dimensions de l'espace des paramètres.

Nous nous intéressons aux évolutions de chaque item séparément, mais la topologie locale reflète néanmoins la qualité des possibles évolutions de chaque item vis à vis à des autres.

Pour chaque item du système, nous connaissons donc la pente du paysage. Une pente très importante caractérise un système très déséquilibré pour l'item considéré. Au contraire, une pente très faible indique un état d'équilibre. Dans ce dernier cas, peu de pression existe sur les possibles évolutions de la fréquence de l'item. Au contraire, dans le premier cas, aller dans le sens de la pente permettra de mieux répondre aux contraintes de façon significative, et aller en sens inverse augmentera d'autant l'inadéquation du système.

A partir de ce constat, nous bâtissons une distribution **gaussienne** de qualité des changements possibles de moyenne proportionnelle à la valeur de la pente. L'écart-type est lui fixé de façon externe par l'utilisateur. Comment justifier ce choix ? Tout d'abord, le choix d'une distribution gaussienne peut se justifier par le fait que les transformations du système linguistique, de nature locale, répondent souvent très finement aux déséquilibres structuraux, mais également plus rarement de façon excessive. La forme de la Gaussienne permet l'occurrence rare de ces mouvements excessifs.

En prolongeant ce raisonnement, le choix de la moyenne de la gaussienne traduit le fait que dans une situation de déséquilibre, la réponse du système sera *le plus souvent* (mais pas toujours) un changement allant dans le sens d'une meilleure adéquation. Plus le système sera en déséquilibre, plus probables seront les transformations tentant d'améliorer l'adéquation aux contraintes, et plus rares seront celles brisant encore un peu plus cette adéquation.

Nous avons envisagé plus haut trois scénarios possibles de réponse aux contraintes naturelles et distribuées du système. Deux de ceux-ci correspondent en fait à des cas extrêmes dans le choix de l'écart-type de la distribution gaussienne. Le premier scénario, qui consiste à toujours aller dans le sens de la pente, et à une vitesse proportionnelle à l'importance de cette pente, consiste

simplement à choisir un écart-type nul pour la distribution gaussienne. Au contraire, le second scénario, qui postule une indépendance vis à vis des contraintes, correspond à un écart-type infini : toutes les situations sont d'égale qualité.

Le troisième scénario se trouve à mi-chemin entre les deux premiers, avec une valeur intermédiaire de l'écart-type.

Distribution liée au jeu de contraintes sociales

La façon dont nous allons déterminer la distribution de qualité des changements potentiels vis à vis des contraintes sociales va être très similaire à la méthode précédente. Le raisonnement ne concerne qu'un seul contexte pour plus de simplicité, mais s'étend facilement à plusieurs.

Pour chaque agent i et chaque item k , il est possible d'inspecter la situation de l'item chez les autres agents en tenant compte des liens entre ceux-ci et le premier l'agent. Il est possible de définir et calculer une **déviatiion sociale optimale** pour l'agent A_i de l'item selon la formule suivante :

$$\mathbf{d}_s(k, A_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^m d_s^l(k, A_i, A_j)$$

Le calcul de la fonction $d_s^l(k, A_i, A_j)$ va être différent selon la valeur du lien entre les deux agents A_i et A_j , c'est à dire selon la valeur de $RI_{i,j}$.

Dans le cas où le lien est nul, la fonction vaut 0. Il n'y pas d'influence de l'agent A_j sur l'agent A_i .

Dans le cas où $RI_{i,j}$ est positif, nous appliquons les formules suivantes, où $signe()$ est une fonction qui rend +1 pour une valeur positive, et -1 pour une valeur négative :

$$c = th(RI_{i,j}) \times (f_k(A_j) - f_k(A_i))$$

$$\mathbf{d}_s(k, A_i, A_j) = signe(c) \times 0.05 \times \left(1 - e^{-\frac{c^2}{2 \times 0.3}} \right)$$

Dans le cas maintenant où $RI_{i,j}$ est négatif, deux nouvelles situations doivent être distinguées selon que les fréquences de l'item k chez les deux agents sont égales ou non. Dans le cas d'une égalité, nous procédons selon un tirage aléatoire conduisant en moyenne à une probabilité égale de choisir l'une ou l'autre des deux formules suivantes :

$$\mathbf{d}_s(k, A_i, A_j) = 0.05 \times \left(1 - e^{-\frac{th(RI_{i,j})^2}{2 \times 0.3}} \right)$$

$$\mathbf{d}_s(k, A_i, A_j) = -0.05 \times \left(1 - e^{-\frac{th(RI_{i,j})^2}{2 \times 0.3}} \right)$$

Enfin, dans le cas d'une inégalité, nous appliquons les formules suivantes :

$$c = th(RI_{i,j}) \times (1 - |f_k(A_j) - f_k(A_i)|)$$

$$\mathbf{d}_s(k, A_i, A_j) = \text{signe}(f_k(A_i) - f_k(A_j)) \times 0.05 \times \left(1 - e^{-\frac{e^2}{2 \times 0.3}}\right)$$

th est une fonction tangente hyperbolique définie comme suit :

$$\mathbf{th}(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^x}$$

Dans le cas d'un lien positif entre deux agents, la déviation tendra à rapprocher les agents, tandis que dans le cas d'un lien négatif, elles tendra à les repousser. Dans ce dernier cas, si les fréquences de deux individus sont égales, le sens de la déviation fréquentielle sera déterminé au hasard. La déviation est d'autant plus forte que le lien est fort en valeur absolue, mais avec une atténuation progressive de l'effet lorsque les valeurs de ce dernier augmentent. La somme des déviations donne une déviation moyenne qui traduit l'ensemble des interactions de l'individu avec les autres.

Grâce à la déviation optimale précédente, il est possible de définir une distribution de qualité des changements fréquentiels possibles. Le plus simple est encore une fois de considérer une distribution gaussienne centrée sur la déviation optimale, et avec un écart-type fixé par l'utilisateur. En moyenne, les individus auront ainsi tendance à aller dans le sens des contraintes sociales, mais sans exclure des événements plus rares allant en sens contraire, et ce d'autant plus que la variance sociale sera importante.

Rappelons ici que la variance est en fait le carré de l'écart-type. Nous emploierons fréquemment les expressions de "variance sociale" et de "variance naturelle" (plutôt que de variance des contraintes naturelles et distribuées. . .) par la suite, pour référer à l'"étalement" des distributions gaussiennes précédentes.

Distribution liée au jeu de contextes

Cette troisième et dernière distribution va se construire de façon isomorphe à la précédente, en remplaçant l'ensemble des agents et de leurs liens par l'ensemble des contextes et de leurs relations. Il est possible de calculer pour chaque item **k** dans un contexte **C_i** une **dévi**
ation contextuelle optimale grâce à la même fonction d_s^l que précédemment, mais appliquée non plus à **RI** et aux fréquences d'un item chez différents agents, mais cette fois à **RC** et aux fréquences d'un item dans les différents contextes en jeu :

$$\mathbf{d}_c(f_k, C_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^q d_s^l(k, C_j)$$

A partir de ce calcul, il est possible de calculer une troisième distribution centrée sur la déviation contextuelle optimale, avec une dernière variance dite "contextuelle" définie par l'utilisateur.

Intégration des différentes distributions

Afin de déterminer la distribution finale des changements possibles pour un item, il nous reste à intégrer les différentes distributions précédentes.

Afin de combiner les distributions, nous allons simplement les sommer, et normaliser le résultat pour garder une intégrale des qualités de la distribution égale à 1. Ce calcul permet d'obtenir

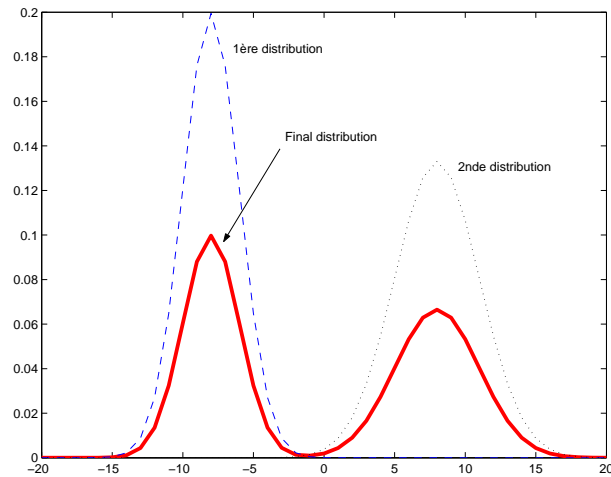


FIG. 6.3 – Somme normalisée de deux Gaussiennes présentant deux pics bien distincts

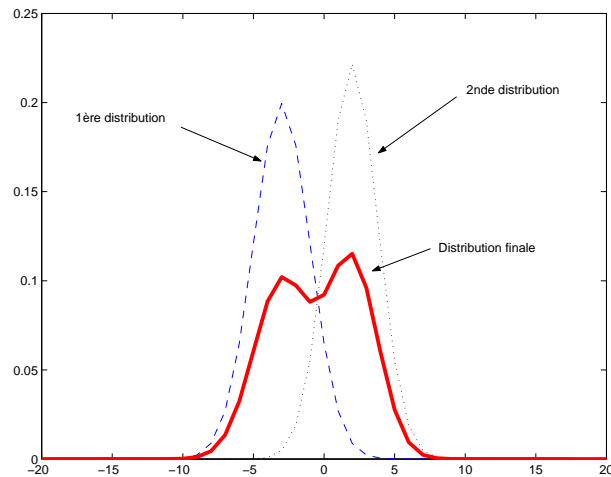


FIG. 6.4 – Somme normalisée de deux Gaussiennes présentant deux pics très rapprochés

une distribution finale qui prenne en compte les tendances des distributions correspondant aux différentes contraintes. Selon les caractéristiques de celles-ci, la distribution finale présentera un ou plusieurs “pics” plus ou moins rapprochés, comme le montrent les figures 6.3 et 6.4 pour deux sous-distributions.

Grâce à la combinaison des différentes gaussiennes, il est assez intuitif d’envisager comment les différentes contraintes internes ou externes au “système langage” pourront pousser l’évolution dans un sens ou dans l’autre. Ainsi, les contraintes sociales pourront à certains moments aller dans le sens des contraintes structurelles, et dans d’autres cas s’y opposer.

Différents paramètres peuvent jouer sur le système. Tout d’abord, jouer sur les variances des différentes distributions va permettre d’envisager pour chaque jeu de contraintes le test des différents scénarios détaillés plus haut. Il est en effet possible d’étendre leur principe, détaillé pour les contraintes naturelles, à l’ensemble des distributions.

Il est également possible d'adopter une somme pondérée pour combiner les différentes distributions, ce qui permet d'accorder plus ou moins d'importance aux différentes contraintes. Nous pourrions ainsi envisager par exemple des cas où l'évolution du système d'un agent est très liée aux contraintes sociales, et très peu aux contraintes internes.

Evolution de la structure d'un système linguistique par mutations

A partir de la distribution globale établie précédemment, il nous reste à préciser comment les fréquences peuvent évoluer dans le système.

Comme nous l'avons déjà proposé plus haut, l'idée est donc de transformer la distribution de qualité des variations de fréquences potentielles pour chaque item pour la relier à la probabilité que telle ou telle variation se produise réellement à un moment donné. Les mutations devraient ainsi être définies de telle sorte que pour un nombre de tirages stochastiques assez important, la probabilité d'une variation corresponde à sa qualité dans la distribution. Le procédé est le suivant :

Tirages de valeurs selon une distribution Gaussienne. Soit f une fonction de distribution gaussienne (encore appelée fonction de densité normale) d'écart-type 1 et de moyenne 0 :

$$\forall x \in [-\infty, +\infty], \quad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

On désigne par Ψ la fonction de distribution cumulative normale. Cette fonction, qui correspond à la valeur cumulée de la fonction précédente selon x , se définit de la façon suivante :

$$\forall x \in [-\infty, +\infty], \quad \Psi(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$$

La fonction de distribution cumulative permet de savoir pour une valeur x donnée le pourcentage de la distribution qui se trouve entre $-\infty$ et x . Il n'existe pas de formule analytique de cette fonction, mais de nombreuses approximations de bonne qualité existent. La suivante est donnée par exemple par [Bagby, 1995] :

$$\forall p \in [0.0, 0.5], \quad \Psi'(x) = \frac{1}{2} \times \sqrt{1 - \frac{1}{30} \left(7e^{-\frac{x^2}{2}} + 16e^{-x^2(2-\sqrt{2})} + (7 + \frac{1}{4}\pi x^2)e^{-x^2} \right)}$$

Désignons enfin par Φ la fonction inverse de Ψ , c'est à dire la fonction inverse de la fonction de distribution cumulative normale. Cette fonction fait correspondre à l'intervalle $[0, 1]$ l'intervalle $[-\infty, +\infty]$. Afin de produire des valeurs qui respectent en moyenne la distribution initiale f , il suffit dès lors d'effectuer un tirage aléatoire π entre 0 et 1, et de calculer la valeur de la fonction Φ pour ce point.

Il n'existe pas de forme analytique de la fonction Φ , mais comme pour Ψ , de très bonnes approximations existent [Abramowitz and Stegun, 1964].

Les résultats précédents concernent tous une fonction gaussienne d'écart-type 1 et de moyenne 0. Pour recourir à une fonction Gaussienne de moyenne \bar{X} et d'écart-type σ , Il suffit de transformer le résultat de la fonction Φ en le multipliant par σ , puis en lui ajoutant \bar{X} .

Tirages de valeurs selon une composition de distributions gaussiennes. L'ensemble des formules précédentes concerne le cas d'une unique distribution normale, alors que notre distribution finale est elle la somme éventuellement pondérée de plusieurs gaussiennes. Alors qu'il était facile dans le cas précédent de recourir aux approximations de la fonction inverse de la distribution cumulative normale, nous ne pouvons ici que nous appuyer sur les approximations pour la fonction de distribution cumulative normale, et déterminer l'inverse de cette fonction selon un algorithme de calcul.

Soient $(\overline{X}_1, \sigma_1)$, $(\overline{X}_2, \sigma_2)$ et $(\overline{X}_3, \sigma_3)$ les trois couples de moyenne et d'écart-type pour les trois gaussiennes \mathbf{f}_1 , \mathbf{f}_2 et \mathbf{f}_3 , et α_1 , α_2 et α_3 leur poids relatif dans la somme finale. Nous définissons ensuite trois fonctions ($i = 1, 2, 3$) représentant chacune la transformation pour normaliser une des trois Gaussiennes : $\delta_i = \frac{x - \overline{X}_i}{\sigma_i}$ (ces fonctions ne rentrent pas dans le calcul de l'intégration ci-dessous, car elles appliquées de façon indépendante avant celui-ci). \mathbf{f} désigne la fonction gaussienne normale d'écart-type 1 et de moyenne 0.

Nous pouvons alors calculer de façon approximative la fonction de distribution cumulée pour la somme pondérée des trois gaussiennes de la façon suivante :

$$\forall x \in [-\infty, +\infty], \quad (6.1)$$

$$\Psi'_t(x) = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \left(\int_{-\infty}^x (\alpha_1 \times f_1(t) + \alpha_2 \times f_2(t) + \alpha_3 \times f_3(t)) dt \right) \quad (6.2)$$

$$= \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \left(\int_{-\infty}^x (\alpha_1 \times f \delta_1(t) + \alpha_2 \times f \delta_2(t) + \alpha_3 \times f \delta_3(t)) dt \right) \quad (6.3)$$

$$= \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} (\alpha_1 \times \Psi' \circ \delta_1(t) + \alpha_2 \times \Psi' \circ \delta_2(t) + \alpha_3 \times \Psi' \circ \delta_3(t)) \quad (6.4)$$

A partir de cette fonction monotone croissante, un algorithme assez simple permet de calculer la fonction inverse (donc de façon non analytique) pour toute valeur comprise entre 0 et 1. En travaillant sur un intervalle raisonnable (même si les gaussiennes peuvent être de moyennes différentes, l'ensemble des valeurs où la distribution générale est significative est restreint), une approximation à une précision suffisante (définie par un paramètre ε) se fait aisément par **dichotomie**. Le nombre de pas de l'algorithme dépendra de cette précision requise. Notons ici que nous nous limiterons en fait dans nos programmes à des mutations fréquentielles d'au plus 0.05, ce qui conduira ici à un espace de recherche pour l'algorithme de dichotomie situé entre -0.05 et 0.05.

A chaque pas de temps, un calcul de la distribution de chaque item sera effectué, pour chaque individu et chaque contexte le cas échéant. Un premier tirage aléatoire π donnera un nombre entre 0 et 1, et par application du processus de dichotomie, la variation correspondante selon la courbe de distribution générale sera déterminée. Un seconde tirage π' donnera alors un nombre compris entre une valeur \mathbf{m}_r , comprise entre 0 et 1, et 1. Si ce nombre est inférieur à la valeur de la distribution générale pour la variation déterminée, alors cette variation deviendra effective, sinon il n'y aura pas de modification de la fréquence pour ce pas de temps.

Ce système à double tirage aléatoire permet de respecter en moyenne le fait qu'un changement de plus grande qualité se produit plus souvent par rapport aux autres changements à un instant donné, et plus fréquemment dans le temps.

A un temps t , l'ensemble des items sera ainsi testé, et une liste de variations à apporter sera ainsi déterminée. Après le test de tous les items, les fréquences de ceux-ci seront mises à jour selon la liste de variations, avant de passer au pas de temps suivant et réitérer l'opération. Ce mécanisme en deux temps permet d'éviter un effet d'ordre dans les changements des fréquences.

Structures sociales et géographiques

Se reposer sur la notion de réseau social, avec des liens de forces différentes est un premier point, et il est bien sûr possible de les créer de multiples manières dans une population d'agents initialement non structurée. Afin de faciliter l'analyse et de pouvoir considérer plusieurs cas de figures assez généraux, il est souvent utile de recourir à des topologies particulières comme support des liens entre les individus.

Dans nos expériences, nous avons le plus souvent utilisé des réseaux complets (chaque agent est connecté à tous les autres) formés de liens égaux entre tous les agents.

Une seconde topologie qui se dégage assez naturellement et qui a déjà été utilisée dans de nombreuses études est celle d'une grille d'agents. Cette grille peut-être torique ou non : le passage d'une grille pourvue de bords à une grille dépourvue de limites s'effectue simplement par la prise en compte sur un bord des agents situés sur le bord opposé (on "recolle" les bords opposés).

Chaque intersection (ou chaque case) de la grille contient donc un agent. Il est possible (pour les modèles qui nous intéressent) d'utiliser la topologie de la grille de deux façons : pour définir une distance sociale comme l'a fait par exemple Nettle [Nettle, 1999c], ou pour définir une distance spatiale, comme il est courant de le faire dans de nombreuses études informatiques [Kirby, 1997] (voir chapitre 3). Dans les deux cas cités, seul un des deux aspects, soit l'aspect social, soit l'aspect spatial, est pris en compte, avec parfois l'idée implicite que l'un des aspects est subsumé par le second.

Il est possible de bien séparer et étudier les deux aspects précédents en envisageant deux topologies distinctes "superposées". La possibilité la plus simple est l'utilisation de la topologie en grille pour l'aspect spatial, et la superposition des liens sociaux sur cette grille (le traitement de la situation inverse est totalement symétrique, mais intuitivement plus difficile à se représenter). Bien que nous ne les ayons pas abordés et contrastés en détail par la suite, il est assez facile de spécifier différents scénarios examinant différentes configurations sociales et spatiales :

- une situation où les liens sociaux sont répartis de façon aléatoire sur la grille spatiale. La distribution des forces des liens peut varier ;
- une situation où les voisins spatiaux sont reliés par des liens forts, avec des liens très faibles sur de plus grandes distances (voire des liens nuls) ;
- en contraste, une situation où les liens à longue distance sont renforcés.

Nous présenterons toutefois par la suite une rapide expérience sur la dispersion spatiale de liens sociaux positifs.

6.1.4 Quelques remarques en guise de transition

Le modèle précédent possède selon nous deux caractéristiques intéressantes : la première est que les contextes linguistiques et ceux formés par les individus sont totalement interchangeables. Si la topologie des liens entre les contextes peut-être fort différente de celle des liens entre les

individus, le mécanisme de caractérisation des variations possibles pour un item à un instant donné est le même dans les deux cas.

Cette structure du modèle est pour nous le moyen d'illustrer de façon forte la bidirectionnalité des changements, lors par exemple du phénomène de diffusion lexicale. Si l'on se place du "point de vue" d'un changement, il existe deux directions de propagation : dans l'ensemble des contextes, et dans la communauté d'individus. Selon les conditions dans chacune de ces directions, différentes dynamiques d'évolution pourront être observées.

Le second point est que la généralité du modèle, en particulier à l'aide des différentes distributions de qualité des variations potentielles, permet d'envisager *a priori* différents types de changements mentionnés dans la littérature, à savoir les changements dits "internes" ("*internally motivated*") et les changements "sociolinguistiques" ("*externally motivated*"). Nous espérons pouvoir présenter un cadre unifié pour ces différentes dynamiques d'évolution, et en rendre compte grâce aux variations des paramètres du modèle, en particulier au niveau des réseaux sociaux.

Les premières remarques sur la bidirectionnalité des changements ne seront pas traitées dans ce présent travail. Notre objectif est plus ici d'étudier les croisements entre les contraintes sociales et les contraintes naturelles, et nous ne détournerons que peu de ce but pour étudier les phénomènes précédents.

Notre ligne de conduite sera la construction de plusieurs séries d'expériences pour étudier l'impact des différents paramètres du modèle. Nous complexifierons notre point de vue au fur et à mesure de nos expériences. En suivant la démarche de Nettle énoncée au chapitre 3, nous tenterons de déterminer les conditions dans lesquelles les trajectoires d'évolution des systèmes linguistiques abstraits correspondent à la réalité des phénomènes linguistiques.

6.2 Etude des dynamiques d'évolution d'un système linguistique

6.2.1 Première série d'expériences : impact de la distribution des variations fréquentielles sous contraintes naturelles et distribuées

Contraste des cas extrêmes et intermédiaire de l'impact de la variance naturelle sur les évolutions linguistiques

Un des aspects fondamentaux du modèle est le recours à une distribution de la qualité des variations fréquentielles possibles en fonction des contraintes. Une première étude à envisager est de déterminer les dynamiques d'évolution des trois scénarios que nous avons détaillés dans la première partie de ce chapitre : évolution par optimisation locale des contraintes, évolution stochastique sans prise en compte des contraintes, et évolution selon une distribution des changements. Les deux premiers cas correspondent en fait respectivement à un écart-type nul ou infini de la distribution.

Dans cette expérience, nous envisageons un seul système linguistique (par exemple une langue considérée comme homogène ou un idiolecte), composé d'un seul contexte. Dans ce contexte, deux items voient leur fréquence évoluer de façon continue entre 0 et 1, sous l'effet d'événements contingents et sous un jeu de contraintes naturelles et distribuées, selon une distribution de probabilités.

Pour chaque paire de fréquences des deux items, la fonction d'énergie va permettre de déterminer l'adéquation aux contraintes de cette configuration. Un seul contexte inclusif est mis en jeu. Afin de disposer d'un paysage présentant plusieurs puits d'énergie, et des barrières d'énergie

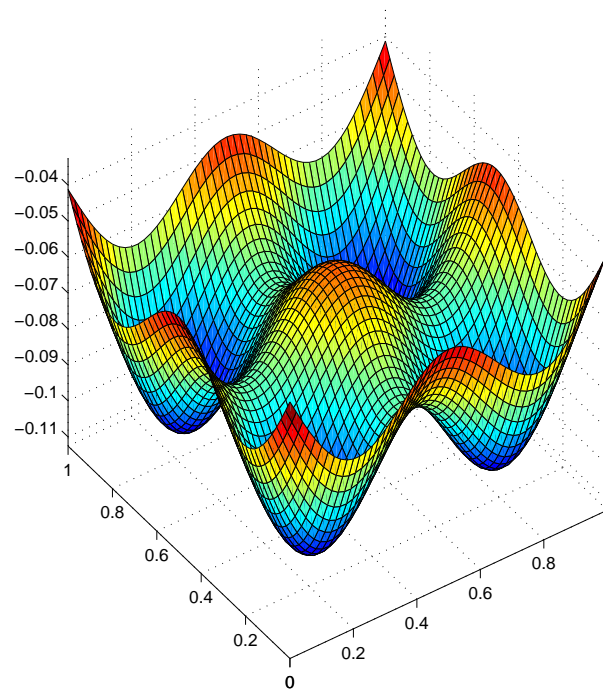


FIG. 6.5 – Paysage énergétique défini par la fonction f

entre ces puits, la fonction considérée est la suivante :

$$\begin{aligned} \forall (x, y) \in [0, 1]^2, f(x, y) = & 0.1 \times \left(e^{-\frac{(x-0.2)^2}{0.3^2} - \frac{(y-0.2)^2}{0.3^2}} \right. \\ & + e^{-\frac{(x-0.2)^2}{0.3^2} - \frac{(y-0.8)^2}{0.3^2}} \\ & + e^{-\frac{(x-0.8)^2}{0.3^2} - \frac{(y-0.2)^2}{0.3^2}} \\ & \left. + e^{-\frac{(x-0.8)^2}{0.3^2} - \frac{(y-0.8)^2}{0.3^2}} \right) \end{aligned}$$

Le paysage énergétique de cette fonction est représenté sur la figure 6.5. Chaque exponentiel de la fonction correspond en fait à l'un des puits observés sur la figure.

Une implémentation du modèle d'évolution linguistique a été réalisée en C++ grâce à la plateforme LEMMINGs. Dans cette expérience, seule une partie des composantes programmées est réellement à l'oeuvre, puisqu'une seule distribution de qualité entre en jeu. L'histoire évolutive d'un système lors d'une simulation est préservée dans un fichier texte, sous la forme de la succession des paires de fréquences au cours du temps. Le tracé de ces paires sous Matlab sur le paysage énergétique permet de suivre graphiquement l'évolution du système, et de l'envisager en lien avec la topographie du système.

A partir d'une configuration initiale dans l'espace des paramètres, le système évolue pendant un certain nombre d'unités de temps (plusieurs dizaines de milliers le plus souvent).

Le premier cas considéré est celui d'une distribution d'écart-type nul (en fait extrêmement faible dans nos programmes, ce qui explique que la courbe ne soit pas rectiligne sur la figure,

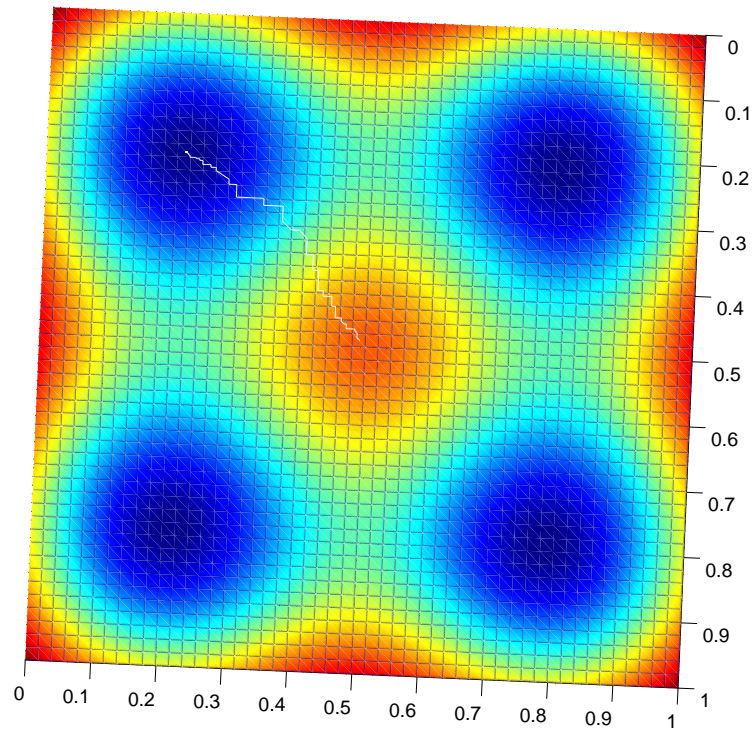


FIG. 6.6 – Evolution du système sous contrainte par optimisations locales

comme elle devrait l'être dans le cas théorique). Toute transformation qui se produit dans le système va dans le sens d'une meilleure adéquation aux contraintes. La fréquence même d'apparition de ces transformations est proportionnelle à leur qualité.

On constate que le système suit la ligne de plus grande pente du paysage à partir de son point de départ, et rejoint au bout d'un certain temps le minimum local dont le bassin d'attraction englobait sa position initiale. Après avoir atteint cet optimum, le système se stabilise. Dans les calculs, les dérivées partielles de la fonction énergétique sont nulles, ce qui ne permet plus de modifier les valeurs des deux fréquences. En effet, les distributions des déviations fréquentielles pour les deux items sont centrées sur 0, et la nullité de leur écart-type empêche dès lors tout changement. La figure 6.6 reproduit un exemple d'évolution du système.

Le second scénario correspond à une non prise en compte des contraintes ; l'écart-type de la distribution peut être considéré comme infini (dans le programme, il prend en fait une valeur positive très importante). On observe une évolution stochastique du système au cours du temps, sans respect du relief du paysage énergétique. Le système ne se stabilise pas, et bien que les mutations soient aléatoires au cours du temps, la probabilité qu'un système reste fixe pendant une période de temps diminue rapidement avec l'accroissement de la durée de cette période. En outre, si le système est instable, il n'est cependant pas possible de parler de fluctuations du système autour d'un état particulier de l'espace des paramètres. La figure 6.7 fournit un exemple d'évolution stochastique.

Le dernier scénario repose sur une distribution d'écart-type moyen, ni trop important ni trop faible, afin d'obtenir en moyenne des transformations allant dans le sens d'une meilleure adéquation aux contraintes, mais sans exclure la possibilité d'autres évolutions allant en direction

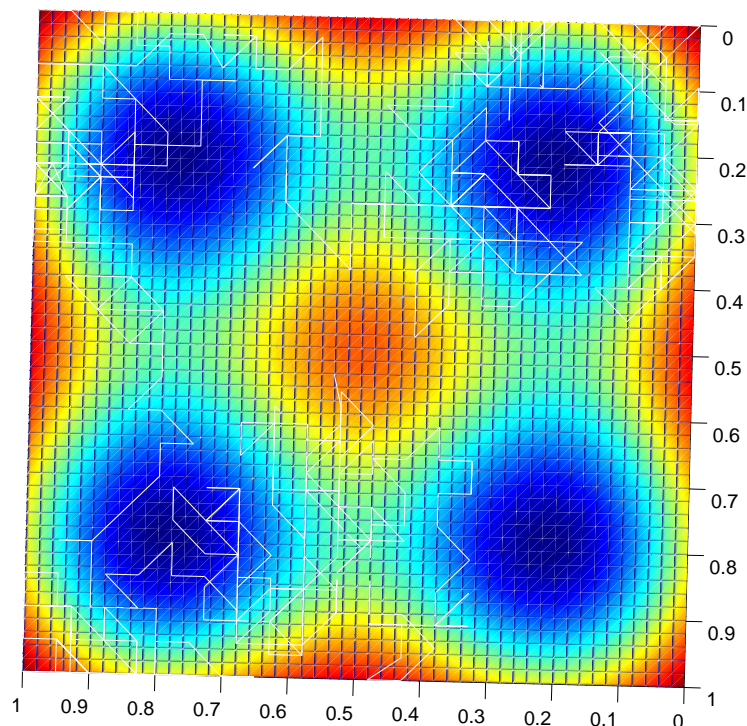


FIG. 6.7 – Evolution du système en l’absence de contraintes

opposée. Les figures 6.8 et 6.9 permettent de mieux se représenter la situation : le système fluctue pendant un certain temps autour d’un attracteur (un minimum local), avant de franchir une barrière énergétique et d’aller fluctuer auprès d’un second. Les raisons de cette évolution sont les suivantes : les évolutions stochastiques biaisées ont tendance à maintenir le système près de l’optimum local, mais une partie plus faible des mutations a tendance au contraire à l’éloigner de ce minimum ; plus les pentes du bassin d’attraction sont faibles, plus nombreuses seront les mutations qui tendront à éloigner le système du minimum. Par le biais du mécanisme stochastique, il est possible à une certaine période que plusieurs mutations divergentes se produisent successivement et emmènent le système jusqu’à la frontière du bassin d’attraction de l’optimum. Si une dernière mutation parvient à faire quitter le bassin au système, celui-ci peut alors être capté par un nouvel attracteur et se diriger vers lui par le biais de mutations en accord avec la pente de son bassin d’attraction. Une nouvelle période de fluctuations commence alors autour de cet attracteur, jusqu’à ce que la situation précédente se reproduise.

Notons ici qu’il n’est pas possible de prévoir quand le système basculera d’un attracteur vers un autre. Si l’on se remémore les idées de Ehala énoncées au chapitre 2, les mutations stochastiques représentent des événements contingents, et rendent dès lors imprévisible l’évolution du système. Toutefois, comme cela est souvent le cas avec des mécanismes aléatoires, un système ne peut conserver le même comportement indéfiniment : la probabilité qu’une pièce tombe toujours du côté face décroît non linéairement avec le nombre de tentatives, et la possibilité qu’une pièce tombe indéfiniment du même côté est nulle. De façon analogue ici, la probabilité que le système reste indéfiniment proche du même attracteur est nulle si les barrières énergétiques qui l’entourent peuvent être franchies. Toutefois, selon la taille du bassin d’attraction et l’inclinaison

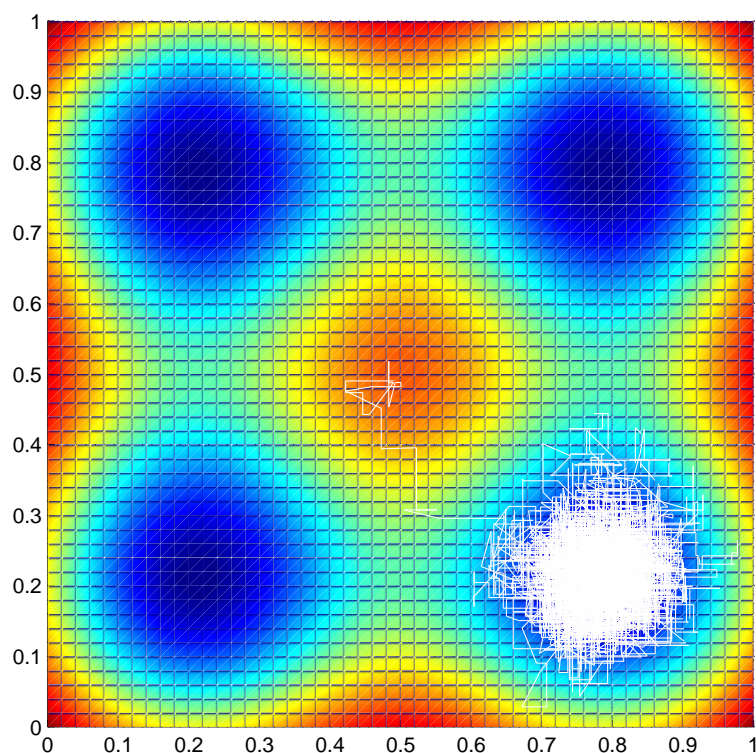


FIG. 6.8 – Evolution selon une distribution des changements sous contraintes après 10,000 pas de temps

de ses pentes, le temps moyen pour échapper à cet attracteur sera plus ou moins long. Seul le comportement asymptotique du système peut-être déterminé selon une certaine probabilité.

Définition d'indicateurs supplémentaires pour l'évolution du système

Dans les cas précédents et les suivants, l'espace des paramètres est de dimension 2, ce qui permet de visualiser aisément les évolutions d'un système. Toutefois, ceci n'est plus possible pour un nombre de dimensions plus important. Il est cependant possible de définir un certain nombre d'indicateurs qui permettent de détecter les périodes de stabilité et d'instabilité d'un système quel que soit le nombre de dimensions. Les scénarios en dimension 2 ou 3 sont alors utiles, puisqu'ils permettent de tester la pertinence des indicateurs. Le problème est que, comme dans nombre de problèmes d'optimisation en mathématiques, la topographie du paysage énergétique est inconnue est qu'il n'est pas possible de s'appuyer sur la position des attracteurs pour calculer si un système est à proximité d'eux ou non.

Une méthode possible est d'essayer de supprimer en partie les fluctuations du système autour d'un minimum du paysage énergétique. Pour cela, il est possible de calculer le barycentre des positions du système pendant un certain laps de temps \mathbf{T} . Si le système demeure dans le bassin d'un attracteur au cours de cette période et si celle-ci est suffisamment longue, alors le barycentre calculé doit être proche de l'attracteur. Il faut toutefois nuancer ce point par le fait que cette proximité est sujette au relief plus ou moins plat du bassin de l'attracteur (plus le bassin est plat, plus la période de temps pour le calcul du barycentre devra être importante

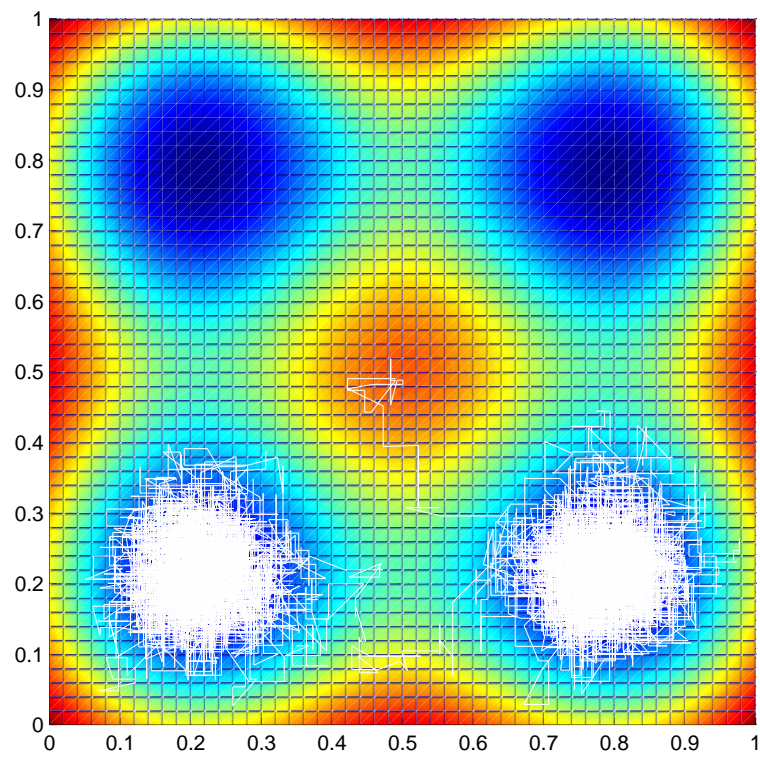


FIG. 6.9 – Evolution selon une distribution des changements sous contraintes après 20,000 pas de temps

pour que celui-ci soit proche de l'attracteur).

Nous pouvons définir un indicateur de *stabilité structurelle* de la façon suivante. Soit \mathbf{T} une période de temps que nous divisons en deux parties égales. Soit \mathbf{B}_1 le barycentre des positions du système pour la première période, et \mathbf{B}_2 celui de la seconde période. Nous calculons alors la distance entre les deux barycentres.

Considérons le cas où le système franchit une barrière énergétique et passe d'un premier bassin d'attraction à un second à la moitié de la période \mathbf{T} . Dès lors, la distance entre le premier et le second barycentre sera plus importante que dans le cas où le système reste dans le même bassin d'attraction au cours de la période \mathbf{T} . Si l'on représente la distance entre les barycentres au cours du temps, une hausse significative de celle-ci traduira un changement de bassin d'attraction.

Encore une fois, l'accroissement de la distance est fonction de la topographie des bassins d'attraction. Il sera d'autant plus faible que ces bassins seront peu marqués et séparés par des barrières énergétiques de faible épaisseur.

Un des moyens de corriger ce problème est en fait d'analyser plus finement l'évolution de la distance entre les barycentres successifs. Cette approche permet en fait de mettre au jour des informations intéressantes à propos d'un paysage énergétique inconnu.

Il convient tout d'abord de déterminer quelle période de calcul \mathbf{T} permet de dégager le plus d'informations à partir de la suite des positions du système linguistique dans l'espace des possibles. Pour une topographie donnée, une valeur trop petite est sujette aux fluctuations rapides du système, tandis qu'une valeur trop importante risque d'entraîner la perte d'informations si les variations du système sont rapides.

Ensuite, il convient de détecter les changements significatifs dans l'évolution de la distance, afin de pouvoir identifier les transitions entre les différents bassins d'attraction. Une fois cette opération effectuée, l'examen de la variation de la distance à l'intérieur d'un bassin d'attraction permet de dégager quelques informations sur la topographie de celui-ci, à condition que la période pendant laquelle le système reste dans ce bassin soit assez importante. En particulier, il est possible d'estimer au mieux la position de l'attracteur par le calcul du barycentre sur la période entière de stabilité.

Nous voyons également apparaître la possibilité d'une application récursive des principes d'analyse à l'intérieur d'une zone de stabilité. En choisissant les meilleures paramètres d'étude pour cette dernière, il sera possible d'avoir une idée plus précise de sa topographie, détecter des minima locaux. . .

Une façon de définir un bon indicateur général de stabilité structurelle, dont les valeurs dépendent moins des distances entre les attracteurs, est de diviser la distance entre les barycentres par la moyenne des deux écarts-types des distributions établis pour les deux périodes successives de la période \mathbf{T} .

Les courbes 6.10, 6.11 et 6.12 représentent successivement les variations d'énergie d'un système et les deux indicateurs de changement (relatif et absolu) définis plus haut. Le paysage est le même que celui défini précédemment.

Impact de la variance de la distribution des transformations fréquentielles sur le nombre de changements de bassin d'attraction

Comme souligné plus haut, les trois scénarios déjà étudiés correspondent à différentes valeurs de la variance de la distribution des transformations possibles. Une question intéressante est d'examiner comment le nombre de changements, c'est à dire le nombre de passages d'un bassin

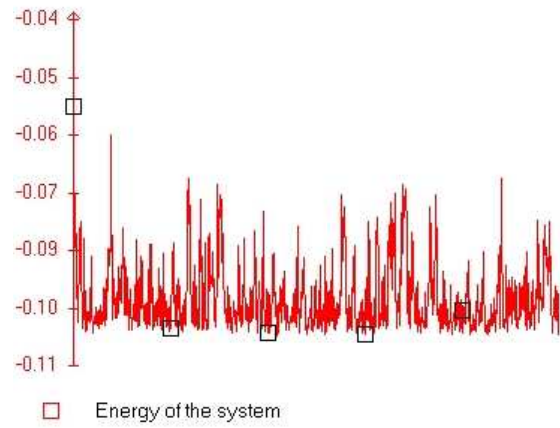


FIG. 6.10 – Evolution de l'énergie du système linguistique

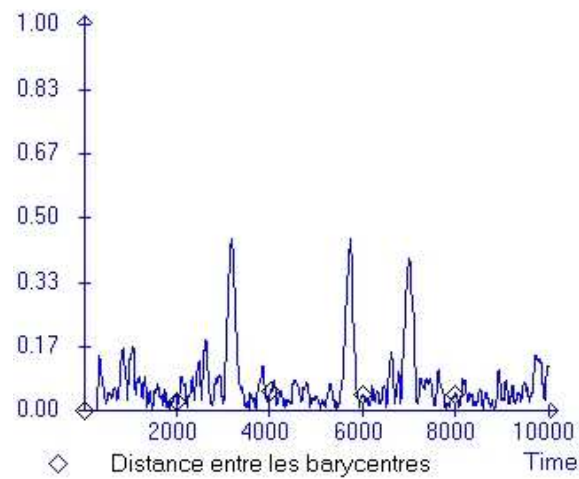


FIG. 6.11 – Un indicateur des changements d'un système en évolution : distance entre les barycentres du système pour deux périodes consécutives

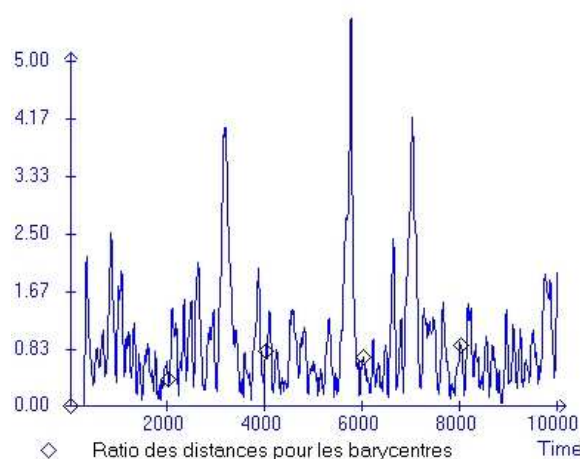


FIG. 6.12 – Evolution du ratio de la distance entre barycentres sur la moyenne des écarts-types des distributions des deux périodes temporelles consécutives considérées

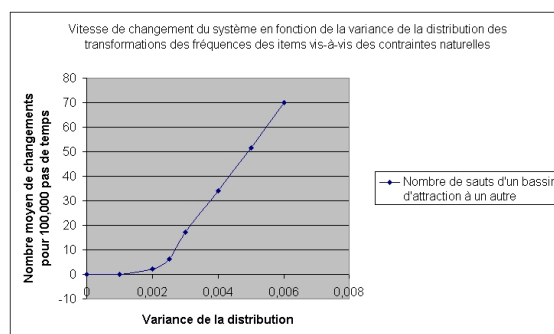


FIG. 6.13 – Evolution du nombre de changements en fonction de la variance de la distribution des transformations possibles

d'attraction à un autre, varie avec la valeur de la variance. En particulier, y a-t-il une valeur limite en-dessous de laquelle il n'est pas possible de quitter un bassin d'attraction ?

La courbe de la figure 6.13 répond aux questions précédentes, et met en évidence pour le système étudié une valeur seuil pour la variance proche de 0.001 sous laquelle le système ne peut quitter son bassin d'attraction initial. Elle montre également qu'au-delà de ce seuil, le nombre de changements par unité de temps est relié linéairement à la variance. Ceci ne peut toutefois être vrai que pour des valeurs de la variance assez faible, puisqu'une limite supérieure sera établie par la situation où le système se déplace aléatoirement sans respect du relief dans le paysage énergétique.

La valeur limite dépend de la profondeur des bassins d'attraction, et des barrières énergétiques à franchir pour passer de l'un à l'autre. Toutefois, le point intéressant ici est qu'une transition de phase en fonction de la variance existe d'une façon générale quelque soit la topographie du paysage énergétique. Ce résultat n'est pas intuitif, puisqu'on pourrait penser que toute barrière énergétique est franchissable si un nombre suffisant de mutations se succèdent dans une direction opposée à celle de l'attracteur.

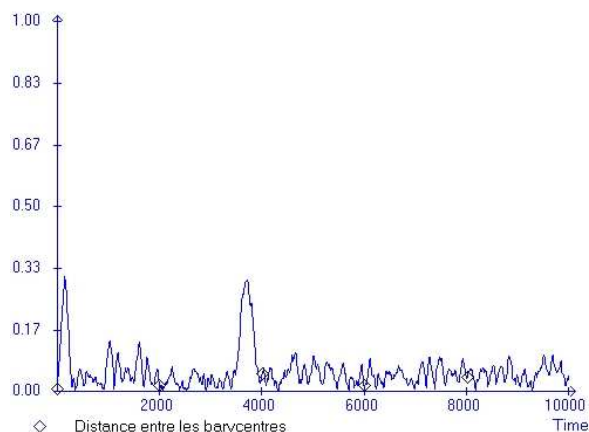


FIG. 6.14 – Evolution de la distance entre barycentres pour une variance égale à 0.002

Si l'on compare l'évolution de la distance entre les barycentres de deux périodes successives, on remarque qu'une variance plus importante entraîne non seulement plus de changements, mais également une distance plus importante entre les barycentres lors d'une période de stabilité structurelle (comparer les figures 6.14 et 6.15). Ceci s'explique logiquement par le fait que la variabilité est plus importante au sein du bassin d'attraction, et que ce phénomène se reflète au niveau des barycentres.

Si l'on analyse le résultat précédent en modifiant conceptuellement non pas la variance de la distribution, mais la topographie d'un bassin d'attraction, nous pouvons dire que plus ce dernier est pentu en direction de l'attracteur, plus un système reste proche de ce dernier, et plus les distances entre barycentres de périodes successives sont faibles (puisque les barycentres sont très proches de l'attracteur). Dès lors, étudier les valeurs de la distance entre les barycentres pour un bassin d'attraction donné permet de savoir si celui-ci est plutôt pentu et/ou de faibles dimensions, sans qu'il soit possible toutefois de trancher entre ces deux caractéristiques.

Avant de passer à l'étude de populations d'individus munis chacun de leur système linguistique (leur idiolecte), nous souhaitons présenter deux courtes expériences qui vont nous permettre de concrétiser certaines propositions énoncées au chapitre 4.

Accroissement de la diversité par exploration de l'espace des possibles

Nous souhaitons mettre ici en valeur par un exemple simple l'accroissement au cours du temps de la diversité d'une famille de systèmes linguistiques à partir d'une situation initiale où les systèmes sont tous dans le même état structural. Nous allons supposer ici un ensemble de 10 systèmes linguistiques indépendants, et montrer comment une exploration stochastique du paysage va conduire à une réflexion progressive de l'espace des états possibles dans l'espace des états réels (voir chapitre 4).

Afin d'avoir un espace des possibles plus riche que celui défini plus haut, nous étendons l'espace des possibles afin de disposer d'un plus grand nombre de bassins d'attraction. La figure 6.16 représente cette transformation qui permet d'obtenir 16 bassins d'attraction.

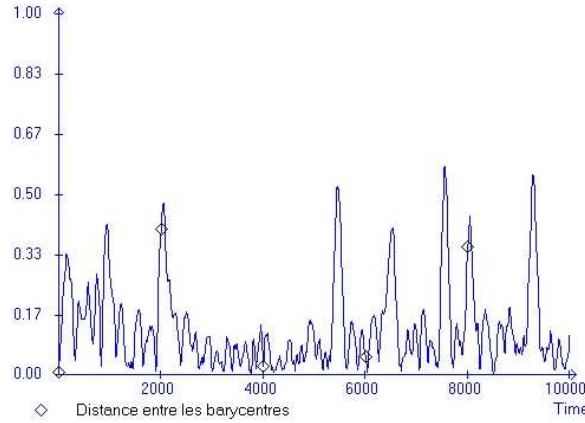


FIG. 6.15 – Evolution de la distance entre barycentres pour une variance égale à 0.006

Une simplification par rapport au scénario de polygenèse est ici que nous envisageons un état initial où l'ensemble des systèmes est déjà présent, et non pas une augmentation progressive du nombre de systèmes, ce qui a probablement été le cas dans la réalité avec la scission de groupes humains devenus trop importants.

Afin de pouvoir mesurer la diversité de l'ensemble des systèmes, nous reprenons un indicateur d'entropie mentionné dans [Oudeyer, 2002]. Si $(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ sont les positions des différents systèmes à la date t , nous définissons tout d'abord pour un point quelconque x la fonction de densité de probabilité suivante :

$$p_n(x, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-\frac{\|x-x_i(t)\|}{\sigma^2}}$$

La valeur de σ doit être définie de façon correcte par l'utilisateur pour bien capturer les caractéristiques de la distribution des $(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$, mais un large intervalle de valeurs donne des résultats corrects. L'indicateur d'entropie est alors défini de la façon suivante :

$$entropy(t) = - \sum_{i=1} l p_n(X_i, t) \ln(p_n(X_i, t))$$

où les $(X_1(t), X_2(t), \dots, X_l(t))$ sont les intersections d'une grille régulière qui recouvre le paysage énergétique.

La courbe 6.17 permet de suivre l'évolution de l'entropie et donc de la diversité du système. On remarque un accroissement initial de l'entropie, qui correspond à une répartition progressive des systèmes dans les différents bassins d'attraction. L'asymptote atteinte au bout d'environ 10,000 pas de temps correspond intuitivement à une distribution où chaque système se trouve dans un bassin différent. Toutefois, cette valeur limite est rarement atteinte puisque suivant les déplacements stochastiques des agents, il est probable qu'une majeure partie du temps, au moins deux agents partagent le même bassin d'attraction. La courbe 6.18 illustre quant à elle la

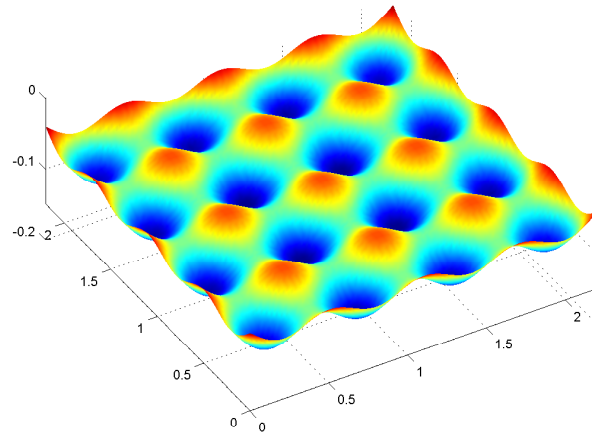


FIG. 6.16 – Un paysage énergétique avec seize bassins d'attraction

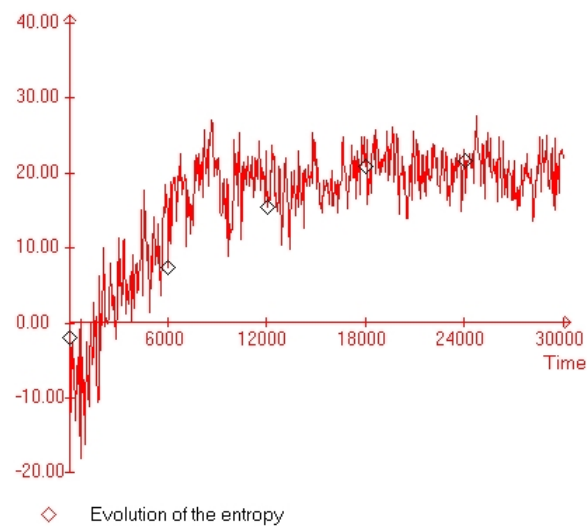


FIG. 6.17 – Evolution de l'entropie d'un ensemble de systèmes linguistiques lors de l'exploration de l'espace des possibles

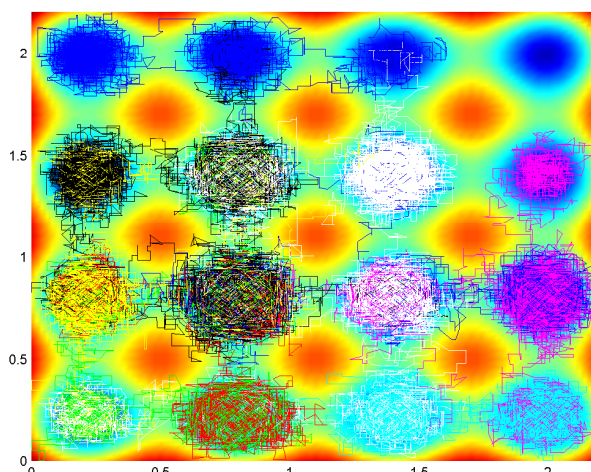


FIG. 6.18 – Vue de la diversité linguistique d'un ensemble de systèmes linguistiques après exploration de l'espace des possibles

situation atteinte après 30,000 pas de temps. On constate que l'exploration par dérive de l'espace des possibles a conduit à la découverte de 15 des 16 bassins du paysage.

Le problème de la mesure d'entropie utilisée est qu'elle n'est applicable qu'à des simulations mettant en jeu un nombre suffisant de systèmes. Si l'on ne considère que deux ou trois éléments, les variations entropiques sont trop faibles entre des configurations assez différentes, ce qui rend cette mesure peu pertinente.

6.2.2 Deuxième série d'expériences : Réseaux sociaux et évolution d'une communauté de locuteurs dans un paysage énergétique plat

Dans la première expérience, nous avons supposé un système linguistique isolé, ce qui pose le problème des interactions entre plusieurs systèmes, aussi bien celles de locuteurs dans une communauté isolée, que les contacts entre langues.

Le but de cette seconde série d'expériences sera d'étudier comment les liens sociaux viennent peser sur les évolutions linguistiques. Afin de procéder du plus simple au plus complexe, les simulations présentées dans cette série considèrent une absence de contraintes internes, ce qui se traduit par un paysage énergétique "plat". Seules les contraintes sociales sont ainsi à l'œuvre pour déterminer les évolutions linguistiques des systèmes.

Distance moyenne au barycentre et distance parcourue en moyenne par pas de temps

Afin d'étudier un macro-système composé de plus d'un système linguistique (nous dénommerons ces systèmes par le terme d'agent), nous allons recourir à plusieurs indicateurs que nous allons maintenant décrire.

Un premier indicateur repose sur la distance moyenne parcourue par pas de temps par les agents. Ceci permet d'apprécier la façon dont les liens sociaux viennent contraindre les évolutions des membres d'un réseau. Cette distance moyenne peut être assimilée au *rythme* ou à la *vitesse d'évolution* d'un système.

Il est également possible de se baser sur l'évolution du barycentre du macro-système. Pour cela, à chaque pas de temps, le barycentre des positions des sous-systèmes dans l'espace des paramètres est calculé. La succession de ces barycentres "synchroniques" au cours du temps permet d'observer la trajectoire "diachronique" du barycentre du système dans l'espace des paramètres.

Deux indicateurs peuvent être défini à partir du barycentre du macro-système. Un premier repose sur la distance moyenne d'un agent au barycentre. Ceci permet d'estimer approximativement comment les liens sociaux contraignent les agents à être proches ou au contraire éloignés les uns des autres. Cet indicateur peut donc être envisagé pour l'instant comme une mesure de la diversité du macro-système, même si l'absence de contraintes internes ne permet pas vraiment de parler de changements et de diversité au sens où nous les avons définis au chapitre 2.

Un second indicateur rend compte de la distance moyenne parcourue par le barycentre par unité de temps. Ceci permet cette fois de mesurer la façon dont la structuration du réseau social influence l'évolution du macro-système dans sa totalité, et renseigne sur le rythme d'évolution de ce dernier.

Il est possible de contraster la vitesse d'évolution d'un macro-système avec la vitesse moyenne des systèmes qui le composent (par exemple la rapidité d'évolution d'une langue par rapport à celle de ces idiolectes). Il en est particulier possible alors d'observer comme s'opère une certaine stabilisation du macro-système malgré les évolutions rapides de ces membres.

Enfin, le contraste entre la distance moyenne parcourue par le barycentre et celle parcourue par les agents permet de se faire une idée sur la façon dont s'opère une certaine stabilisation du macro-système malgré les évolutions de ces membres en raison de la structuration sociale.

Influence des liens sociaux sur l'évolution de deux locuteurs

Une première étape pour évaluer l'importance des réseaux sociaux est d'évaluer l'influence de la valeur des liens sociaux entre deux locuteurs isolés, avant d'aborder des communautés plus importantes comme nous le ferons plus bas.

Les liens étudiés ici sont tous symétriques : le lien qui traduit l'influence du locuteur **A** sur le locuteur **B** est de même valeur que le lien qui représente l'influence du locuteur **B** sur le locuteur **A**.

Selon la valeur des liens entre deux locuteurs, leur trajectoire évolutive vont être plus ou moins voisines, ou au contraire plus ou moins éloignées dans l'espace des possibles.

Les figures 6.19, 6.20, 6.21, 6.22 et 6.23 permettent d'illustrer successivement les cas où les liens réciproques entre les deux agents sont : nuls, faiblement positifs, fortement positifs, faiblement négatifs et fortement négatifs. Il est assez aisé de constater que pour des liens positifs, les deux trajectoires sont d'autant plus proches que la valeur de ces liens est importante, et que pour des liens négatifs, les deux trajectoires seront au contraire plus distantes en cas de valeur (absolue) plus élevée. Dans le cas de liens nuls, les locuteurs se déplacent selon deux marches aléatoires indépendantes. Rappelons ici que si l'on se reporte à la définition de la déviation sociale optimale, la relation entre la force des liens et le comportement des locuteurs n'est pas linéaire, de même que celle entre la distance des locuteurs dans l'espace des possibles et ce même comportement. Ceci se traduit par exemple par le fait que plus la force des liens augmente, et moins l'augmentation de leur impact est importante. De même, des agents unis par des liens répulsifs se repoussent d'autant moins qu'ils sont distants dans l'espace des possibles.

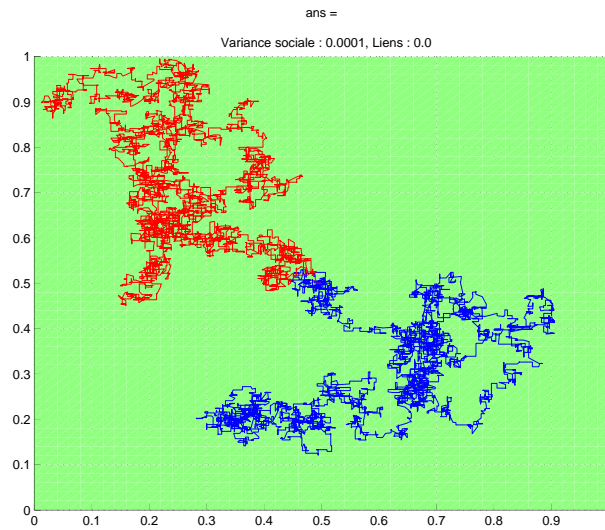


FIG. 6.19 – Evolution de deux locuteurs en l'absence de liens sociaux (variance sociale = 0.0001)

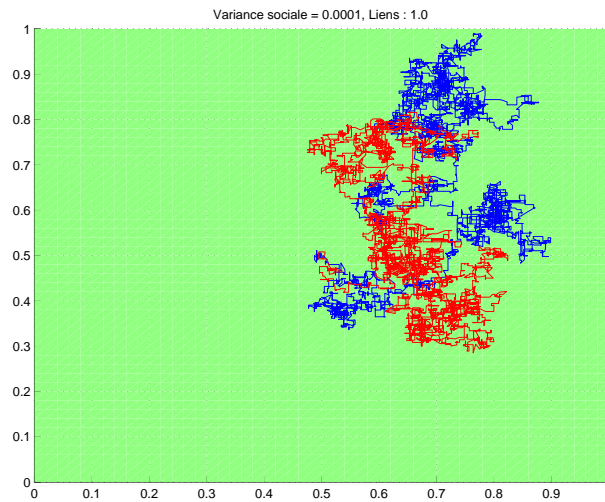


FIG. 6.20 – Evolution de deux locuteurs unis par deux liens positifs symétriques de valeur 1.0 (variance sociale = 0.0001)

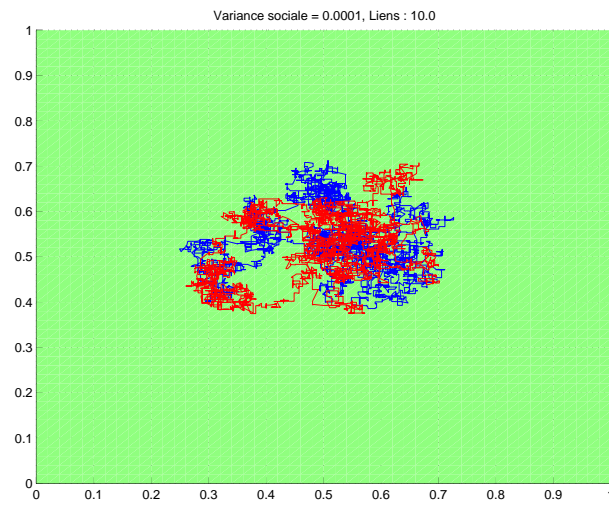


FIG. 6.21 – Evolution de deux locuteurs unis par deux liens positifs symétriques de valeur 10.0 (variance sociale = 0.0001)

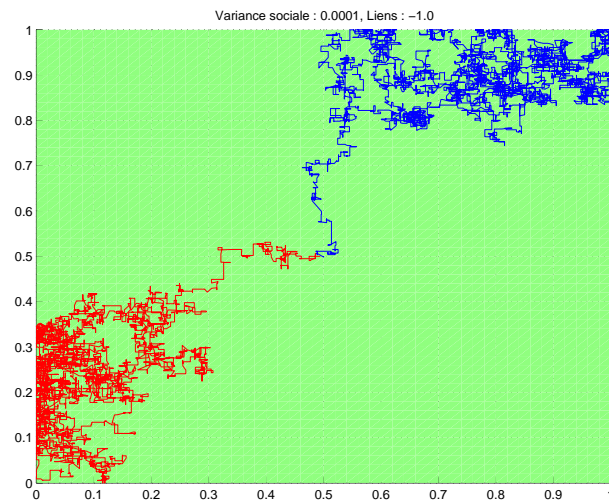


FIG. 6.22 – Evolution de deux locuteurs unis par deux liens négatifs symétriques de valeur -1.0 (variance sociale = 0.0001)

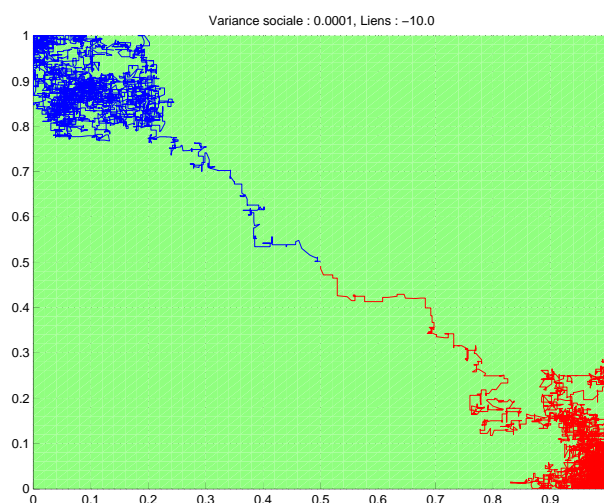


FIG. 6.23 – Evolution de deux locuteurs unis par deux liens négatifs symétriques de valeur -10.0 (variance sociale = 0.0001)

Il est possible de quantifier plus précisément la distance entre deux trajectoires évolutives en mettant à profit les indicateurs définis ci-dessus. La figure 6.24 représente ainsi la valeur de la distance moyenne au barycentre des deux agents en fonction de la valeur des liens qui les unissent, et ceci pour deux valeurs de la variance sociale (0.001 et 0.00001). On constate que cette distance se distribue selon la force des liens comme une fonction sigmoïde : ses variations sont pratiquement nulles pour une valeur absolue des liens importante, et une transition rapide se produit autour d'une valeur des liens nulle. La distance est importante pour des liens négatifs, et beaucoup plus faible pour des liens positifs, ce qui est naturel puisque des agents unis par des liens attractifs auront tendance à être proches, alors qu'une répulsion sociale se traduira par une plus grande distance entre les agents, et donc une plus grande distance moyenne au barycentre.

Notons ici que la valeur limite atteinte avec des liens négatifs et pour la variance sociale la plus faible correspond à une opposition presque maximale entre les deux agents, situés chacun près d'un angle de l'espace des paramètres de forme carrée (les agents occupent deux angles opposés). Le barycentre se trouve alors au centre de l'espace et la distance entre cette position et un angle du carré est égale à $\sqrt{(0.5^2 + 0.5^2)} = 0.70$. Pour une variance plus importante (0.001) et des liens toujours négatifs, la répulsion n'est plus aussi forte et les agents se déplacent à plus grande distance des coins opposés ; la distance moyenne au barycentre est augmentée en conséquence.

Plus généralement, pour la variance sociale la plus importante, les agents ne sont pas aussi contraints par les contraintes sociales que dans le cas de plus petite variance, et la distance moyenne au barycentre est plus faible pour les liens négatifs, et plus importante pour les liens positifs.

La figure 6.25 illustre quant à elle la distance moyenne parcourue par pas de temps par le barycentre et par les agents en fonction des liens sociaux. On constate que la distance parcourue par le barycentre est moins importante que celles des agents, ce qui traduit une certaine stabilité du macro-système vis à vis des évolutions de ces membres. Mais l'on observe surtout que les distances parcourues sont pratiquement constantes quelle que soit la valeur des liens entre les

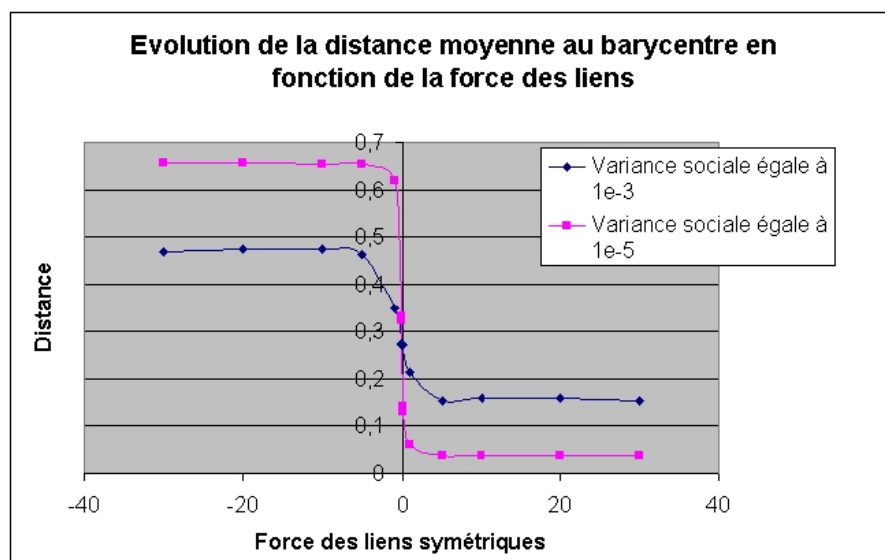


FIG. 6.24 – Evolution de la distance moyenne au barycentre en fonction des liens (symétriques) entre agents

agents. La distance moyenne parcourue par le barycentre et les agents n'est donc pas influencée *dans le cas de deux agents* par la force des liens qui les unissent (voir les cas à plus de deux agents plus bas). En fait, une observation très fine du graphique permet de déceler une très faible augmentation lors du passage de liens négatifs à des liens positifs, mais celle-ci est très faible par rapport aux valeurs des distances moyennes parcourues (de l'ordre de 1 ou 2 %).

On constate en outre que les distances moyennes parcourues par les agents et le barycentre sont plus faibles pour une variance plus petite. Ceci s'explique par le fait qu'une variance plus faible oblige les agents à être beaucoup plus congruents pour leur déplacements, et que leur capacité d'exploration de l'espace des possibles sera réduite en conséquence. Une réduction du rythme d'évolution des agents entraîne alors naturellement une diminution du rythme d'évolution du macro-système. Nous remarquons enfin que pour la plus faible variance, la vitesse d'évolution du barycentre est pratiquement égale à celle des agents. Ceux-ci sont si en accord sur leur déplacement que leur vitesse d'évolution s'assimile à celle du barycentre.

Influence de la variance

Dans la première expérience précédente, nous avons contrasté les valeurs des indicateurs selon la force des liens sociaux et également deux valeurs de la variance sociale.

Il nous paraît intéressant d'examiner plus en détail l'impact de cette variance sociale sur les évolutions du système.

Comme nous l'avons fait plus haut, il nous paraît "pédagogique" de commencer cette courte étude en illustrant la problématique par deux figures présentant les trajectoires évolutives des deux agents. Ceux-ci sont liés dans l'expérience par des liens attractifs symétriques de valeur 10, et les deux variances sont égales à 0.001 et 0.0001. Les deux figures 6.27 et 6.26 permettent de constater que dans le cas d'une plus faible variance sociale, les trajectoires des deux agents sont beaucoup plus voisines et localisées spatialement que dans le cas d'une variance faible après le

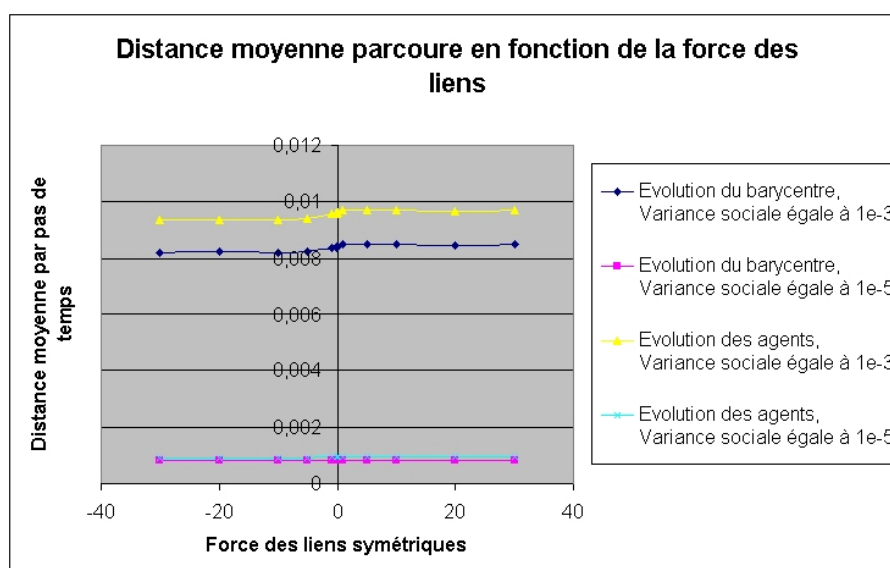


FIG. 6.25 – Evolution de la distance moyenne parcourue par les agents et le barycentre en fonction des liens (symétriques) entre agents

même nombre de pas d'évolution.

Afin de tester les impressions précédentes nées de l'observation des trajectoires évolutives des agents, nous avons étudié l'évolution des différents indicateurs en fonction de la variance sociale. Les valeurs de celle-ci varient entre $1e-7$ et 10.0 , et les graphes recourent à une échelle des abscisses logarithmique. La figure 6.28 présente l'évolution de la distance moyenne des agents au barycentre pour différentes valeurs des liens sociaux, tandis que la figure 6.29 illustre l'évolution de la distance moyenne parcourue par les agents et le barycentre pour les mêmes paramètres.

On constate plusieurs résultats intéressants :

- on retrouve l'opposition très nette entre des liens positifs, qui entraînent une proximité des deux agents, et des liens négatifs qui conduisent au contraire à une répulsion entre les deux agents et une distance au barycentre importante ;
- plus la variance sociale est faible, plus les distances parcourues en moyenne par le barycentre ou les deux agents sont faibles. Celles-ci tendent d'ailleurs vers 0 lorsque la variance tend elle-même vers 0. Une absence de liberté vis à vis de la norme sociale conduit à un gel des évolutions du système, tout comme une trop faible variance naturelle empêchait un système d'évoluer ;
- plus la variance est faible, plus la distance au barycentre est faible dans le cas de liens sociaux positifs, et plus elle est importante et proche de la limite dans le cas de liens répulsifs. Lorsque la variance tend vers 0, la distance tend vers 0 quelle que soit la force des liens positifs, et vers 0.70 quelle que soit la valeur des liens négatifs. Pour des valeurs plus importantes de la variance, la liberté engendrée par une plus faible adéquation à la norme sociale se traduit plus ou moins selon la force des liens sociaux, et nous retrouvons les résultats des paragraphes précédents (la figure 6.24 est ainsi une vue en coupe de la figure 6.28 pour une valeur de la variance égale à 0.001 ou 0.00001). Pour une variance

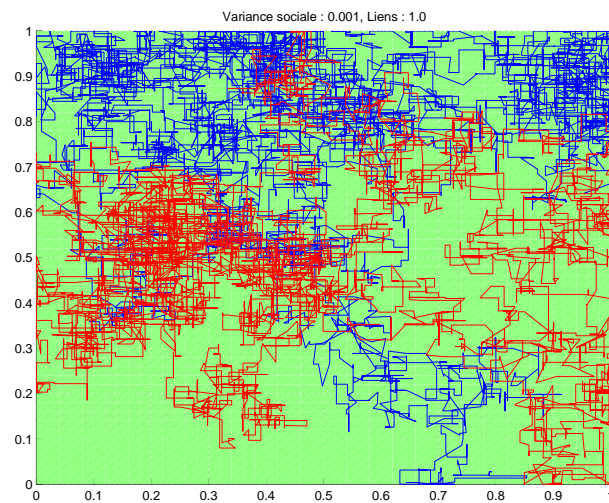


FIG. 6.26 – Evolution de deux locuteurs unis par deux liens positifs symétriques de valeur 1.0 pour une variance sociale égale à 0.001

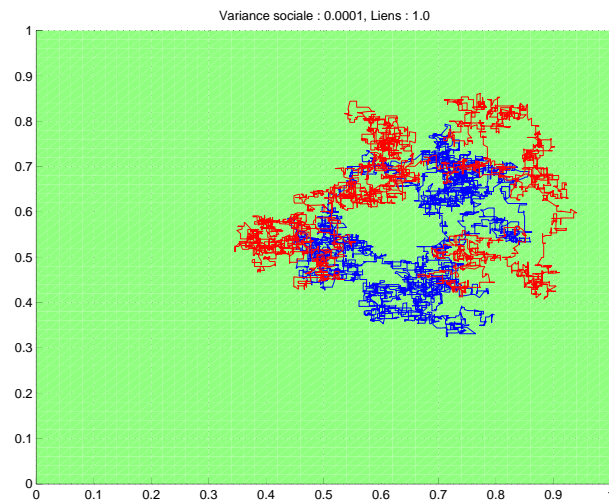


FIG. 6.27 – Evolution de deux locuteurs unis par deux liens positifs symétriques de valeur 1.0 pour une variance sociale égale à 0.0001

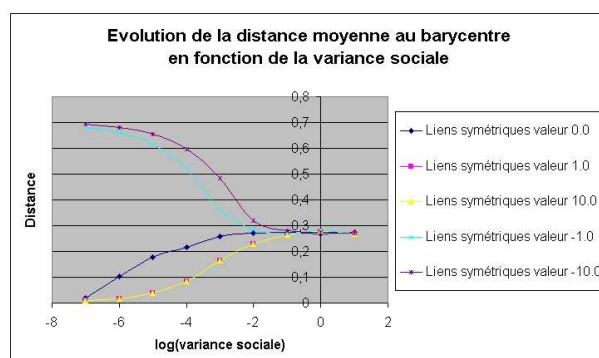


FIG. 6.28 – Evolution de l'entropie du système et de la distance moyenne parcourue par les locuteurs en fonction de la variance de la distribution sociale

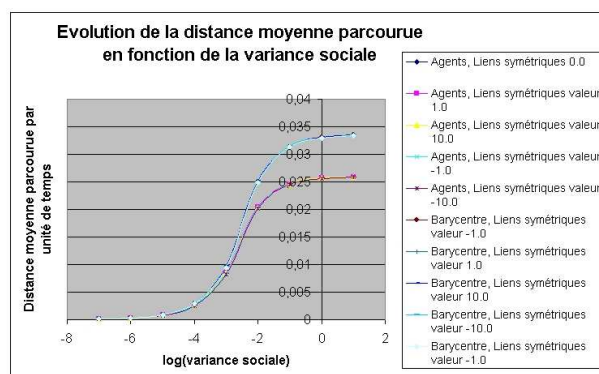


FIG. 6.29 – Evolution de la distance moyenne parcourue par les agents en fonction de la variance sociale

sociale supérieure ou égale à 0,1, les courbes se confondent, et la valeur des liens sociaux ne joue plus aucun rôle. La liberté laissée aux agents pour leur évolution vis à vis de la norme sociale est telle que leurs liens deviennent non pertinents ;

- La courbe de la distance moyenne au barycentre tend vers 0 même lorsque les liens sociaux entre agents sont nuls ; ceci peut s'expliquer par le fait qu'une variance de plus en plus faible permet de moins en moins de déviations autour de la norme sociale. Plus la variance est faible, moins les agents ont donc tendance à bouger quand leurs liens sont nuls, puisque la déviation sociale prend toujours une valeur nulle. Comme en outre la situation initiale des simulations correspond à deux agents situés tout deux au centre de l'espace des paramètres, la distance de ceux-ci au barycentre est initialement nulle et demeure très faible si ceux-ci ne peuvent que très peu se déplacer. En fait, la courbe théorique pour une durée de temps infinie, une variance non nulle et des liens nuls devrait être horizontale, mais les valeurs des indicateurs sont établies durant une période de temps finie, ce qui conduit à la courbe observée ;

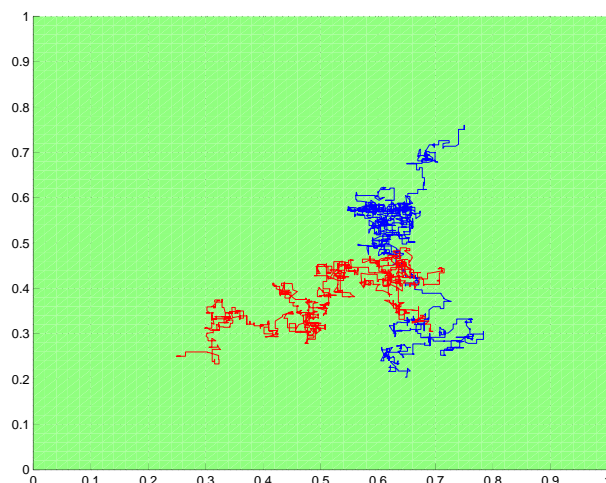


FIG. 6.30 – Evolution de deux locuteurs unis par des liens positifs symétriques et initialement localisés en deux positions distinctes de l’espace des possibles

Contact entre deux locuteurs de systèmes différents

Une dernière expérience très simple avant d’examiner des communautés de plus de deux agents consiste à observer le déroulement d’une situation de “contact”, où deux agents unis par des liens positifs et initialement localisés en deux positions distinctes de l’espace des possibles sont mis en contact. Dans cette expérience, nous allons envisager le cas de liens symétriques et celui de liens asymétriques.

La figure 6.30 illustre la situation où deux agents unis par deux liens symétriques de valeur 10.0 sont mis en contact, alors que la figure 6.31 présente le cas où l’un des deux liens prend une valeur de 10.0 et le second est nul.

Dans le premier cas, on observe que les agents convergent rapidement l’un vers l’autre et commencent alors à évoluer de façon stochastique selon les marges de liberté laissées par le choix de la variance sociale. Les deux agents adoptent la même démarche pour se rejoindre.

Par contraste, dans le second cas, où c’est l’agent de couleur bleue qui est fortement influencé par celui de couleur rouge, on observe bien un rapprochement des agents, mais uniquement à l’initiative de l’agent bleu, qui rejoint un agent rouge qui se déplace de façon totalement aléatoire (puisque sa déviation sociale à chaque pas de temps est toujours nulle). Ceci est tout à fait en accord avec la structure de la norme sociale en vigueur, qui laisse l’agent rouge libre et contraint l’agent bleu à rester proche du premier.

Influence du nombre d’individus

Après avoir étudié en détail l’influence de différents paramètres sur l’évolution de deux agents, il est temps d’examiner l’impact du nombre d’agents sur les évolutions du système. En effet, si l’on se remémore les expériences de Nettle et le problème de la norme communautaire (voir chapitre 2), nos prédictions sont que le système devrait évoluer moins vite lorsque le nombre d’agents augmente.

Les figures 6.32 et 6.33 permettent de confirmer cette intuition. Comme pour les expériences précédentes, la première courbe représente la distance moyenne au barycentre, et la seconde les

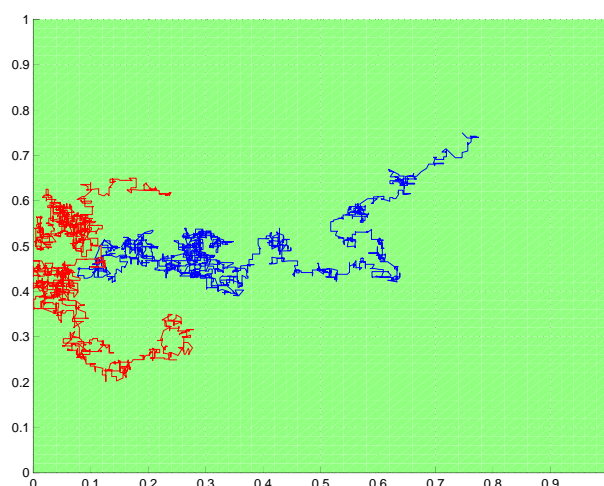


FIG. 6.31 – Evolution de deux locuteurs unis par des liens positifs ou nuls asymétriques et initialement localisés en deux positions distinctes de l'espace des possibles

distance moyennes parcourues par pas de temps par le barycentre des agents et ces derniers.

L'examen de la figure 6.32 permet d'observer une croissance lente et limitée par une asymptote horizontale des courbes qui représentent des liens symétriques négatives ou nuls : lorsque le nombre d'agents augmente, la distance entre les agents augmente légèrement et de plus en plus lentement pour atteindre une valeur limite, d'autant plus importante que la force des liens répulsifs est importante.

Au contraire, la distance des agents au barycentre diminue avec le nombre d'agents dans les cas de liens positifs, mais là encore, une asymptote supérieure à 0 semble limiter la décroissance. Cette asymptote est d'autant plus faible que la valeur des liens est grande.

Pour le cas de liens positifs, la diminution de la distance moyenne au barycentre avec le nombre d'agents peut s'expliquer simplement par la plus grande force d'attraction qu'exerce alors la communauté sur un de ses membres. La déviation sociale est fortement marquée en direction du barycentre des agents, et un agent a donc de plus en plus de mal à s'éloigner de celui-ci au fur et à mesure que le nombre d'agents augmente. Néanmoins, une asymptote horizontale non nulle vient limiter la décroissance de la distance moyenne au barycentre. Celle-ci est vraisemblablement due à la variance sociale non nulle qui empêche les agents de se rejoindre tout à fait.

Une analogie peut permettre de mieux comprendre la situation : lorsqu'une planète a consommé toutes ses réserves de combustible nucléaire, après un passage par le stade de géante rouge, la pression exercée par les réaction nucléaires ne parvient plus à compenser l'attraction gravitationnelle, et l'étoile s'effondre sur elle-même. Si la masse initiale de cette étoile est inférieure à 1.44 masse solaire, l'effondrement est stoppé au bout d'un moment car une pression de dégénérescence vient équilibrer les forces gravitationnelles. Cette pression est due aux répulsions entre les électrons des atomes, selon le principe quantique d'exclusion de Pauli (on parle aussi de pression de Fermi). On observe alors une naine blanche extrêmement dense.

Si l'étoile a une masse comprise entre 1.44 et 3.2 masses solaires, la pression créée par les électrons dégénérés n'est plus suffisante pour compenser la gravité, et un nouvel effondrement

se produit, au cours duquel les électrons pénètrent le noyau des atomes et fusionnent avec les protons. Ce procédé de neutronisation produit un grand nombre de neutrons, et les interactions fortes entre eux produisent une nouvelle force de pression qui parvient à stopper l'effondrement gravitationnel. Une étoile à neutrons est née.

De la même façon que les pressions de dégénérescence viennent empêcher une étoile de se transformer en trou noir, une variance sociale non nulle peut équilibrer les forces d'attraction entre les agents lorsque le groupe devient trop compact, et conduire à une valeur minimale non nulle de la distance moyenne au barycentre. De la même façon qu'une masse plus importante peut conduire à une étoile à neutrons plutôt qu'à une naine blanche, des liens attractifs de plus forte valeur conduiront à un équilibre caractérisé par une plus faible distance moyenne au barycentre.

Il nous paraît plus délicat d'expliquer l'accroissement de la distance moyenne entre agents dans le cas de liens négatifs ou nuls. Dans le cas de liens nuls, les agents se déplacent aléatoirement sur la carte. Plus le nombre d'agents sera important, plus ceux-ci se répartiront dans l'espace des paramètres, et plus le barycentre sera proche de la position centrale de l'espace. Nous pensons que cette position centrale a pour conséquence de réduire la distance moyenne entre les agents et le barycentre, puisqu'intuitivement, les distances au barycentres seraient plus importantes si celui-ci était placé dans un des angles de l'espace des paramètres. L'effet est néanmoins peu marqué, ce qui explique la faible croissance des valeurs avec le nombre d'agents.

Pour le cas de liens négatifs, un examen détaillé des trajectoires évolutives des agents permet de voir une distribution de ces agents le long des frontières de l'espace des paramètres. Un accroissement du nombre d'agents rend plus difficile toute progression d'un agent vers le barycentre situé au centre de l'espace, puisque les agents plus nombreux situés sur l'arête opposée de l'espace des paramètres repoussent l'agent sur sa propre arête. Ceci conduit à un accroissement modéré de la distance moyenne au barycentre.

Si l'on s'intéresse maintenant à l'évolution des distances moyennes parcourues, on constate que celle du barycentre du système décroît de façon approximativement exponentielle pour se diriger vers 0 pour un grand nombre d'agents, et ce de façon très similaire quelle que soit la valeur des liens tissés entre les agents. On constate toutefois un faible écart entre les courbes, et un ordonnancement qui les classe selon la force des liens pour les cas qu'elles représentent : les distances les plus faibles correspondent aux liens les plus négatifs, puis viennent les liens faiblement négatifs. . . Les courbes pour les liens positifs sont cependant pratiquement superposées sur la figure.

La décroissance de la distance moyenne parcourue par le barycentre s'explique dans tous les cas par le fait qu'un plus grand nombre d'agents minimise les variations du barycentre par le simple phénomène de moyennage. En effet, les mouvements d'un agent seront d'autant moins reflétés au niveau du barycentre qu'un grand nombre d'agents sera pris en compte dans le calcul de ce barycentre.

L'évolution des distances moyennes parcourues par les agents est qualitativement différente de celle des barycentres. Pour des liens nuls, on observe que la distance moyenne parcourue reste constante quelque soit le nombre d'agents. Ceci est bien sûr normal puisque les agents ne s'influencent pas les uns les autres et que le nombre d'agents ne joue donc aucun rôle. Pour des liens positifs, on observe une légère augmentation de la distance moyenne parcourue par les agents avec le nombre d'agents. Cette augmentation peut s'expliquer par la plus grande cohérence d'une population lorsque le nombre d'agents augmente. Encore une fois, une plus forte norme sociale

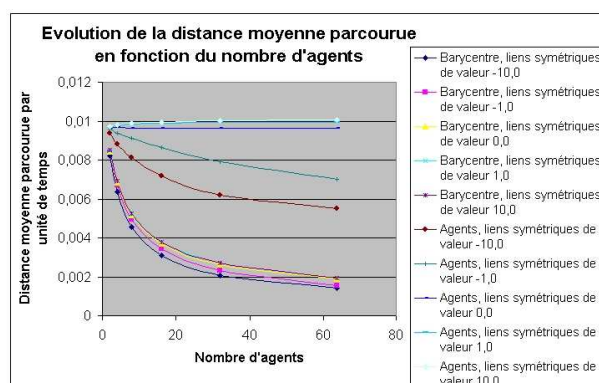


FIG. 6.32 – Evolution de la distance moyenne parcourue par le barycentre et les agents en fonction du nombre d'agents

permet aux agents d'évoluer de façon plus congruente, et augmente la vitesse de leurs déplacements. Enfin, dans le cas de liens négatifs, la distance moyenne parcourue diminue avec le nombre d'agents. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'un plus grand nombre d'agents maintient plus fortement ceux-ci sur les bords de l'espace des paramètres, et rend en conséquence leur évolution plus difficile.

L'écart entre les distances moyennes parcourues par les agents ou le barycentre selon la valeur des liens n'existe pas pour les situations à deux agents. Cette observation rejoint les résultats de la première expérience de cette série, où l'on observait une indépendance de la distance moyenne parcourue par le barycentre ou les agents vis à vis des liens sociaux.

Pour plus de deux agents cette fois, on peut conclure à un accroissement du rythme d'évolution du barycentre et des agents lorsque la valeur des liens sociaux augmente (depuis des valeurs très négatives jusqu'à des valeurs très positives). Cette effet est marqué pour des valeurs négatives différentes, et entre des valeurs négatives et positives, mais beaucoup moins pour des valeurs positives différentes. En particulier, la distinction entre liens positifs et négatifs est particulièrement importante en ce qui concerne les rythmes d'évolution des agents lorsque leur nombre augmente.

Les résultats principaux à retenir de cette expérience est (i) qu'un accroissement du nombre d'agents diminue le rythme d'évolution d'un système et son exploration de l'espace des possibles et (ii) que cet accroissement diminue la diversité du système en cas de liens positifs, et l'augmente en cas de liens négatifs. Une diversité minimale subsiste cependant quelque soit le nombre d'agents si les liens sont positifs, et la diversité est aussi limitée dans le cas de liens négatifs. Enfin, (iii) le rythme d'évolution des agents unis par des liens positifs s'accroît légèrement avec une augmentation du nombre d'agents, alors qu'il diminue fortement si les liens sont négatifs.

Plage de distribution des liens sociaux

Pour conclure cette deuxième série d'expériences centrées sur les contraintes sociales, nous pouvons étudier rapidement comment la distribution géographique d'un réseau social peut influencer les caractéristiques de l'évolution d'un macro-système linguistique.

Plus concrètement, nous considérons 10 agents disposés en anneau. Cette topologie mime un espace géographique composé d'une seule dimension, ce qui peut paraître très éloigné de la

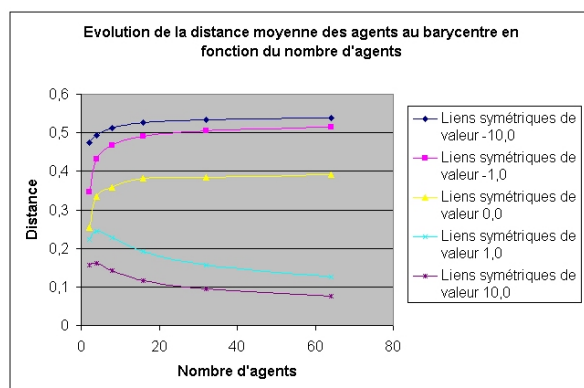


FIG. 6.33 – Evolution de la distance moyenne des agents au barycentre du système en fonction du nombre d’agents

situation d’un espace bidimensionnel plus classique. Toutefois, nous pensons que les résultats établis avec cette topologie monodimensionnelle peuvent être étendus sans problème à une topologie en grille bidimensionnelle.

Chaque agent peut établir des liens avec les agents situés à sa gauche et à sa droite. Nous souhaitons comparer trois schémas de connexion des liens, qui reflètent une distribution plus ou moins “condensé” des liens d’un agent vers les agents qui l’entourent. Dans le premier cas, l’agent n’établit des liens (de valeur 10.0) qu’avec les deux agents qui l’entourent immédiatement, comme le montre la table 6.1. Ceci correspond à une situation où un agent n’établit des relations qu’avec ses plus proches voisins géographiques. Dans le second cas, illustré par la table 6.2, l’agent établit des liens de valeur 6.0 avec les agents immédiatement à sa droite et à sa gauche, ainsi que des liens de valeur 4.0 avec les agents situés 2 rangs à sa gauche et à sa droite. Dans ce cas de figure, les liens tissés par un agent avec d’autres restent limités dans leur extension géographique, mais s’étendent toutefois sur une plus longue distance que dans le premier cas.

Enfin, la troisième et dernière situation correspond à une distribution “étalée”, où chaque agent établit des liens de valeur 2.0 avec l’ensemble des agents de l’anneaux (table 6.3). Dans ce dernier cas, un agent communique avec l’ensemble des agents de l’environnement, mais selon des liens assez faibles.

On constate que pour les trois distributions, la somme des valeurs des liens pour chaque agent est toujours égale à 20.0, et symétrique de part et d’autre des agents. Ceci permet de comparer des situations où la force globale des liens qui lient un agent au reste de la communauté est identique.

L’analyse des données des simulations conduit aux résultats suivants :

- la distance moyenne parcourue par les agents est constante quelle que soit la distribution adoptée ;
- la distance moyenne parcourue par le barycentre du système est également constante ;
- la distance moyenne des agents au barycentre évolue pour les trois distributions comme illustré par la figure 6.34. On constate une décroissance de la distance des agents au barycentre avec l’étalement des liens le long de la dimension géographique.

0	10	0	0	0	0	0	0	0	10
10	0	10	0	0	0	0	0	0	0
0	10	0	10	0	0	0	0	0	0
0	0	10	0	10	0	0	0	0	0
0	0	0	10	0	10	0	0	0	0
0	0	0	0	10	0	10	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	10	0	0
0	0	0	0	0	0	10	0	10	0
0	0	0	0	0	0	0	10	0	10
10	0	0	0	0	0	0	0	10	0

TAB. 6.1 – Distribution géographique condensée des liens pour les agents en anneau

0	6	4	0	0	0	0	0	4	6
6	0	6	4	0	0	0	0	0	4
4	6	0	6	4	0	0	0	0	0
0	4	6	0	6	4	0	0	0	0
0	0	4	6	0	6	4	0	0	0
0	0	0	4	6	0	6	4	0	0
0	0	0	0	4	6	0	6	4	0
0	0	0	0	0	4	6	0	6	4
4	0	0	0	0	0	4	6	0	6
6	4	0	0	0	0	0	0	6	0

TAB. 6.2 – Distribution géographique intermédiaire des liens pour les agents en anneau

Nous pouvons donc conclure de cette dernière expérience que pour un nombre d'agents fixé et pour une projection à plus ou moins grande distance des liens sociaux dans l'espace géographique, la vitesse d'évolution des systèmes linguistiques ou du barycentre de ces systèmes reste constante. Le seul impact est une plus grande proximité entre les agents et leur barycentre, c'est à dire une plus faible diversité linguistique du macro-système, lorsque le réseau social est largement distribué spatialement.

6.2.3 Troisième série d'expériences : Evolution d'un système linguistique communal sous contraintes internes et sociales

Au cours des deux premières séries d'expériences, nous avons étudiés respectivement le cas d'un seul système soumis à des contraintes naturelles, puis celui de plusieurs systèmes en interaction, mais en l'absence de contraintes naturelles et distribuées (seules des contraintes sociales étaient mises en œuvre). Pour conclure notre étude générale, il nous reste à croiser les deux types de contraintes.

Problème de la détermination d'indicateurs d'évolution du système

Un des problèmes qui apparaît lorsque l'on s'intéresse à l'évolution de systèmes d'agents en interaction dans un paysage énergétique est la difficulté de définir des indicateurs d'évolution pertinents.

2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

TAB. 6.3 – Distribution géographique étalée des liens pour les agents en anneau

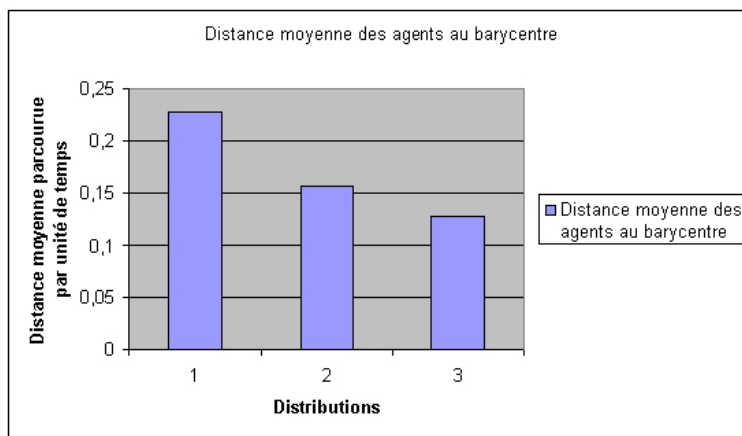


FIG. 6.34 – Evolution de la distance moyenne parcourue par le barycentre pour les trois situations

Nous pouvons bien sûr toujours recourir aux indicateurs définis et utilisés dans la seconde série d’expériences, à savoir la distance moyenne au barycentre des agents, et la distance moyenne parcourue par les agents et le barycentre de ceux-ci au cours du temps. Toutefois, ces indicateurs ne nous permettront pas de détecter les changements d’état à la fois des agents et du barycentre.

Il est également possible pour les agents de recourir à l’indicateur défini lors de la première série d’expériences, à savoir le nombre de transitions d’un attracteur à un autre. Il serait tentant d’appliquer également cet indicateur au barycentre, mais le processus de moyennage à l’origine du calcul de cet élément fait qu’il ne suit pas du tout le relief du paysage. Nous nous contenterons donc de mesurer comme dans la deuxième série d’expérience la distance moyenne parcourue par le barycentre, tout en gardant à l’esprit que cet indicateur n’est pas aussi pertinent que précédemment.

Afin de pouvoir étudier la façon dont les agents d’un système se comportent les uns vis à vis des autres dans le paysage énergétique, nous devons être en mesure de détecter des phases où les agents n’occupent pas le même bassin d’attraction.

Puisque notre but ici est d’évaluer les conséquences des interactions sociales sur les évolutions de systèmes linguistiques dans un paysage énergétique, et non pas d’étudier ce dernier, nous

pouvons mettre à profit notre connaissance de celui-ci pour définir des indicateurs pertinents.

Nous allons ainsi utiliser un indicateur proche de l'entropie que nous avons définie plus haut. Nous avons souligné alors les difficultés d'appliquer cette mesure à des systèmes composés d'un petit nombre d'agents, et ce problème doit être résolu lors de la définition de notre nouvel indicateur.

Nous travaillerons par la suite avec le même paysage énergétique, composé de 4 puits identiques, que nous avons utilisé dans les premières expériences de la première série. Etant donné un agent, il est facile de déterminer le bassin d'attraction dans lequel il se trouve connaissant sa position.

Pour chacun des 4 bassins d'attraction, nous pouvons faire la somme à chaque pas de temps des agents qui se trouvent en son sein, et diviser cette somme par le nombre d'agents total. Nous définissons alors le nouvel indicateur entropique de la façon suivante :

$$entropy(t) = - \sum_{i=1}^4 p_i \ln(p_i)$$

où p_i est le ratio du nombre d'agents qui appartiennent au i ème bassin d'attraction sur le nombre total d'agents.

La mesure précédente prendra sa plus faible valeur lorsque tous les agents du système seront situés dans le même bassin d'attraction. Au contraire, la valeur la plus importante sera atteinte lorsque les agents seront les plus distribués possibles dans les différents bassins. Le problème de l'ancienne définition de l'entropie est corrigé.

Connaître l'évolution de l'entropie au cours du temps permettra d'avoir une idée sur les changements au sein du système multi-agents, tandis que la valeur moyenne de l'entropie pour une simulation renseignera sur la répartition moyennes des agents dans les différents bassins d'attraction, et donc sur la *diversité* du macro-système.

Etude de l'évolution de deux agents selon différentes configurations sociales

Nous allons donc commencer comme dans la deuxième série d'expériences par étudier l'évolution de deux agents en fonction de la valeur des liens symétriques qui les unissent.

Les figures 6.35 et 6.36 donnent respectivement la distance moyenne des agents au barycentre et la distance moyenne parcourue par les agents et le barycentre du système.

Les courbes observées sont en tout point similaires aux courbes que nous avons observées pour la situation en absence de contraintes naturelles. L'ensemble des analyses faites plus haut peut donc être appliqué ici, et il semble que pour cette expérience, l'existence de contraintes naturelles ne perturbent pas les caractéristiques qualitatives de l'évolution du système.

Pour confirmer cet état de fait, la figure 6.37 représente l'entropie moyenne du système au cours d'une simulation. La courbe observée s'explique assez facilement : la valeur de l'entropie importante et constante pour les valeurs de liens négatives s'explique par le fait que les répulsions entre les deux agents empêchent ceux-ci de se trouver dans le même bassin d'attraction. L'entropie vaut donc (presque) toujours la valeur maximale prise lorsque les agents sont dans deux bassins d'attraction différents, soit $2.0 \times 0.5 \times \log(0.5) = \log(2) = 0.69$. Ceci est vrai quelle que soit la valeur de la variance sociale.

Pour des valeurs des liens positives, on observe une diminution de l'entropie, qui caractérise le fait que les agents se trouveront plus souvent dans le même bassin d'attraction. On remarque

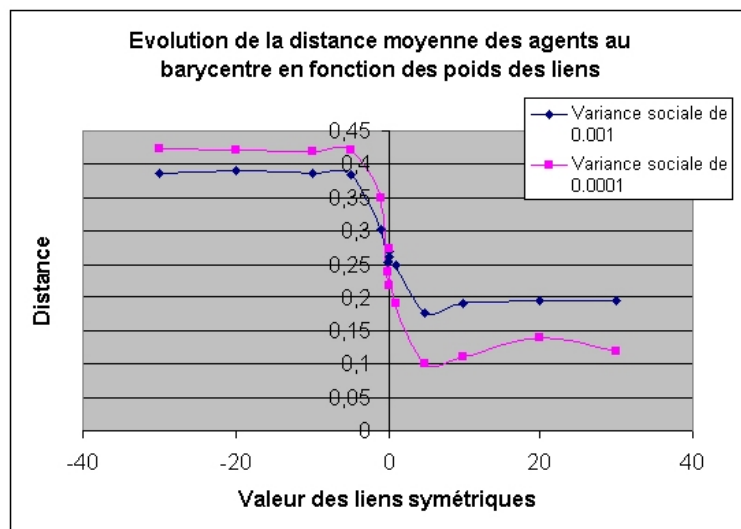


FIG. 6.35 – Evolution de la distance moyenne au barycentre en fonction des liens (symétriques) entre agents en présence de contraintes naturelles

également le fait que la courbe pour la variance sociale la plus faible se situe sous la courbe de variance sociale plus importante, toujours pour des liens positifs. Ceci est en accord avec la plus grande proximité des deux agents dans le second cas, et donc avec le fait qu'ils auront très peu tendance à se trouver dans des bassins d'attraction différents.

Entropie et distance des agents au barycentre sont donc globalement congruentes pour cette expérience.

Un exemple d'évolution de deux agents unis par un lien positif

Nous pouvons illustrer l'étude précédente par les trajectoires évolutives d'une simulation particulière. Dans cette expérience, les deux agents sont reliés par des liens positifs de valeur 1.0.

Figure 6.38, l'observation de la situation après 5,000 pas de temps permet de constater que l'agent bleu a quitté le bassin d'attraction qu'il occupait avec le second agent rouge, et a évolué rapidement en franchissant deux barrières d'énergie successives. Les deux agents se trouvent très éloignés l'un de l'autre, et cette situation ne répond pas de façon adéquate aux contraintes sociales. On s'attend donc logiquement à une réaction du système pour corriger ce déséquilibre.

La situation après 7,000 pas de temps permet de constater que le système a réagi pour corriger partiellement le déséquilibre précédent (figure 6.39). Pour cela, l'agent rouge a franchi à son tour une barrière énergétique sur les traces de l'agent bleu, et se trouve maintenant dans le bassin d'attraction adjacent au sien. Cette situation n'est pas encore optimale, puisque les deux agents ne se trouvent pas dans le même bassin d'attraction.

Après 8,000 pas de temps (figure 6.40, les deux agents se trouvent à nouveau dans le même bassin d'attraction et le système satisfait à la fois aux contraintes naturelles et sociales. Ce n'est pas l'agent rouge qui a rejoint l'agent bleu, mais au contraire celui-ci qui a rebroussé chemin pour gagner le bassin d'attraction occupé par l'agent rouge et qu'il avait traversé auparavant.

Nous pouvons rapprocher cet exemple de comportement de phénomènes linguistiques réels,

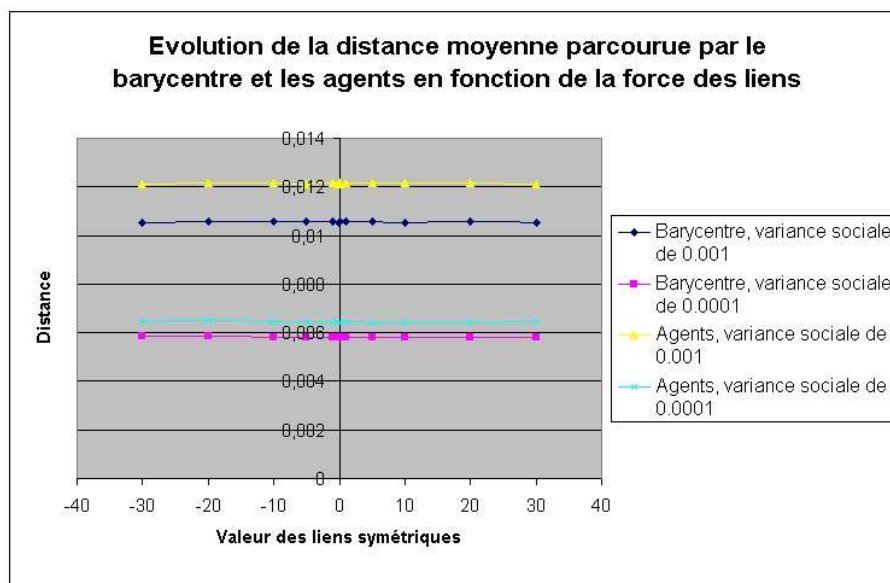


FIG. 6.36 – Evolution de la distance moyenne parcourue par les agents et le barycentre en fonction des liens (symétriques) entre agents en présence de contraintes naturelles

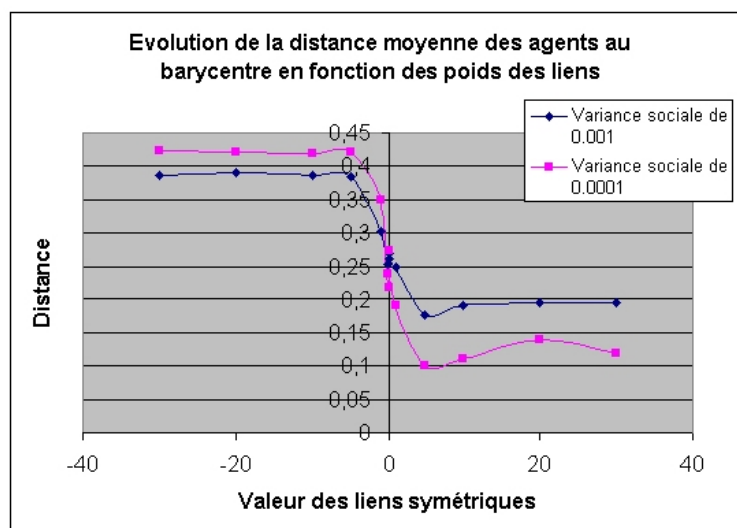


FIG. 6.37 – Evolution de l'entropie du système en fonction des liens (symétriques) entre agents en présence de contraintes naturelles

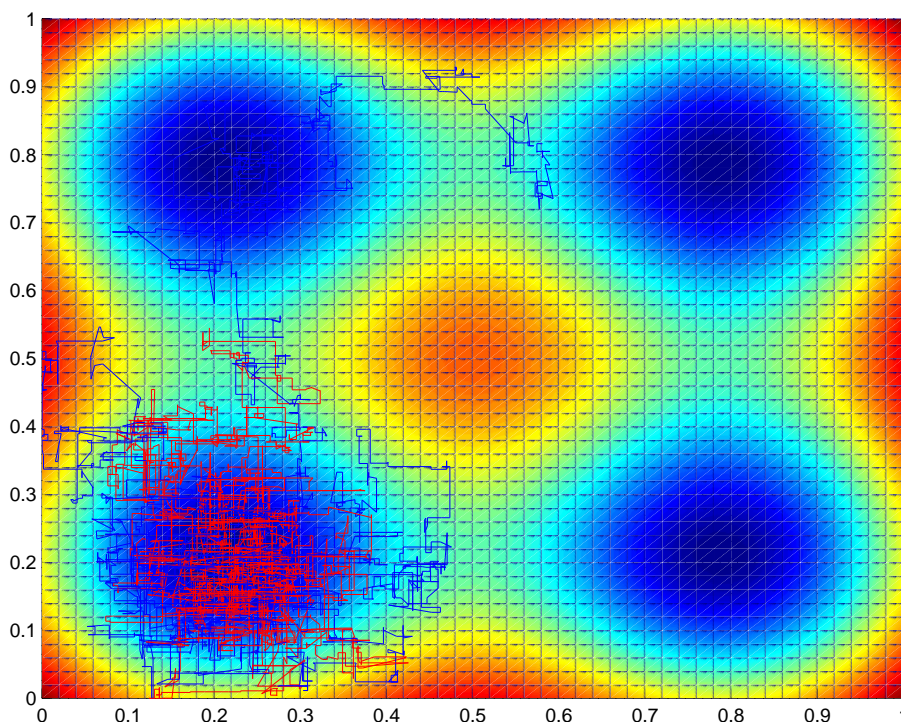


FIG. 6.38 – Trajectoires évolutives de deux agents liés par des liens positifs de valeur 1.0, 5000 pas de temps

comme celui que nous avons décrit au chapitre 2, et qui portait sur la fusion puis la fusion de deux phonèmes. Si l'on assimile chaque agent à une couche de la société, on peut observer pendant un certain temps une différenciation entre les deux strates sociales, puis un rapprochement et l'adoption d'une norme linguistique commune. Des phénomènes contingents sont à l'origine de ces phénomènes transitoires, qui nous semblent se produire dans la réalité.

Impact de la variance sociale sur les évolutions d'un système composé de deux agents

De la même façon que pour l'étude des liens, l'étude de l'évolution des systèmes en fonction de la variance sociale conduit globalement aux mêmes résultats que dans la seconde série d'expériences. Nous ne nous attardons donc pas à reproduire ici les résultats, et passons à un cas plus intéressant.

Etude de systèmes comportant différents nombres d'agents

Toujours en suivant le décours des expériences de la deuxième série, nous allons enfin examiner l'influence du nombre d'agents sur l'évolution d'un macro-système linguistique

Les figures 6.41 6.42 et 6.43 donnent dans l'ordre la distance moyenne des agents au barycentre, la distance moyenne parcourue par le barycentre, et l'entropie du système.

Comme dans le cas d'un paysage énergétique plat, la distance parcourue en moyenne par le barycentre diminue avec le nombre d'agents. Les mêmes raisons que celles invoquées précédem-

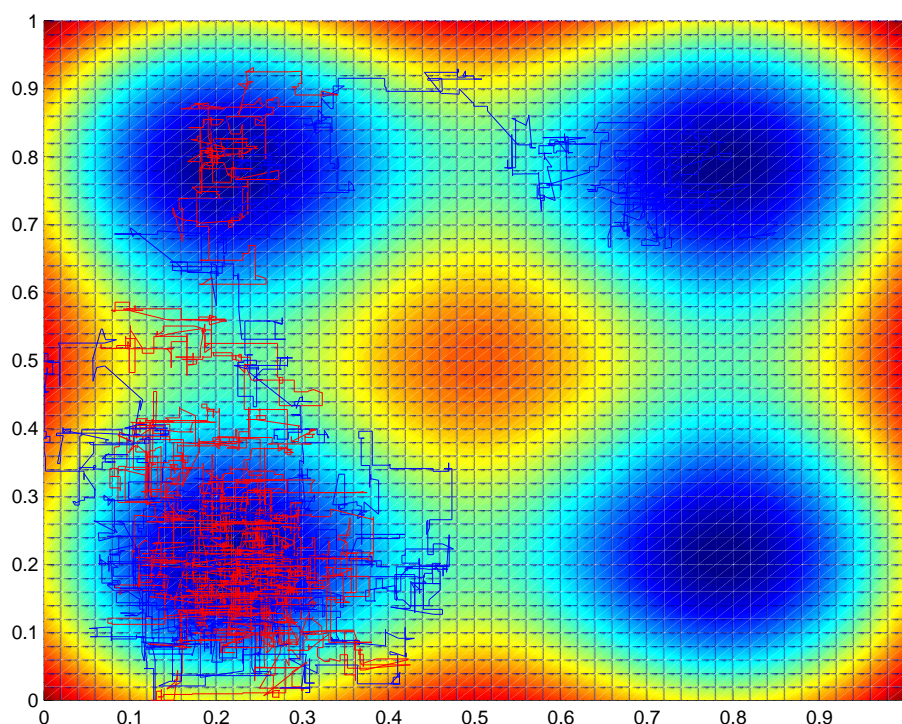


FIG. 6.39 – Trajectoires évolutives de deux agents liés par des liens positifs de valeur 1.0, 7000 pas de temps

ment peuvent également être appliquées ici, modulo le fait que les agents ont tendance à suivre les reliefs du paysage énergétique.

Les valeurs de l'entropie du macro-système et de la distance moyenne des agents au barycentre sont de nouveau congruentes, quelle que soit la valeur des liens sociaux ou le nombre d'agents.

En outre, les schémas d'évolution de ces deux grandeurs en fonction du nombre d'agents sont similaires à celui de la distance des agents au barycentre pour l'expérience correspondante de la deuxième série avec un paysage énergétique plat, y compris au niveau d'une légère croissance des courbes pour les liens positifs avant une décroissance marquée. Nous pouvons donc à nouveau translater les explications de l'expérience de la deuxième série à celle-ci :

- en ce qui concerne l'évolution de la distance des agents au barycentre, nous pouvons constater que celle-ci augmente légèrement pour les valeurs de liens négatives, ce qui est dû encore une fois aux répulsions entre systèmes qui auront tendance, tout en restant dans les bassins d'attraction, à se déplacer vers les frontières de l'espace des paramètres au fur et mesure de l'augmentation du nombre d'agents ;
- l'entropie du système croît pour les valeurs de liens négatives, ce qui est en accord avec l'idée qu'un plus grand nombre d'agents opposés à cause de liens répulsifs se répartiront de la façon la plus distribuée possible dans les bassins d'attraction, et augmenteront donc d'autant la valeur de l'entropie ;
- pour des liens nuls, la simple augmentation du nombre d'agents conduira à une distribution plus homogène des agents dans les bassins d'attraction (diminution des effets de "petite taille" du système), et conduira donc aussi à une légère augmentation de l'entropie. On

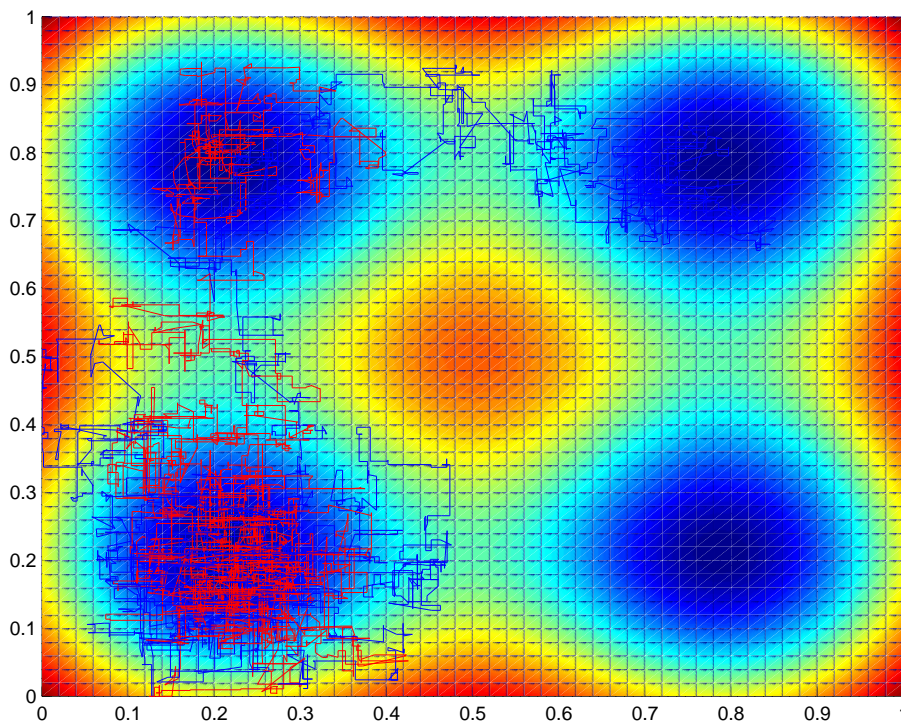


FIG. 6.40 – Trajectoires évolutives de deux agents liés par des liens positifs de valeur 1.0, 8000 pas de temps

constate d'ailleurs que la courbe pour les liens nuls se trouve sous les courbes pour les liens négatifs.

- pour les liens de valeur 1.0, on constate une légère croissance de l'entropie et de la distance moyenne des agents au barycentre, avant une décroissance marquée. L'accroissement de l'entropie lors de l'augmentation de la taille du système de 2 à 4 puis 8 agents nous semble correspondre à la même logique que celui de la courbe de liens nuls. La simple augmentation du nombre d'agents et la relative faiblesse des liens conduit à une meilleure occupation des bassins d'attraction, et donc à une plus grande entropie. Cependant, quand l'augmentation des agents se fait trop importante, la grande cohérence du système vient limiter les changements d'états pour les agents (à cause d'une déviation sociale marquée en faveur de la communauté), qui se retrouvent à être beaucoup plus nombreux dans les mêmes bassins d'attraction, ce qui diminue la valeur de l'entropie ;
- ce dernier schéma explicatif se confirme dans l'évolution de la courbe pour des liens de valeur 10.0. L'épisode de croissance de cette courbe est beaucoup plus restreint que celui de la précédente, ce qui s'explique par la plus grande cohésion du groupe. Cette cohésion contrebalance beaucoup plus vite l'augmentation d'entropie liée à l'accroissement du nombre d'agents, et la diminution d'entropie se produit beaucoup plus rapidement.

Pour plus de lisibilité, nous avons représenté l'évolution de la distance moyenne parcourue par les agents en fonction du nombre de ceux-ci sur un graphe indépendant. La figure 6.44 permet de constater un certain entrelacement des courbes pour les différentes valeurs de liens, mais également une décroissance peu marquée pour une valeur des liens de -1.0, et une décroissance cette fois plus nette pour une valeur de -10.0. Ceci est encore une fois similaire à la situation

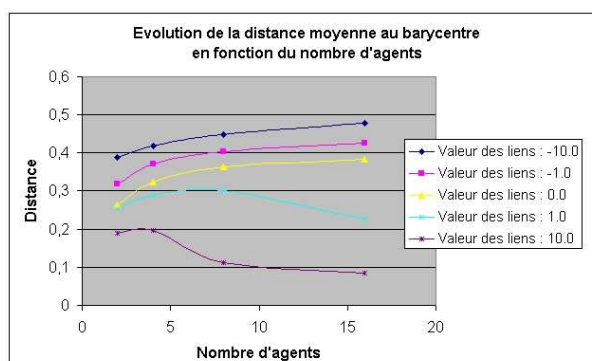


FIG. 6.41 – Evolution de la distance moyenne des agents au barycentre du système en fonction du nombre d'agents (liens symétriques de valeur 1.0 entre tous les agents)

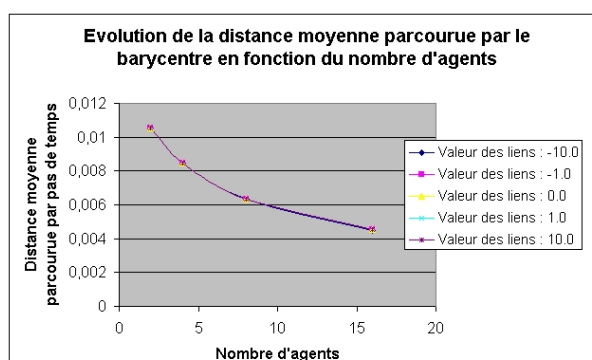


FIG. 6.42 – Evolution de la distance moyenne parcourue par le barycentre en fonction du nombre d'agents

observée pour un paysage énergétique plat. Néanmoins, on peut noter que si les tendances sont les mêmes que pour la situation en absence de contraintes naturelles et distribuées, les variations sont beaucoup plus faibles, de l'ordre de quelques pourcents au plus. La prise en compte de contraintes naturelles et distribuées vient donc minimiser les variations de la distance moyenne parcourue par les agents en fonction de leur nombre.

Conclusions préliminaires

Il apparaît au travers des expériences précédentes et en première approche que, pour des valeurs intermédiaires des variances naturelle et sociale, les contraintes internes ne modifient pas les résultats qualitatifs qui avaient été obtenus avec un paysage énergétique plat, mais imposent seulement des contraintes sur la façon dont les agents se déplacent dans l'espace des paramètres. Une bonne congruence est observée en outre entre la valeur de l'entropie d'un macro-système et la distance moyenne des agents de ce système à leur barycentre. Ce dernier indicateur, que nous avons assimilé à une mesure de diversité linguistique de façon légère lors de la deuxième série d'expériences, se révèle en fait valide. A l'inverse, l'existence de contraintes sociales ne vient pas modifier la façon dont les agents se déplacent dans le paysage, c'est à dire selon une dynamique d'équilibres ponctuels.

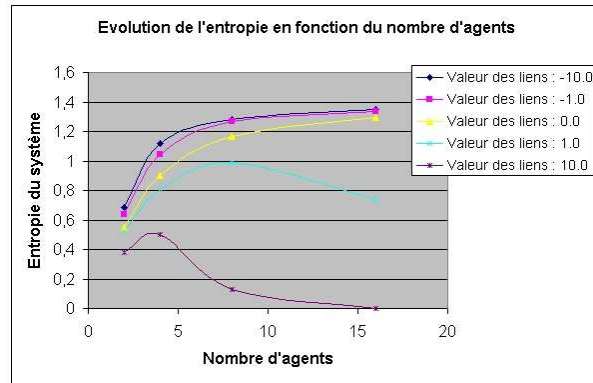


FIG. 6.43 – Evolution de l'entropie du système en fonction du nombre d'agents

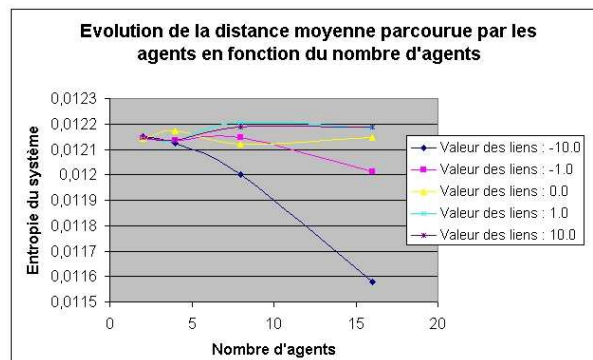


FIG. 6.44 – Evolution de la distance moyenne parcourue par les agents en fonction du nombre d'agents

Même si des expériences supplémentaires sont à envisager pour bien confirmer ce fait, la relative indépendance entre les contraintes internes et les contraintes sociales va apparemment dans le sens de l'*existence de domaines opérationnellement distincts au sens de Maturana : les contraintes sociales ne modifient pas les caractéristiques des évolutions dues aux contraintes internes, de la même façon que ces dernières n'ont pas d'influence sur les caractéristiques des évolutions résultant des contraintes sociales*. Si des différences peuvent être observées, elles le sont plutôt au niveau quantitatif, comme nous l'avons vu plus haut.

L'ensemble de ces études est encore très préliminaire vis à vis de nombreux aspects, et ne peut offrir que des conclusions partielles et fragiles sur l'évolution des systèmes linguistiques. Un de nos projets dans un futur proche sera d'approfondir nos études, selon de multiples directions :

- en considérant d'autres types de paysage énergétique, en particulier des paysages présentant des reliefs plus riches ;
- en tentant de définir des indicateurs plus pertinents de l'évolution du système, permettant en particulier de caractériser la directionnalité des évolutions de celui-ci, élément qui a fait tout à fait défaut dans les expériences précédentes ;
- en testant des situations asymétriques pour les liens sociaux, et surtout en testant des situations de contact ;
- en tentant d'appliquer notre modèle à des systèmes réels comme des systèmes vocaliques ;
- en mettant en jeu la notion de contexte que nous n'avons pas exploitée dans nos expériences.

6.2.4 Analyse et extrapolation des résultats des expériences

Idiolectes, langages communaux et agents

La première étape qu'il convient de franchir avant d'analyser plus finement les résultats précédents est d'opérer le lien entre les phénomènes réels que sont les idiolectes ou les langues avec les agents du système.

Le lien le plus immédiat est bien sûr celui qui fait correspondre à chaque agent un individu et son idiolecte. Les réseaux sociaux de nos expériences sont alors les réseaux sociaux qui unissent les individus dans la réalité.

Toutefois, comme le montre la figure 6.45, qui illustre l'évolution pendant 10,000 pas de temps d'un réseau composé de deux classes distinctes de 8 individus reliés par des liens positifs (les trajectoires bleue et blanche représentent les deux barycentres des deux classes, tandis que les trajectoires rouges et jaune représentent deux individus appartenant chacun à une des classes), les évolutions du barycentre d'un système linguistique sont très voisines de celles d'un des agents de ce même système. Elles apparaissent bien de plus faible amplitude et arborent un aspect plus tortueux, mais elles présentent néanmoins comme les mouvements des agents les caractéristiques d'un mouvement brownien. Dans le cas de liens négatifs, cette dernière propriété est également conservée, mais les agents et leur barycentre sont éloignés.

Sur la base des similarités précédentes que nous pourrions qualifier de structurelles, nous pouvons nous demander s'il n'est pas possible de considérer également dans certains cas un agent comme un système communal représentant un ensemble d'individus. Nous pensons que ceci est possible à partir du moment où les agents possèdent des idiolectes voisins, ce qui conduit à un barycentre représentatif des réalités linguistiques de la communauté en jeu.

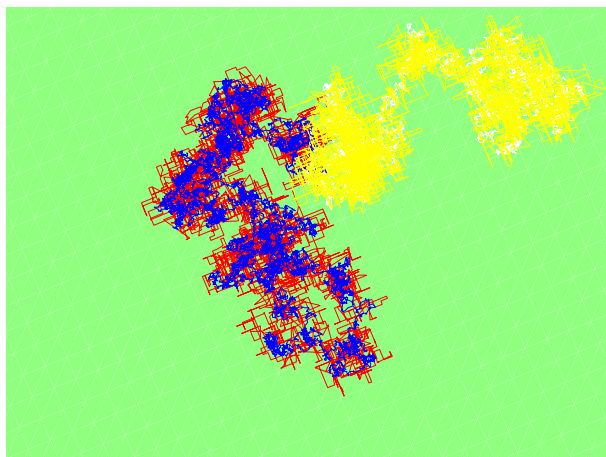


FIG. 6.45 – Evolution des barycentres des membres de deux classes différentes, et comparaison avec les trajectoires de deux agents de ces classes

Nous pouvons renforcer cet argument en insistant sur la dimension fractale des réseaux sociaux dans les communautés humaines. En effet, si de nombreux réseaux locaux sont formés par les interactions d'un nombre restreint d'individus, des macro-structures sociales plus importantes existent également et englobent les réseaux précédents, tout en étant englobées elle-mêmes dans des structures d'encore plus grande taille. Les plus globales et les plus connues sont vraisemblablement les classes sociales, sans compter les structures horizontales entre personnes d'une même classe d'âge, et les deux classes correspondant aux deux sexes.

Dès lors, il semble possible d'inscrire un agent dans cette macro-structure fractale, et de le faire correspondre à une certaine granularité de description pertinente pour l'expérience. Ceci signifie qu'un agent peut englober un nombre plus ou moins important d'individus selon le niveau de détail souhaité. Le plus simple pour définir l'agent en jeu est alors de lui assigner la valeur du barycentre des idiolectes qu'il regroupe, bien que nous ayons vu plus haut que cette démarche n'est pas toujours la plus pertinente.

Si un agent regroupe un ensemble d'individus, est-il possible de traduire au niveau de cet agent les principales caractéristiques des idiolectes qui le composent ? Nous pensons que jouer sur la valeur de la variance sociale peut traduire des caractéristiques du groupe social. Une valeur peu importante refléterait un groupe cherchant à s'identifier au reste de la communauté, et reproduisant fidèlement au niveau linguistique la norme communale. Au contraire, une valeur de la variance plus élevée traduirait une plus grande indépendance du groupe vis à vis de la norme du reste de la communauté.

En franchissant encore une étape dans l'abstraction de la notion d'agent, nous pouvons même envisager que des agents représentent des *langues* différentes. De la même façon que la linguistique historique postule une homogénéité de la population pour ses travaux, nous remplacerions alors l'ensemble des locuteurs de la langue par une seule entité. Encore une fois, nous pensons que ceci est rendu possible par la proximité des idiolectes des locuteurs d'une même langue. Une telle représentation permet alors d'étudier des situations de contacts linguistiques à un niveau macro-populationnel, même s'il nous paraît plus réaliste dans de telles situations de redescendre

à une échelle inférieure, afin de bien capturer la complexité des phénomènes en jeu.

En postulant les propositions précédentes, nous avons bien sûr en tête l'application de notre modèle aux structures sociétales de la préhistoire. Nous pouvons rappeler ici que le schéma sociétal de base pour cette période est un groupe de 25 individus environ.

L'intérêt de pouvoir considérer un agent comme un individu ou un groupe d'individus est que notre modèle peut dès lors traiter à la fois des évolutions internes à un groupe particulier, et celles d'un ensemble de groupes en interactions. Le cas préhistorique rend d'autant plus licite le double niveau d'interprétation du modèle que la faiblesse des contacts entre groupes crée une ligne de démarcation franche entre les contacts inter-groupes et les contacts intra-groupes (en termes d'intensité).

Quel type de paysage énergétique pour les systèmes linguistiques ?

Lors de la conclusion du chapitre 2 et aussi au sein même de ce chapitre, nous avons explicitement posé la question de la topographie du paysage énergétique dans lequel évoluent les systèmes linguistiques. Une première proposition est un paysage plat sans optima, qui résulterait d'une trop grande faiblesse des contraintes internes sur les structures linguistiques pour créer un relief marqué. Une seconde proposition est un paysage au relief plus marqué, dans lequel les systèmes linguistiques peuvent évoluer sous l'action de diverses forces.

La première série d'expériences réalisée plus haut nous permet de nous pencher sur cette question avec une conception plus tangible des évolutions linguistiques d'un système selon les différents cas. La réflexion s'effectue sur un système en isolation, et nous observons différents scénarios évolutifs selon le choix de la variance naturelle :

- si la variance est nulle ou quasi-nulle, le système évolue en direction du minimum local dont le bassin d'attraction contient sa configuration initiale, puis se stabilise une fois ce minimum atteint ;
- si la variance n'est pas nulle mais reste inférieure à une certaine valeur critique, le système fluctue autour d'un attracteur au sein du bassin d'attraction de celui-ci, mais ne parvient jamais à franchir les barrières d'énergie autour de cet attracteur, ce qui lui permettrait de gagner une autre bassin ;
- pour des valeurs de la variance naturelle au-delà de la valeur limite précédente, mais qui demeurent néanmoins limitées, le système évolue autour des attracteurs, mais peut sauter de l'un à l'autre au gré d'événements contingents. Ces derniers lui permettent en effet, par une accumulation d'évolutions allant à l'encontre des contraintes internes, de franchir les barrières énergétiques séparant les attracteurs. De façon intuitive, plus une barrière est haute, plus le système a des difficultés à la franchir ; selon la hauteur, les sauts peuvent être très rares, voire impossibles ;
- enfin, pour des valeurs de la variance très importantes, le système évolue dans l'espace des paramètres sans réellement tenir compte de la topographie.

La première situation précédente semble en contradiction avec l'évolution des langues telle que nous l'observons aujourd'hui, puisque le modèle prédit un système final stable, alors que les systèmes linguistiques contemporains sont en perpétuelle évolution. Deux appréciations différentes du phénomène peuvent être mentionnées ici : une première possibilité est que les langues actuelles n'ont toujours pas fini leur course vers un minimum du paysage énergétique, et que

leurs évolutions servent à améliorer en permanence leur adéquation aux contraintes internes, c'est à dire à descendre les pentes du bassin d'attraction en direction de l'attracteur. Dès lors, nous devrions nous attendre à une stabilisation des langues dans un futur plus ou moins lointain. Il peut paraître étrange, au vu des évolutions observées en linguistique historique ou en sociolinguistique, que les langues aient pu évoluer depuis plusieurs milliers, voire dizaines de milliers d'années, sans attendre d'optimum local, mais cette question ne peut que rester sans réponse à cause de notre ignorance de la topologie de l'espace des états possibles.

Cette hypothèse nous paraît cependant difficile à accepter si l'on repense aux conditions du modèle d'émergence par polygenèse structurelle des stratégies linguistiques que nous avons développé au chapitre 4. En effet, selon ce modèle, les langues auraient dû se diversifier et se complexifier en adoptant d'emblée des structures et des items en bonne adéquation avec les contraintes naturelles. Dès lors, il est difficile d'expliquer comment nous aurions pu passer d'un stade initial en bonne adéquation avec les contraintes à un stade très déséquilibré dont nous nous écarterions progressivement aujourd'hui.

La seconde appréciation que nous pouvons donner du résultat précédent est qu'il reflète le paradoxe Saussurien que nous avons évoqué au chapitre 2. En effet, le poids des contraintes internes est ici si fort sur les structures linguistiques qu'il est impossible de s'éloigner d'un attracteur sans déséquilibrer trop fortement le système. Comme nous l'avons déjà dit, cette vision extrême de la structuration d'un système ne nous semble pas pertinente.

La seconde possibilité d'évolution d'un système, où la trajectoire évolutive ne parvient pas à quitter le bassin d'attraction d'un attracteur, correspondrait à une situation où l'on pourrait observer de la variabilité mais pas de diversité. Une fois encore, cette vision des choses, similaire aux réflexions de Saussure, ne semble pas plus en adéquation avec la réalité.

A l'inverse, la dernière situation, où une variance trop importante nie la topographie du paysage énergétique, conduit à une absence de toute stabilisation du système, et soulève la question de la dynamique des évolutions linguistiques réelles. Le problème est en effet ici de savoir si les évolutions des idiolectes ou des langues sont absolument libres, ce que suggère Mufwene (voir les derniers paragraphes du chapitre 2). Le constat d'évolution perpétuelle des langues semble bien nous mener en effet vers une suite de changements ininterrompue.

Cette vision des choses ne nous paraît pas correcte pour la raison suivante : si les langues évoluaient de façon totalement non contrainte, alors les typologistes ne devraient pas observer de schémas significatifs de fréquences de distributions des items de différents sous-systèmes linguistiques tels qu'ils existent dans les langues du monde, par exemple les systèmes phonologiques ou même les universaux implicationnels. L'existence de telles distributions ne nous semble pouvoir être expliquée que par l'existence de minima locaux du paysage énergétique.

Ceci nous mène à la dernière situation d'évolution, qui nous paraît la plus conforme à la réalité des changements linguistiques. Dans cette situation, le système passe des périodes de temps plus ou moins longues dans le voisinage d'un attracteur en fluctuant autour de lui, avant de franchir une barrière énergétique et de se rapprocher d'un autre attracteur.

Un attracteur sera d'autant plus stable que son bassin d'attraction sera pentu. Les fréquences des différents systèmes vocaliques peuvent ainsi s'expliquer par des attracteurs aux bassins d'attraction plus ou moins marqués [Vallée, 1994].

Une évolution d'un système selon cette dernière dynamique se réalise par **équilibres ponctuels**. De rapides périodes de transitions alternent avec de longues phases de relative stabilité

(avec des fluctuations autour d'un équilibre).

Ce schéma nous semble correspondre à la réalité des évolutions des langues. En effet, il nous semble que les sous-systèmes linguistiques restent stables pendant des périodes de temps assez prolongées, avant de voir des changements s'opérer en leur sein, et atteindre un nouvel état d'équilibre.

Si l'on considère l'exemple du *Great Vowel Shift* en Angleterre, cette étape montre une transition dans le système phonologique de la langue, tout comme par ailleurs le phénomène de nasalisation d'une partie des voyelles en français au cours du Moyen-Âge. Avant et après ces épisodes transitoires, les systèmes phonologiques des deux langues sont restés globalement les mêmes pendant une longue durée. Au niveau du lexique, des changements s'opéreront également pendant des phases de transition où par diffusion lexicale, les mots seront graduellement touchés par un changement phonétique. Les formes résultantes pourront alors rester stables pendant une longue période de temps. De la même façon enfin, des changements syntaxiques importants, comme l'importation de tons, le changement de l'ordre des mots etc., seront des événements rapides par rapport aux périodes de stabilité qui les encadreront.

Nous pouvons aussi souligner la congruence de ce scénario avec les propositions de Dixon sur l'évolution par équilibres ponctués des langues. Il est intéressant toutefois de noter ici que les arguments de ce dernier portent sur une échelle temporelle différente de celle que nous considérons dans notre modèle. Que ce soit lors des périodes de ponctuation ou de stabilité du modèle de Dixon, les évolutions linguistiques se font toujours, au niveau de la *micro-histoire*, par équilibres ponctués, mais peuvent apparaître graduelles à une échelle d'observation supérieure comme la *méso-histoire* (lors des périodes de stabilité dans le modèle de Dixon). En outre, les transitions abruptes que nous postulons pour notre modèle ne sont jamais qu'une suite d'évolutions continues et graduelles à une échelle de temps plus petite. Tout est affaire de compression du temps.

Il nous reste à résoudre l'apparent paradoxe d'un sentiment de perpétuelle évolution des systèmes linguistiques, alors que nos propositions vont plutôt dans le sens d'équilibres ponctués. Nous devrions donc logiquement observer dans ce dernier cas des périodes de stabilité sans aucun changement, séparées par des périodes beaucoup plus courtes de transformations structurelles.

Nous pensons que la résolution de ce paradoxe provient du grand nombre de sous-systèmes et de structures qui s'entrelacent dans la macro-structure qu'est le langage. L'impression de changement continu est causé selon nous par le fait que parmi le grand nombre d'items et de structures qui peuvent évoluer selon le processus précédent, il existe toujours un petit nombre d'entre eux qui varie à une date donnée, même si ces évolutions et transitions se produisent sous l'action de gâchettes sociales contingentes et externes au système (nous reprenons ici partiellement les propositions de Maturana). La relative indépendance des sous-systèmes linguistiques et des structures permet à des changements de se produire dans l'un d'entre eux sans modifier les items des autres. Le simple grand nombre de structures qui peuvent évoluer et qui évoluent effectuent aléatoirement conduit à une perpétuelle évolution du langage.

Systeme isolé ou système en contact

La réflexion précédente repose entièrement sur la possibilité de pouvoir isoler un système linguistique d'autres systèmes.

Cette possibilité est difficile à envisager dans la réalité, puisque les idiolectes et les langues sont tous plus ou moins fortement en interaction, du fait des contacts des individus qui les sous-tendent. Le seul système linguistique réellement isolé correspond au macro-système qui recouvre l'ensemble des idiolectes de *tous* les individus. Cependant, les divergences importantes

des langues du monde entre elles font que leur barycentre, c'est à dire le macro-système précédent, ne possède pas une grande pertinence vis à vis de la réalité linguistique.

Néanmoins, nous pensons que le scénario d'évolution par équilibres ponctués proposé dans les paragraphes précédents n'est pas remis en cause par la présence de contraintes sociales. En effet, comme nous l'avons vu, il semble que les processus d'évolutions induits par les contraintes internes et ceux engendrés par les contraintes sociales sont opérationnellement distincts, au sens où nous avons défini cette expression plus haut. Dès lors, le scénario d'évolution par équilibres ponctués, qui résulte de l'existence de contraintes internes au système, n'est pas modifié qualitativement (mais seulement quantitativement) par la présence de contraintes externes. Vu sous un autre angle, ce ne sont pas ces dernières qui sont responsables de la dynamique d'évolution par équilibres ponctués. Ceci est confirmé expérimentalement par l'absence d'équilibres ponctués dans la deuxième série d'expériences, et par leur présence dans les première et troisième séries.

Probabilité d'émergence et de stabilité de Greenberg

Comme nous l'avons souligné plus haut, notre modèle ne prend pas en compte explicitement la facilité d'émergence et la stabilité des items linguistiques comme l'a fait Greenberg lors de ses études typologiques. Toutefois, il est possible de déterminer assez simplement les configurations topographiques du paysage énergétique qui correspondent aux quatre cas cités par Greenberg [Greenberg, 1978] (p. 76) (voir chapitre 2).

Un élément très stable correspond à un puits assez profond et aux parois assez verticales, ce qui rend une sortie de ce puits difficile et donc rare. Au contraire, une forme instable correspondra à un puits de faible profondeur et aux pentes douces. En ce qui concerne la probabilité d'émergence, une forme qui émergera facilement dans les idiolectes des locuteurs (et donc dans une langue) correspondra à un puits facile d'accès, quand une forme apparaissant rarement correspondra elle à un puits difficile d'accès. La figure 6.46 présente des exemples simples de ces différentes situations.

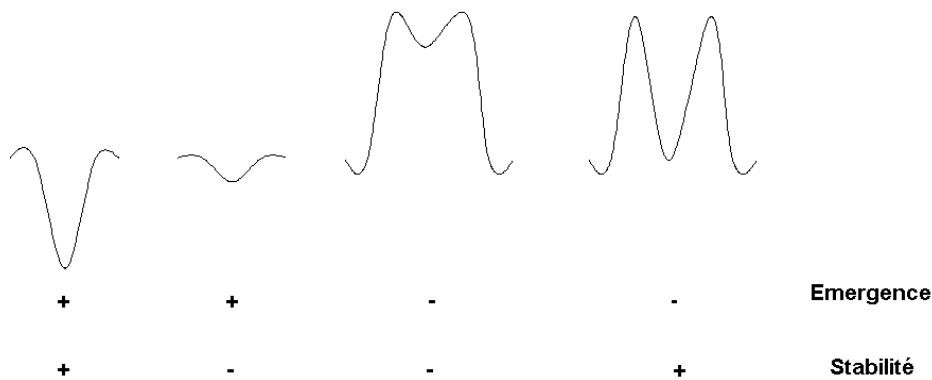


FIG. 6.46 – Différentes topologies de l'espace énergétique aptes à rendre compte des quatre schémas de stabilité et d'émergence de Greenberg [Greenberg, 1987] (p. 76)

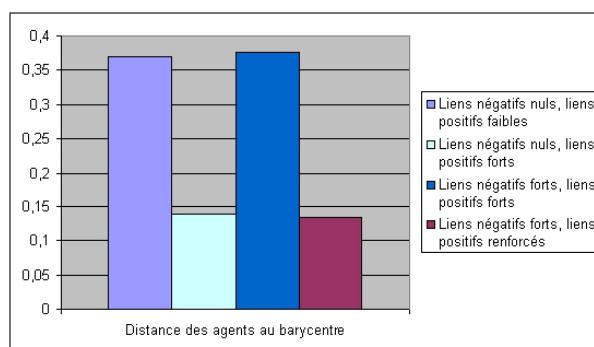


FIG. 6.47 – Distance moyenne au barycentre au cours des 4 phases du scénario d'évolution des structures sociétales

Retour sur quelques considérations à propos de la préhistoire des langues

Pour finir ce chapitre, nous souhaitons présenter une expérience rudimentaire résumant les précédentes et permettant de revenir sur notre scénario global d'évolution des langues au cours de la préhistoire. Cette expérience se base sur un paysage énergétique plat, mais nous avons plus haut que ceci conduit aux mêmes résultats qu'un paysage au relief marqué. La distance des agents au barycentre constitue en particulier un indicateur valide de la diversité linguistique du macro-système.

Dans cette expérience, 10 systèmes linguistiques sont reliés par un réseau de liens plus ou moins dense en terme de connexions positives ou négatives. Plus concrètement, un paramètre de densité des connexions positives correspond au nombre de liens de valeur 0.05 qui sont créés aléatoirement pour relier un agent aux autres membres de la communauté. Ces liens peuvent s'ajouter les uns aux autres, et donc plus la densité importante, et plus l'agent est relié fortement par des liens attractifs aux autres agents. Un paramètre de densité des connexions négatives permet de manière similaire de créer aléatoirement un certain nombre de connexions négatives.

Nous envisageons successivement quatre situations : dans la première, la densité de liens négatifs est nulle, et celle de liens positifs très faible (5). Dans le second cas, la densité de liens négatifs est toujours nulle, mais celle de liens positifs est plus importante (625). Dans la troisième situation, la densité de liens négatifs croît jusqu'à égaler la densité de liens positifs (625). Enfin, une dernière étape consiste à augmenter une dernière fois le nombre la densité de liens positifs (3125), en gardant la seconde densité inchangée.

Les figures 6.47, 6.48, 6.49 représentent comme à l'habitude la distance des agents au barycentre, l'évolution de la distance moyenne parcourue par les agents et celle du barycentre du système.

Nous envisageons les systèmes linguistiques manipulés dans la simulation comme les systèmes communaux des différents groupes humains en interaction au cours de la préhistoire. Nous observons que nos prédictions du chapitre 4 quant aux évolutions de la diversité linguistique des groupes humains au cours de la préhistoire sont bien vérifiées par la simulation : une réduction de la diversité linguistique s'opère avec le premier accroissement des liens positifs, mais cette réduction disparaît lors de l'augmentation de la densité de liens négatifs liée à l'accroissement des densités de population à la fin du Paléolithique Supérieur et au Néolithique. Enfin, la der-

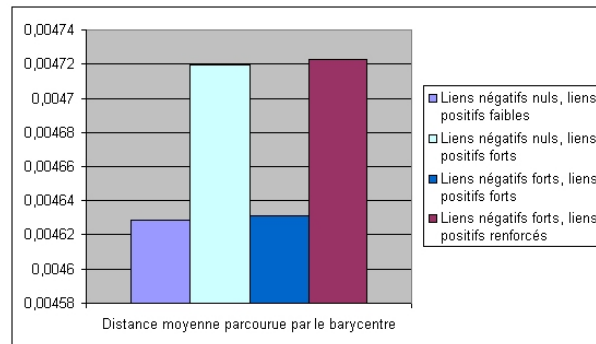


FIG. 6.48 – Distance moyenne parcourue par les agents au cours des 4 phases du scénario d'évolution des structures sociétales

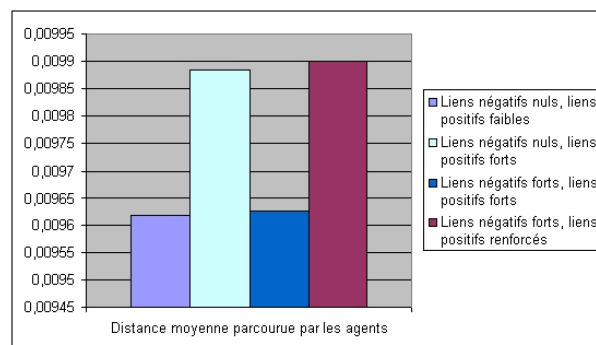


FIG. 6.49 – Distance moyenne parcourue par le barycentre du macro-système au cours des 4 phases du scénario d'évolution des structures sociétales

nière étape montre comment une nouvelle augmentation de la densité de liens positifs entraîne une nouvelle diminution de la diversité linguistique, ce qui semble correspondre à la situation contemporaine où de nombreuses langues disparaissent.

L'intérêt de notre modèle est qu'il nous renseigne également sur les modifications du rythme d'évolution des agents et du macro-système dans son ensemble.

Nous constatons une évolution de ces rythmes d'évolution à l'inverse de celle de la diversité linguistique, mais de façon très peu marquée. Lors de la première phase de notre scénario, une forte diversité correspond à un faible rythme d'évolution des agents et du macro-système. La décroissance de la diversité au cours de la seconde étape s'accompagne d'un très léger accroissement des rythmes d'évolution, qui diminuent à nouveau légèrement lors de la transition Néolithique, pour croître une dernière fois de quelques pourcents lors de la quatrième phase du scénario. Ces faibles variations sont en accord avec les résultats établis plus haut dans la troisième série d'expérience, et semblent indiquer que la vitesse d'évolution des langues au cours de la préhistoire n'a été que peu marqué par les variations des liens sociaux, que ces langues aient été plus ou moins voisines typologiquement (diversité plus ou moins importante). Néanmoins, il convient de demeurer prudent sur ce résultat, qui pourrait être un biais du modèle lié au calcul de la déviation sociale optimale. Des expériences jouant sur le procédé même de calcul des interactions sociales sont nécessaires avant de juger si la grande stabilité des vitesses d'évolution en fonction de la force des liens est un artéfact ou une réalité.

Notons ici que ces évolutions ne prennent pas en compte les pressions d'exploration de l'espace des possibles qui ont pu exister après une modification de celui-ci suite à l'apparition de nouvelles capacités cognitives et/ou physiologiques. Il faut donc voir les courbes précédentes plutôt comme des modulations *sociales* à apporter à la dynamique générale *interne* d'exploration de l'espace des possibles.

Les résultats de cette expérience sont bien sûr très grossiers, et ne prennent pas en compte de façon fine plusieurs phénomènes qui s'entrecroisent lors de l'évolution des structures sociales, à savoir l'accroissement de la taille des groupes humains, la possible modification des structures sociales en leur sein, lors du Néolithique par exemple, ou encore l'étalement géographique des liens. Ces phénomènes, qui prennent place selon nous surtout lors de la fin du Paléolithique Supérieur et du Néolithique, viennent moduler les résultats précédents et rendent la situation plus délicate à concevoir.

6.3 Conclusions

Nous nous sommes efforcés dans ce chapitre de présenter et d'étudier un modèle général des évolutions et des changements linguistiques. Ce modèle se démarque en particulier des modèles plus traditionnels par la prise en compte spécifique et l'étude de l'impact des liens sociaux entre les locuteurs ou les communautés linguistiques.

Différentes expériences nous ont permis de mieux estimer l'impact des contraintes internes et externes sur les dynamiques d'évolution d'un système linguistique. En particulier, nous avançons l'hypothèse d'une évolution des systèmes linguistiques selon une dynamique par **équilibres ponctués**. En mettant en évidence une **disjonction opérationnelle** des influences des contraintes internes et externes du système, nous émettons l'idée que cette dynamique d'évolution ne dépend que des contraintes internes au système.

Plus généralement, les résultats des expériences laissent entrevoir la sensibilité de la diversité et de la vitesse d'évolution des systèmes linguistiques aux structures sociales. Ceci semble

rejoindre les critiques envers la glottochronologie, qui postule pour toutes les langues un taux de changement constant pour les mots du vocabulaire de base. Néanmoins, il reste à déterminer si l'inertie de ce vocabulaire peut-être telle que les différences sociolinguistiques n'aient pas d'emprise sur lui.

Nous avons enfin proposé une validation informatique (bien que rudimentaire) des hypothèses avancées au chapitre 4 sur l'évolution de la diversité linguistique au cours de la préhistoire.

Nous espérons par ce dernier chapitre compléter les deux précédents, et parvenir à clore une approche la plus riche possible de l'émergence et de l'évolution des systèmes linguistiques au cours du passé. Il va néanmoins de soi que de nombreux développements sont à apporter au modèle : tests de structures sociales plus riches ou de paysages énergétiques plus complexes, recherche d'une meilleure définition mathématique des contraintes sociales. . .

Chapitre 7

Conclusions et perspectives

*Quand au fond, je n'ai pas voulu faire semblant d'inventer
ce que la tradition m'offrait, quand je ne faisais que le reprendre.
Non que je n'aie rien mis de mien, dans cet ouvrage, au contraire!
Mais on ne possède jamais que ce qu'on a reçu et transforme, que ce
qu'on est devenu, grâce à d'autres ou contre eux.*

André Comte-Sponville, *Petit traité des grandes vertus* [Comte-Sponville, 1995] (p.11)

7.1 Résumé et synthèse

Le but principal de cette thèse était de poser les premières briques d'un scénario général de l'émergence et de l'évolution préhistorique des langues. L'idée n'était pas de remettre en question les principales théories à ce sujet, mais plutôt de les préciser et de souligner certains points importants susceptibles d'avoir joué un rôle significatif dans la construction des langues telles que nous les observons aujourd'hui. Pour ce faire, plusieurs principes ont guidé nos études :

- les aspects systémiques du langage, comme mis en évidence par Saussure il y a plus d'un siècle, ont joué un rôle important et peu étudié dans l'émergence, la complexification et plus généralement l'évolution des langues au cours de la préhistoire ;
- les modèles et les simulations informatiques sont des outils de choix pour l'étude de phénomènes linguistiques du passé, en particulier à cause de l'absence de "fossiles linguistiques" ;
- une approche pluridisciplinaire, reposant non seulement sur la (socio-)linguistique et l'informatique, mais aussi sur l'archéologie, les théories de l'évolution, la paléo-anthropologie (cognitive). . . est le plus sûr moyen de découvrir et d'asseoir les mécanismes de l'émergence et de l'évolution ancienne des langues. Cette approche est même souvent une nécessité pour pallier à la pauvreté des données linguistiques à ce sujet.

Au cours de notre travail, guidés par les principes précédents, nous nous sommes attachés à l'étude des conditions d'émergence des langues à la fois les plus anciennes et les plus contemporaines, ainsi qu'à l'évolution de celles-ci en fonction des structures sociales et démographiques de nos ancêtres. Nous nous sommes centrés en particulier :

- sur la création d'une plate-forme de modélisation puissante et modulaire, au développement incrémental ;
- sur un ensemble de notions systémiques liées au langage : jeu de contraintes, mécanismes de changement, frontières du système. . . ;
- sur la question de la monogenèse ou de la polygenèse des langues, en lien avec l'évolution de notre espèce au sens large : évolution des capacités cognitives ou physiologiques, évolution de la taille de la population et distribution de celle-ci sur le globe, structure sociétale ;
- sur les traversées maritimes vers l'Australie comme moyen de mettre au jour des indices de l'origine des langues modernes ;
- sur la question générale des changements linguistiques : quelle est leur dynamique ? Quels sont les impacts des contraintes sociolinguistiques et internes sur les changements d'un système linguistique ?

Parallèlement à une réflexion plus théorique, des modélisations ont été mises en oeuvre, afin de pouvoir tester certaines hypothèses dans le cadre des contextes et des problématiques précédents. Les principaux résultats ou propositions que nous avons dégagés de ces recherches peuvent être résumés brièvement par les quelques points suivants :

- les langues sont indissociables de l'activité linguistique. Parallèlement à la transmission d'information, l'utilisation sociale du langage et la variabilité qui en découle est une constante au cours de l'histoire des hommes ;

- le développement cognitif et les modifications physiologiques de nos ancêtres ont entraîné un développement de l'espace des possibles linguistiques au cours de la préhistoire lors des événements de spéciation le long de notre lignée. Des structures de plus en plus complexes sont venues enrichir progressivement l'espace des états linguistiques possibles, qui a vu sa diversité s'accroître au cours du temps jusqu'à l'émergence de notre espèce ;
- les items et les structures de l'espace des états possibles sont progressivement apparus dans les langues de nos ancêtres. Il existe une décorrélation entre l'apparition de nouvelles stratégies linguistiques **possibles**, et leur apparition **effective** dans les systèmes linguistiques **réels**. Ces émergences se sont produites selon les cas par monogénèse ou polygénèse, suivant les époques, les structures sociétales de la macro-population préhistorique et des événements contingents. Des contraintes structurelles liées à la composition des langues qui pouvaient accueillir les nouvelles stratégies linguistiques pesaient sur les probabilités d'émergence ;
- grâce aux phénomènes précédents, les états de l'espace des possibles se sont progressivement réfléchis dans l'espace des états réels ; cette réflexion a néanmoins été modulée par les évolutions des structures de la macro-population humaine au cours de la préhistoire ;
- l'étude des traversées maritimes vers l'Australie permet de mettre au jour le développement d'une capacité de **liage représentationnel spatio-temporel** chez les membres de notre espèce, qui sous-tend nombre des révolutions culturelles et techniques observées chez cette dernière ; cette capacité cognitive s'est projetée au niveau linguistique, et les nombreuses stratégies linguistiques apparues en conséquence forment partiellement les caractéristiques des langues modernes par rapport aux langues ancestrales ;
- les traversées maritimes vers l'Australie peuvent être replacées dans le contexte général de l'hypothèse *Out of Africa* et des migrations côtières hors d'Afrique. L'étude des îles Andaman laisse à penser que leurs populations de chasseurs-collecteurs trouvent leurs origines génétiques et linguistiques dans la première migration qui a conduit à la conquête de l'Australie et de la Nouvelle-Guinée ;
- l'impact des contraintes sociales et internes qui pèsent sur un système linguistique peut être évalué assez finement grâce à un modèle et des simulations informatiques qui permettent l'étude des différents paramètres en jeu, en particulier au niveau de la structure des interactions sociales. Il apparaît en particulier que les contraintes internes et sociales peuvent exercer leur influence sur le système de façon **opérationnellement disjointe** ;
- un scénario en quatre phases peut être proposé pour rendre compte de l'évolution de la diversité linguistique au cours de la préhistoire jusqu'aux périodes actuelles.

7.2 Perspectives

7.2.1 Perspectives directes

Développement et ancrage linguistique de l'approche systémique

*Grise, chère amie, est toute théorie,
Et vert l'arbre d'or de la vie.
Méphistophélès, Faust de Goethe*

Il est évident que les propositions formulées au cours de cette thèse manquent de substance, et en particulier de substance linguistique : les caractéristiques typologiques sont abordées de façon extrêmement générale, et peu d'exemples concrets sont utilisés pour ancrer les phénomènes décrits.

Un des développements postérieurs à cette thèse est donc naturellement de renforcer le lien entre propositions théoriques sur les évolutions de la dimension structurelle d'un système linguistique et observations typologiques dans les langues du monde. Notre objectif est de faire coïncider certaines des dynamiques d'évolution que nous avons introduites de façon théorique, comme l'évolution par équilibres ponctués, avec des changements réels des langues du monde. Une telle démarche a été entreprise par certains auteurs, qui proposent par exemple des modèles à base d'attracteurs pour rendre compte d'évolutions syntaxiques réelles [Cooper, 1999].

Utilisation de bases de données phonologiques

Afin de pouvoir mettre à profit des situations linguistiques réelles pour ancrer nos propositions théoriques, nous pouvons envisager deux approches assez différentes. L'une consiste à se focaliser sur des cas d'étude très précis et à tester les théories sur ces quelques manifestations de la réalité linguistique. Une seconde possibilité est le recours à des bases de données typologiques, qui ont l'avantage d'offrir une vue d'ensemble des caractéristiques d'un sous-domaine linguistique.

Les bases de données informatiques les plus utiles pour nos objectifs à l'heure actuelle sont probablement les bases de données phonologiques. Nous disposons ainsi des bases de données UPSID et BDProto, qui contiennent respectivement 451 langues et 101 proto-langues reconstruites. Des collaborations avec d'autres membres du laboratoire *Dynamique du Langage* nous ont déjà permis de mieux apprécier les possibilités d'extraire de l'information de ces corpus de données [Marsico et al., 2002]. Nous disposons également d'une troisième base de systèmes phonologiques, créée par Merritt Ruhlen, et riche d'environ 3000 langues, ce qui constitue un échantillon très important des quelques 6000 langues du monde.

La données des systèmes phonologiques des langues permet de dresser un tableau des fréquences de différents systèmes phonologiques, de différents segments ou encore de différents traits. Il est également possible de travailler sur les co-occurrences de deux ou plusieurs éléments pour tenter de détecter d'éventuelles tendances implicationnelles.

La question pertinente qu'il est nécessaire de se poser avant de pouvoir exploiter ces données est celle de la possibilité de dégager de l'information diachronique à partir de structures synchroniques. Nous pensons que le modèle que nous avons développé au chapitre 6 est apte à tirer parti des informations synchroniques des bases de données précédentes pour évaluer et reproduire au moins approximativement des dynamiques d'évolution des systèmes phonologiques. L'idée est que le nombre de langues (et le choix qui a été fait pour la sélection de ces langues) permet d'estimer de façon correcte les contraintes internes (naturelles et distribuées). Sur la base de ce postulat, il est possible de dégager de la base les fréquences de chaque phonème en fonction des présences des autres segments dans les systèmes.

En se référant à l'annexe qui précise le calcul de la fonction d'énergie du modèle à partir des données précédentes, il est possible dès lors d'étudier les évolutions de systèmes phonologiques de la même façon que nous avons étudié des items abstraits au chapitre 6. Il sera intéressant alors de comparer les résultats des simulations avec des changements phonético-phonologiques attestés dans les langues du monde. Notons ici que s'il ne sera jamais possible de prédire une

évolution particulière, du fait des phénomènes stochastiques en jeu, il sera possible néanmoins de déterminer des spectres d'évolutions possibles à partir d'une configuration de segments initiale.

Notons pour conclure l'existence d'une autre base de données non-informatisée et de plus faible taille que nous pourrions mettre à profit. Il s'agit de la base présentée et analysée par Johanna Nichols dans son livre "*Linguistic Diversity in Space and Time*" [Nichols, 1992], qui a l'avantage de renseigner le lecteur sur les schémas de distribution spatiale d'un certain nombre de caractéristiques typologiques "classiques". Il est concevable d'appliquer le même raisonnement pour ces données typologiques plus générales que celui développé plus haut pour les segments des langues du monde. Il sera alors possible d'étudier en particulier l'apparition au cours des simulations de tendances évolutives, comme par exemple des tendances implicationnelles.

Application de la théorie des réseaux au modèle d'évolution des systèmes linguistiques

Si nous avons introduit dans nos travaux un modèle de réseau social pour abstraire les relations entre les membres d'une communauté, nous ne nous sommes appuyés, ni n'avons fait mention, des travaux plus généraux portant sur les réseaux.

Ceux-ci sont nombreux et variés, et se penchent sur des problèmes très divers, allant du routage d'information sur Internet ou des indexations croisées des pages Web (les hyper-liens) aux réseaux métaboliques connectés par des interactions chimiques, ou encore au réseau des publications scientifiques [Wang, 2002b] (p. 885). Les réseaux sont souvent étudiés et classifiés selon certaines variables calculées à partir de leur topologie : coefficient de "clusterisation" ("*cluster coefficient*"), longueur du chemin moyen ("*average path length*"), distribution de degré ("*degree distribution*") [ibid] (p. 887-889). Selon les valeurs de ces indicateurs, les réseaux possèdent différentes propriétés : robustesse ou fragilité plus ou moins importante, dynamiques particulières, synchronisation aisée ou impossible. . .

Une des voies de recherche est naturellement la découverte de réseaux offrant des propriétés intéressantes pour différents types d'applications. Différents schémas de connectivité particuliers ont été plus particulièrement étudiés : graphes aléatoires ("*random graphs*"), réseaux "*small-world*", réseaux "*scale-free*" ou réseaux évolutifs [ibid]. Certains de ces réseaux ont déjà été appliqués à des phénomènes linguistiques, en particulier pour décrire la structure formée des mots du lexique [Dorogovtsev and Mendes, 2001] [Cancho and Solé, 2001] [Sigman and Cecchi, 2002].

Il paraît profitable de profiter des acquis théoriques généraux sur les réseaux pour raffiner et approfondir notre étude de l'évolution des systèmes linguistiques. En effet, des phénomènes comme l'implémentation d'un changement dans une population peuvent être mis en relation avec les variables citées précédemment. La capacité d'un réseau à se synchroniser est ici particulièrement intéressante, puisqu'elle peut être rapprochée de la possibilité pour un changement de s'étendre à toute une communauté. Nous souhaitons nous appuyer sur les travaux de socio-linguistique pour déterminer quelle architecture de réseau est la plus proche des réseaux réels de locuteurs (existence d'individus centraux ou meneurs lors des phénomènes de changement, influence des individus marginaux. . .). A partir de notre mécanisme de convergence ou de divergence linguistique, nous pourrions alors évaluer les propriétés du réseau, et en particulier les régimes dynamiques et de synchronisation. Nous espérons que ceci pourra éclairer la question de la propagation d'un changement.

Il est à noter ici que dans les approches précédentes, tout comme dans des approches mathématiques formelles visant à établir la convergence d'une population d'individus vers une conven-

tion lexicale [Cucker et al., à paraître], les réseaux considérés sont toujours constitués d'arêtes de valeurs positives ou nulle. Nous avons cependant insisté sur le fait que les réseaux sociolinguistiques comprenaient selon nous des liens positifs et négatifs. Ceci représente une difficulté supplémentaire qu'il est intéressant d'investiguer.

Prise en compte des phénomènes d'acquisition dans le modèle d'évolution des systèmes linguistiques

Nous avons déjà proposé au chapitre 6 de nombreuses directions pour poursuivre l'étude du modèle préliminaire auquel nous avons eu recours pour étudier l'impact des contraintes sociales et internes.

Un élément que nous n'avons pas du tout abordé est celui de la prise en compte de l'acquisition. Il n'existe en effet pas de renouvellement des agents dans notre modèle, ni de phase d'apprentissage pour ceux-ci. Notre hypothèse implicite a été en fait qu'il est possible d'inclure l'acquisition dans les mécanismes d'évolution généraux auxquels nous avons eu recours.

Un raffinement important du modèle serait donc la prise en compte d'agents de durée de vie limitée, et un renouvellement de la population en accord avec l'organisation sociale de celle-ci.

Une idée simple est de reproduire ici les concepts du modèle de Nettle que nous avons souvent cités dans notre travail. Une division de la population en un certain nombre de classes d'âge, et la possibilité pour les plus jeunes d'acquérir un système linguistique en échantillonnant les agents autour d'eux (de façon modulée par les contraintes sociales) nous permettraient de mesurer l'impact de l'acquisition au niveau des différents concepts sur lesquels nous nous sommes appuyés lors de nos expériences : rythme d'évolution des agents ou du barycentre de ceux-ci, distance des premiers au dernier, entropie. . .

Parallèlement aux règles précédentes, la gestion de l'organisation sociale d'une communauté (persistance ou transformations) peut être basée sur des topologies particulières de réseaux, et des règles de connexions des nœuds empruntées par exemple au réseaux évolutifs mentionnés plus haut.

Corrélation entre schémas de diversité culturelle et schémas de diversité linguistique

Une idée que nous avons mentionnée à plusieurs reprises au cours de notre travail est la possibilité d'étudier les schémas de diversité de composantes extra-linguistique pour déterminer partiellement les réseaux sociaux entre groupes humains préhistoriques, et envisager ensuite les conséquences de leur organisation sur les évolutions linguistiques. Nous pensons ici en particulier au travail de Georges Sauvet et de ses collaborateurs sur la structuration des motifs des peintures pariétales en France et en Espagne au cours du Paléolithique Supérieur [Sauvet and Wlodarczyk, 1995].

Afin de développer notre compréhension et notre connaissance des liens sociaux qui unissaient les populations du passé, il paraît utile d'essayer de comparer les schémas de différentes activités culturelles. Il peut s'agir pour les périodes du Paléolithique de l'art pariétal, mais également des techniques de sculpture, des industries lithiques ou des objets de parure. Nous nous posons la question de savoir si des analyses assez fines peuvent être effectuées sur ces catégories d'artéfacts voisines, et si elles font ressortir des hétérogénéités qui reflètent une structuration sociale particulière de la macro-population.

Parallèlement à cette première approche, il paraît complémentaire d'étudier le lien qu'entretiennent les modes linguistiques avec les modes vestimentaires, de comportement etc., dans nos sociétés contemporaines. Certains chercheurs comme Labov abordent ce problème en cherchant à détecter des similitudes entre les acteurs impliqués dans les phénomènes précédents (en particulier par exemple les meneurs ("*leaders*") des changements)[Labov, 2001] (p. 361-363). Les questions peuvent être alors : peut-on détecter aujourd'hui des congruences nettes entre les différentes manifestations culturelles précédentes ? Existe-t-il des réseaux sociaux uniques permettant de rendre compte de façon unifiée de ces manifestations ?

En cas d'une réponse négative, l'étude des réseaux sociaux au cours de la préhistoire semble gravement handicapée. Il faut toutefois alors se demander si lors d'époques reculées, la structuration très particulière de la société n'induisait pas une convergence des attractions et des répulsions pour différentes manifestations culturelles au sein d'une macro-population. Il nous semble que cette question pourrait être partiellement investiguée à l'aide de modèles informatiques, qui permettraient de mieux mesurer les degrés de liberté accordés aux différents schémas de diversité culturelle au sein de différentes organisations sociétales.

7.2.2 Perspectives à plus long terme

Utilisation de l'outil informatique pour l'étude de l'évolution des langues

Si l'outil informatique est de plus en plus mis à profit pour étudier les conditions d'émergence de la fonction de langage, il reste encore utilisé de façon limitée pour l'étude des langues et de la variabilité linguistique. Comme nous l'avons déjà souligné à plusieurs reprises, les modélisateurs se penchent aujourd'hui plus sur les conditions d'émergence que sur les conditions d'évolution du langage, et il semble que beaucoup peut être fait pour mieux comprendre ces dernières.

Il ne s'agit pas ici de sous-estimer l'importante place qu'a prise l'informatique dans la linguistique. La linguistique computationnelle est ainsi un vaste champ d'étude, allant de la traduction automatique ou de la reconnaissance de parole à la construction et l'analyse de corpus (voir par exemple [Tsou et al., 1997]). Néanmoins, il nous semble qu'un créneau demeure relativement exploré entre les domaines précédents.

Nous pensons qu'il est ainsi intéressant de se pencher sur le champ de la linguistique historique, et de se poser la question de comment il est possible d'enrichir ce secteur grâce aux apports des machines. Nous pouvons rappeler ici qu'une des grandes découvertes dans cette discipline, à savoir la diffusion lexicale, s'est appuyée sur des bases de données informatiques, et ceci il y a plus de 30 ans [Wang and Chen, 1975].

Alors que de nombreux linguistes analysent et tentent de reconstruire des proto-langues à partir de langues actuelles, peu d'outils informatiques viennent aider les chercheurs dans ce travail minutieux ; on peut citer le moteur de reconstruction de Lowe et Mazaudon, mais il semble que cette tentative soit l'une des seules à avoir été proposées au cours des dernières années [Lowe and Mazaudon, 1994].

Nous sommes intéressés par la possibilité de produire des outils capables d'aider le linguiste dans sa tâche. Tout en étant conscient que le travail de reconstruction appelle un savoir qu'il est extrêmement difficile d'inculquer à une machine, nous pensons que des outils développés pour être des aides ou des assistants de travail pourraient rendre des services appréciables. A cette fin, il nous paraît judicieux non pas de bâtir des logiciels travaillant sur les données linguistiques comme sur tout autre type de données, mais d'insuffler au contraire un savoir linguistique, même

rudimentaire, dans des programmes d'analyse des correspondances lexicales. Ainsi, l'utilisation de décompositions en traits des segments, d'algorithmes de comparaison de formes phonétiques décrites à l'aide d'un alphabet phonétique... pourraient conduire à proposer au linguiste de possibles proximités entre les mots de listes de vocabulaire, et ainsi raccourcir son travail de recherche de correspondances, ou lui suggérer des éléments qu'il risquerait d'oublier. Afin de définir au mieux les caractéristiques qu'un tel produit devrait posséder, notre objectif est de nous appuyer sur une certaine analyse de l'activité d'un chercheur lors du reconstruction de reconstruction.

L'utilisation d'algorithmes issus de la cladistique pour la reconstruction des filiations à partir des pourcentages de cognats ou même de données vocaliques [Ben Hamed et al., 2002] est un autre sous-domaine où l'ordinateur peut se révéler très utile pour le test des innombrables arbres possibles de filiation. Des algorithmes ont également été élaborés pour tenter de détecter les emprunts non détectés par le linguiste au niveau des listes de cognats [Minett and Wang, 2002]. Cependant, ces approches de type algorithmique ne mettent pas réellement à profit la connaissance linguistique, mais raisonnent de façon abstraite sur des données vidées partiellement et temporairement de leur sens.

Autre exemple concret, nous pensons que le calcul de distances sémantiques ou phonétiques entre deux mots gagnerait à être investigué et surtout formalisé au moins partiellement. En effet, la linguistique historique se base pour ses reconstructions sur des proximités sémantiques et phonétiques plus ou moins forte (confère les critiques vis à vis des comparaisons multi-latérales). De telles distances peuvent être envisagées (i) au niveau phonétique, à partir des différences entre les segments, des possibles insertions ou délétions de segments dans les mots... (ii) au niveau sémantique, à l'aide par exemple de l'analyse des fréquences de co-occurrence de mots dans des gros corpus... En ce qui concerne le second point, nous pensons que d'autres travaux menés sur les relations de synonymie entre les mots d'une langue (voir par exemple [Victorri et al., à paraître] ou [Ploux and Victorri, 1998]) pourraient être incorporés dans des études sur l'évolution linguistique : de premières études sont ainsi menées pour comparer les cartes sémantiques de langues différentes [Ploux and Ji, à paraître], et il apparaît possible d'étendre les concepts en jeu à la comparaison de différentes périodes historiques d'une même langue (par exemple les dialectes chinois pour lesquels des dictionnaires assez anciens sont disponibles).

Différents modèles basés sur les idées précédentes nous paraissent judicieux pour l'évaluation des différentes méthodes de reconstruction, et pourraient donc être fort utiles dans le débat qui oppose les partisans d'une limite des reconstructions vers 8,000 BP, et ceux qui dépassent allègrement cette valeur seuil.

De l'objet au méta-objet ou comment apprendre des régularités fonctionnelles

Si nous nous sommes intéressés au mode d'émergence des stratégies linguistiques, nous n'avons pas du tout mentionné la façon dont ces stratégies pouvaient être manipulées ou transmises d'une génération à une autre. Le problème se trouve surtout au niveau des items et des stratégies syntaxiques.

Au niveau de l'émergence du langage, l'émergence de la syntaxe, à cause de la complexité de cette dernière, est sans aucun doute le secteur qui offre et offrira le plus de résistance aux efforts des modélisateurs (confère les travaux récents évoqués chapitre 3). Il est difficile d'éviter

le problème de la circularité des modèles (on observe en sortie ce que l'on a placé en entrée), et une véritable émergence de structures syntaxiques est un phénomène très difficile à mettre en place.

Les études portant sur le lexique (par exemple émergence de la convention dans une population d'agents) manient des objets mathématiques simples, qui peuvent entrer en compétition, ou être soumis à certaines contraintes, mais n'exerçant pas d'action sur les autres items autrement que par le biais de certaines dynamiques de compétition homogènes. . . . En tentant un parallèle avec les fonctions et les objets mathématiques constants, de tels objets peuvent être dits d'ordre 0 (ce sont en un sens des fonctions qui ne prennent aucune valeur d'entrée, autrement dit des fonctions constantes). En comparaison, les structures syntaxiques manipulent des items linguistiques en les composant. Elles peuvent être d'ordre 1 ou plus, et selon le cas, peuvent manipuler des objets d'ordre 0, voire des objets d'ordre supérieur. Elles jouent vis à vis des items d'ordre inférieur au leur le même rôle qu'une fonction mathématique (par exemple une fonction cosinus ou exponentielle) peut avoir sur un nombre réel ou entier.

L'apprentissage ou la création de structures syntaxiques par un système ou un mécanisme "pseudo-cognitif" est rendu très complexe par cette distinction d'ordre. Là où il est facile de créer ou d'apprendre des mots ou des sons, il est bien plus difficile de manipuler des structures fonctionnelles. Là où l'apprentissage des mots ou des sons repose sur la détection (la découverte) de régularités simples, l'apprentissage des structures syntaxiques repose lui sur la découverte de **régularités fonctionnelles**.

La détection de régularités fonctionnelles, ou dit autrement l'apprentissage de fonctions est un exercice très difficile. Cette question constitue une partie importante des théories de l'apprentissage. Une méthode connue repose sur l'utilisation de réseaux de neurones comme les perceptrons multi-couches, qui tentent d'approcher la fonction par le biais de données bruitées produites par celle-ci. Le problème n'est pas différent pour l'acquisition des structures linguistiques, mais les fonctions opèrent sur des unités discrètes, et leur conception de haut niveau les rend difficiles à capturer par un réseau de neurones. C'est bien sûr ce problème qui est au cœur de l'argument de la pauvreté du stimulus de Chomsky.

La théorie des principes et des paramètres, afin de détecter les régularités fonctionnelles linguistiques, recourt à un ensemble de principes fonctionnels qui font l'inventaire des fonctions qui peuvent être utilisées dans la langue. Comme pour de nombreux problèmes algorithmiques dont la vérification de la correction d'une solution est bien plus aisée que sa découverte, le problème de l'apprentissage de la syntaxe est rendu plus aisé par l'utilisation des principes et des paramètres (pour une introduction à ces problèmes, voir [Cormen et al., 1994], chapitre 36 sur la NP-complétude).

La question est donc posée s'il est possible de construire des mécanismes d'apprentissage généraux qui puissent détecter très efficacement les structures syntaxiques. Une méthode qui s'apparente superficiellement à l'existence de "principes" est la possibilité d'envisager la recherche des fonctions syntaxiques dans un espace de fonctions particulier. A la différence de la théorie des principes et des paramètres qui postule un caractère inné de ces éléments, la structure et les contraintes de l'espace fonctionnel de recherche pourraient être ancrées dans des capacités cognitives plus générales, en particulier au niveau sémantique [Schoenemann, 1999].

Un outil mathématique est particulièrement bien adapté au traitement des fonctions : il s'agit du lambda-calcul. Il s'inscrit avant tout dans une théorie générale des fonctions, et a été

développé dans les années 1940. Le grand avantage de ce paradigme est que les fonctions y sont “des objets comme les autres”, ce qui signifie qu’il n’existe pas de différenciation conceptuelle entre des objets d’ordres différents. Nous sommes particulièrement intéressés par la possibilité de définir des systèmes d’apprentissage et de manipulation des structures syntaxiques grâce à cet outil mathématique. Nous pensons plus précisément que la structure de l’espace de recherche de fonctions syntaxiques pourrait être transcrite à l’aide de conditions assez générales au niveau de règles de lambda-calcul, et que les possibilités de combinaison de ces règles permettraient de générer un grand nombre de structures syntaxiques plus ou moins complexes. Ces idées sont pour l’instant encore très préliminaires, mais nous espérons pouvoir y travailler dans un futur plus ou moins proche.

Intelligence artificielle et langage

Nous pouvons avant de conclure ce travail mentionner les liens fructueux qui gagnent à être tissés entre l’étude de l’origine du langage (ou plus généralement l’étude du langage) et l’intelligence artificielle dans son acception la plus générale.

Depuis une dizaine d’années, un flux de concepts et d’outils issus de l’intelligence artificielle (systèmes multi-agents, réseaux de neurones...) est venu irriguer le domaine de l’origine du langage. Ceci a permis et permettra pendant encore un long moment de produire des travaux originaux et porteurs d’idées nouvelles pour la compréhension de l’émergence de la communication humaine. Néanmoins, nous pensons qu’un mouvement de balancier peut s’instaurer, et l’étude du langage humain apporter en retour à l’intelligence artificielle : à l’heure où les limites des systèmes experts ou autres architectures prédéfinies sont de mieux en mieux comprises, les phénomènes émergents peuvent être des éléments-clés dans la génération de systèmes intelligents d’un nouveau genre, aux performances supérieures à celles des systèmes actuels.

Le langage est un des fondements de l’intelligence telle que nous la rencontrons chez notre espèce et telle que nous tentons de la reproduire dans des machines, et la même démarche émergente peut-être envisagée pour engendrer des systèmes linguistiques originaux. Nous pensons que comprendre et mimer la genèse du langage dans notre espèce est un des moyens de créer du sens linguistique dans une machine, même si la route est encore longue avant de parvenir à un système capable d’un langage réfléchi, même rudimentaire. Les pivots de cette recherche ambitieuse sont selon nous à trouver dans les capacités d’un système d’apprentissage à organiser de l’information linguistique et sémantique, et surtout à composer sans cesse celle-ci pour accroître la complexité des structures manipulées.

7.3 En guise de mot final...

”Il est bien plus beau de savoir quelque chose sur tout, que de savoir tout d’une chose”. Cette recherche esthétique de Pascal dans *les Pensées* nous semble se retrouver dans l’étude des problématiques scientifiques que nous avons tenté d’introduire dans ce travail. Beauté d’une construction scientifique vaste et exigeante, complexe et fragile, sans cesse remaniée et raffinée, qui se penche sur un élément fondateur de la culture et de la cognition humaines. L’étude de l’origine du langage offre aussi une occasion rare de combler un plaisir de l’appétit de connaissance, et de rêver par instant de “tout connaître sur tout”. Elle nous ouvre une porte sur ce quoi notre humanité s’est construite, sur ce qui fait l’homme et fonde la richesse de ses relations avec autrui. Ce qui nous semble être la définition même et surtout la valeur d’une science humaine et sociale.

知之為知之
不知為不知
是知也

Savoir qu'on sait quand on sait,
et savoir qu'on ne sait pas
quand on ne sait pas :
C'est là la vraie connaissance.

Entretiens de Confucius (II)

Annexe A : Approche combinatoire et représentation matricielle du modèle d'évolution linguistique

Dans cette annexe, nous souhaitons développer rapidement le traitement mathématique du modèle développé au chapitre 6 selon une approche non holistique. L'approche combinatoire paraît en effet plus facile à appliquer à des cas réels, puisqu'au lieu de devoir définir une fonction d'énergie sous forme analytique, il suffit de fournir au système les compatibilités intrinsèques et relationnelles des différents items en jeu. Ce sont ces données qui permettront de construire la fonction d'énergie qui sera manipulée par le modèle.

Le formalisme utilisé est un formalisme matriciel, qui se prête particulièrement bien à des implémentations informatiques.

3.1 Représentation matricielle des contraintes

Le pool d'items va ici être défini par une matrice \mathbf{C} dont les valeurs vont servir à représenter les compatibilités entre les différents items.

En supposant un ensemble de n items, la ligne \mathbf{i} de la matrice représentera les compatibilités relationnelles de l'item \mathbf{i} avec les autres items. Nous adoptons la définition suivante : l'élément (\mathbf{i}, \mathbf{j}) de la matrice représente la compatibilité relationnelle (dénommée par \mathbf{CR} ci-dessous) de l'item \mathbf{i} vis à vis des contraintes dans un système linguistique contenant l'item \mathbf{j} (au sens défini au chapitre 6). Les valeurs adoptées pour la \mathbf{CR} varient sur l'ensemble des réels entre $-\infty$ et $+\infty$:

- une valeur positive pour l'élément (\mathbf{i}, \mathbf{j}) signifie que l'élément \mathbf{i} est compatible avec le système contenant l'item \mathbf{j} : les contraintes sont satisfaites d'une façon globale. Ce caractère global, et le résumé de l'ensemble des contraintes dans quelques valeurs numériques, signifie par exemple au niveau phonétique que la perception est facilitée et la production rendue plus difficile, mais que *globalement* la présence de l'item \mathbf{i} rend l'utilisation du système linguistique plus aisée ;
- une valeur négative signifie au contraire que l'élément \mathbf{i} est incompatible en présence de l'item \mathbf{j} ; il va à l'encontre du jeu de contraintes ;
- une valeur nulle signifie que la compatibilité de l'item \mathbf{i} vis à vis des contraintes n'est pas influencée par la présence dans le système de l'item \mathbf{j} .

Plus la valeur de la \mathbf{CR} est grande en valeur absolue, plus la compatibilité ou l'incompatibilité est importante, ce qui avec notre définition des contraintes signifie que l'utilisation du

langage est plus fortement facilitée ou au contraire entravée.

La définition précédente s'applique pour tous les éléments (\mathbf{i}, \mathbf{j}) de la matrice où \mathbf{i} est différent de \mathbf{j} . Les éléments (\mathbf{i}, \mathbf{i}) de la matrice sont eux choisis pour mesurer la compatibilité intrinsèque de l'item \mathbf{i} , et varient eux aussi entre $-\infty$ et $+\infty$.

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & C_{1,3} & \dots & \dots & \dots \\ C_{2,1} & C_{2,2} & C_{2,3} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & C_{i,j} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

$\mathbf{C}[\mathbf{i}, \mathbf{j}] = C_{i,j}$ = compatibilité de l'item \mathbf{i} vis à vis des contraintes en présence de l'item \mathbf{j}

3.2 Représentation d'un contexte et d'un ensemble de contextes

Comme pour l'approche holistique dans le chapitre 6, les contextes vont être représentés à l'aide de vecteurs de dimension \mathbf{n} , chaque ligne du vecteur correspondant à la fréquence d'un item \mathbf{i} dans ce contexte.

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_i \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$\mathbf{V}[\mathbf{i}] = \mathbf{f}_i$ = fréquence de l'item \mathbf{i} dans le contexte \mathbf{V}

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} & f_{1,3} & \dots & \dots & \dots \\ f_{2,1} & f_{2,2} & f_{2,3} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & f_{i,j} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

$\mathbf{S}[\mathbf{i}, \mathbf{j}] = \mathbf{f}_{i,j}$ = fréquence de l'item \mathbf{i} dans le contexte \mathbf{j}

3.3 Définition de la compatibilité systémique d'un item et de la cohérence systémique d'un système

Un des intérêts d'associer compatibilités intrinsèques et relationnelles des items linguistiques dans une seule matrice est de permettre de calculer la compatibilité systémique d'un item dans

un contexte particulier ou un ensemble de contextes. A partir du vecteur des fréquences des items dans un contexte, nous définissons la compatibilité systémique \mathbf{c}_s d'un item linguistique i dans le contexte \mathbf{V} selon la formule :

$$\mathbf{c}_s(\mathbf{i}, \mathbf{V}) = \mathbf{f}_i \times \left(\mathbf{C}[\mathbf{i}, \mathbf{i}] + \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{f}_j \times \mathbf{C}[\mathbf{i}, \mathbf{j}] \right)$$

La compatibilité systémique d'un item dans un contexte prend en compte d'une part sa fréquence d'occurrence dans le contexte, et d'autre part les fréquences d'utilisation des autres items qui s'expriment dans le contexte en les reliant aux compatibilités relationnelles. La composition de la formule de calcul se justifie de la façon suivante :

- plus la fréquence de l'item considéré dans le contexte est importante, plus l'effet de sa compatibilité systémique vis à vis des contraintes sera marqué. Un item de fréquence nulle a bien une compatibilité systémique nulle puisque n'apparaissant pas, il ne vient jouer aucun rôle vis à vis des contraintes. A l'opposé, plus la fréquence d'occurrence d'un item est importante, plus il joue un rôle important dans l'utilisation du langage, et plus sa compatibilité systémique peut prendre des valeurs importantes, négatives ou positives ;
- en ce qui concerne les fréquences d'occurrence des autres items, le raisonnement est symétrique : si la fréquence d'un item \mathbf{j} est nulle, la compatibilité relationnelle de l'item \mathbf{i} avec lui sera nulle, c'est à dire n'aura aucune influence sur la compatibilité de \mathbf{i} vis à vis des contraintes. A l'opposé, plus l'item \mathbf{j} aura une fréquence importante, plus il se manifestera souvent dans l'utilisation du système linguistique, et plus il sera nécessaire de prendre en compte sa relation avec \mathbf{i} vis à vis des contraintes.

Remarquons que l'on peut décomposer la compatibilité systémique d'un item comme le produit de sa fréquence par sa **compatibilité systémique absolue**, c'est à dire la valeur de sa compatibilité systémique lorsque sa fréquence est égale à $\mathbf{1}$.

Le calcul de la compatibilité systémique d'un item est indépendante de la présence effective de celui-ci dans le contexte. Il est donc possible de mesurer cette valeur pour une fréquence quelconque et un système donné, ce qui permet d'envisager comment une modification fréquentielle augmente ou diminue la compatibilité systémique d'un item.

Il nous faut maintenant définir la cohérence systémique d'un contexte à partir des compatibilités systémiques des items qui le composent. Cette définition peut se faire simplement de la façon suivante :

$$\mathbf{c}_s(\mathbf{V}) = \frac{1}{\mathbf{n}} \sum_{j=1}^{\mathbf{n}} \mathbf{c}_s(\mathbf{j}, \mathbf{V})$$

La cohérence du système est la moyenne des compatibilités systémiques des items qui le composent (avec un jeu de fréquences donné. Si une fréquence est nulle, les formules montrent bien que l'item ne joue aucun rôle dans le calcul de la cohérence).

La cohérence systémique d'un système linguistique nous donne accès à la fonction d'énergie du système, puisque nous avons défini dans le chapitre 2 l'énergie d'un système linguistique

comme son adéquation au jeu de contraintes naturelles et distribuées. Plus la cohérence systémique d'un système sera importante, et plus l'énergie sera faible, et inversement. L'énergie est donc simplement l'inverse de la cohérence systémique.

Il est possible d'étendre facilement les calculs de compatibilité systémique et de cohérence d'un système \mathbf{S} dans le cas de plusieurs contextes indépendants $(\mathbf{V}_1, \dots, \mathbf{V}_q)$ (\mathbf{S} est constitué de l'ensemble de ces contextes) :

$$\mathbf{c}_s(\mathbf{i}, (\mathbf{V}_1, \dots, \mathbf{V}_q)) = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q \mathbf{c}_s(\mathbf{i}, \mathbf{V}_k)$$

$$\mathbf{c}_s(\mathbf{S}) = \sum_{k=1}^q \mathbf{c}_s(\mathbf{V}_k)$$

3.4 Dérivée de la fonction d'énergie

Pour pouvoir appliquer les mécanismes d'évolution spécifiés au chapitre 6, il est nécessaire de pouvoir calculer les dérivées partielles de la fonction d'énergie du système selon les différents paramètres du système.

Cette opération est en fait simple à réaliser au niveau mathématique, comme le résumant les formules suivantes :

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_s(\mathbf{V}) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{c}_s(i, \mathbf{V}) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(f_i \times \left(\mathbf{C}[i, i] + \sum_{j=1, j \neq i}^n f_j \times \mathbf{C}[i, j] \right) \right) \\ &= \frac{1}{n} \left(f_{i_0} \times \mathbf{C}[i_0, i_0] + \sum_{i=1, i \neq i_0}^n f_i \times \mathbf{C}[i, i] + \sum_{j=1, j \neq i_0}^n f_{i_0} \times f_j \times \mathbf{C}[i_0, j] \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1, i \neq i_0}^n f_i \times f_{i_0} \times \mathbf{C}[i, i_0] + \sum_{i=1, i \neq i_0}^n \sum_{j=1, j \neq i, j \neq i_0}^n f_i \times f_j \times \mathbf{C}[i, j] \right) \\ \implies \frac{\partial \mathbf{c}_s(\mathbf{V})}{\partial f_i} &= \frac{1}{n} \left(\mathbf{C}[i, i] + \sum_{j=1, j \neq i}^n f_j \times \mathbf{C}[i, j] + \sum_{j=1, j \neq i}^n f_j \times \mathbf{C}[j, i] \right) \end{aligned}$$

Les calculs précédents concerne un unique contexte, mais il est facile de les étendre à un ensemble de contextes. L'algorithme de *steepest descent* portera dès lors sur l'ensemble des fréquences dans les différents contextes. Les formules suivantes prennent en compte l'ensemble des contextes :

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_s((\mathbf{V}_1, \dots, \mathbf{V}_q)) &= \frac{1}{\mathbf{n} \times \mathbf{q}} \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n \mathbf{c}_s(i, \mathbf{V}_k) \\ &= \frac{1}{\mathbf{n} \times \mathbf{q}} \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n \left(f_i \times \left(\mathbf{C}[i, i] + \sum_{j=1, j \neq i}^n f_j \times \mathbf{C}[i, j] \right) \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \mathbf{c}_s((\mathbf{V}_1, \dots, \mathbf{V}_q))}{\partial f_i(\mathbf{V}_k)} = \frac{1}{\mathbf{n} \times \mathbf{q}} \left(\mathbf{C}[i, i] + \sum_{j=1, j \neq i}^n f_j(\mathbf{V}_k) \times (\mathbf{C}[i, j] + \mathbf{C}[j, i]) \right)$$

Annexe B : Table des correspondances phonétiques et classification des langues des îles Andaman

a	like English "idea" and "cut"	j	like English "judge"
e	like English "bed"	k	like English "king"
i	like English "lid"	l	like English "lap"
o	like English "indolent"	m	like English "man"
u	like English "influence"	n	like English "nun"
ai	like English "bite"	ñ	like French "gagner"
au	like English "house"	ng	like English "bring"
b	like English "bed"	r	like English "rest"
ch	like English "church"	s	like English "sad"
d	like English "dip"	t	like English "ten"
g	like English "gap"	w	like English "wet"
h	like English "hay"	y	like English "yolk"

TAB. 1 – Table des correspondances pour la prononciation des mots en langues Andamaïses

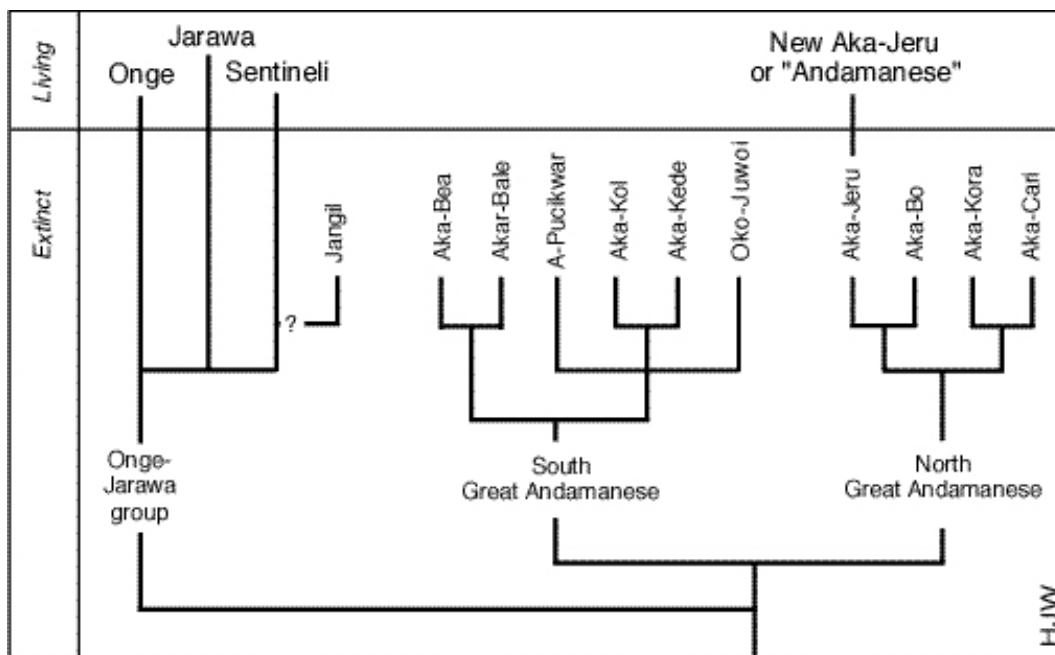


FIG. 1 – Proposition de classification des langues des îles Andaman

Bibliographie

- [GTK, 2002] (2002). Gtk+, the gimp toolkit. <http://www.gtk.org/>.
- [Abramowitz and Stegun, 1964] Abramowitz, M. and Stegun, I. A. (1964). *Handbook of Mathematical Functions*. National Bureau of Standards.
- [Adams, 1997] Adams, J. (1997). Global land environments since the last interglacial. Oak Ridge National Laboratory, TN, USA. <http://www.esd.ornl.gov/ern/qen/nerc.html>.
- [Aitchison, 1985] Aitchison, J. (1985). *Language Change : Progress or Decay*. Universe Introductions to linguistics. Universe Books, New York.
- [Allen, 1994] Allen, J. (1994). Radiocarbon determinations, luminescence dating and Australian archaeology. *Antiquity*, 68 :339–43.
- [Arbib and Rizzolatti, 1996] Arbib, M. A. and Rizzolatti, G. (1996). Neural expectations : a possible evolutionary path from manual skills to language. *Communication and Cognition*, 29(3/4) :393–424.
- [Auroux and Mayet, 2001] Auroux, S. and Mayet, L. (2001). Entretien avec Sylvain Auroux, Le mystère des racines. *Sciences et Avenir*, 125 :12–15.
- [Aydede, 1999] Aydede, M. (1999). The Language of Thought Hypothesis. The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Metaphysics Research Lab at the Center for the Study of Language and Information (CSLI) at Stanford University. <http://plato.stanford.edu/entries/language-thought/>.
- [Bagby, 1995] Bagby, R. (1995). Calculating Normal Probabilities. *Amer. Math. Monthly*, 102 :46–49.
- [Baldi, 1983] Baldi, P. (1983). *An Introduction to the Indo-European Languages*, chapitre Introduction, pages 3–23. Southern Illinois University Press.
- [Balter, 2002] Balter, M. (2002). What Made Humans Modern ? *Science*, 295 :1219–1225.
- [Bard et al., 1990] Bard, E., Hamelin, B., and Fairbanks, R. G. (1990). U-th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados : sea level during the past 130,000 years. *Nature*, 346(6283) :456–458.
- [Batali, 1994] Batali, J. (1994). *Artificial Life IV*, chapitre Innate Biases and Critical Periods : Combining Evolution and Learning in the Acquisition of Syntax, pages 160–171. MIT Press.
- [Batali, 1997] Batali, J. (1997). *Computational Simulations of the Emergence of Grammar*, pages 405–426. Cambridge University Press, Oxford.
- [Batali, 2000] Batali, J. (2000). Negotiating syntax. Dans *Proceedings of the third Conference on the Evolution of Language*, pages 181–182. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- [Bednarick, 1999] Bednarick, R. G. (1999). Maritime navigation in the lower and middle palaeolithic. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 328 :559–563.

- [Bednarick, 2001] Bednarick, R. G. (2001). Replicating the first known sea travel by humans : the lower pleistocene crossing of lombok strait. *Human Evolution*, 16 (3/4) :229–42.
- [Bellwood, 1989] Bellwood, P. (1989). *The colonization of the Pacific : a genetic trail*, chapitre The colonization of the Pacific : some current hypotheses. Oxford Science Publications.
- [Ben Hamed et al., 2002] Ben Hamed, M., Darlu, P., and Vallée, N. (2002). Cladistic reconstruction of linguistic trees through vocalic data. Dans *Fourth International Conference on the Evolution of Language, Harvard, March 2002*, page 9.
- [Bickerton, 1988] Bickerton, D. (1988). *Linguistics : The Cambridge Survey*, chapitre Creole languages and the bioprogram, pages 267–284. Cambridge University Press, Cambridge.
- [Bickerton, 1990] Bickerton, D. (1990). *Language and Species*. The University of Chicago Press.
- [Biraben et al., 1997] Biraben, J.-N., Masset, C., and Thillaud, P. L. (1997). *Histoire des populations de l'Europe, tome 1 - Des origines aux prémices de la révolution démographique*, chapitre Le peuplement préhistorique de l'Europe, pages 39–92. Fayard.
- [Birdsell, 1977] Birdsell, J. (1977). *Sunda and Sahul : Prehistoric Studies in Southeast Asia, Melanesia and Australia*, chapitre The recalibration of a paradigm for the first peopling of Greater Australia, pages 113–167. London :Academic Press.
- [Birdsell, 1957] Birdsell, J. B. (1957). Some population problems involving pleistocene man. *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, 122 :47–69.
- [Black, 1999] Black, C. A. (1999). A step-by-step introduction to the Government and Binding theory of syntax. 1999 Summer Institute of Linguistics. <http://www.sil.org/mexico/ling/E002-IntroGB.pdf>.
- [Bocquet-Appel and Demars, 2000] Bocquet-Appel, J.-P. and Demars, P.-Y. (2000). Population kinetics in the upper palaeolithic in western europe. *Journal of Archaeological Science*, 27 :551–570.
- [Bohas, 2002] Bohas, G. (2002). A propos du signe linguistique : arbitraire ou motivé? Dans *Handouts, IIIèmes Journées d'Etudes Linguistiques, "Universaux sonores", Nantes, Mars 2002*.
- [Bonabeau and Theraulaz, 2000] Bonabeau, E. and Theraulaz, G. (2000). *Intelligence collective*. Hermès Science (Systèmes Complexes).
- [Bonabeau et al., 1998] Bonabeau, E., Theraulaz, G., Deneubourg, J.-L., Franks, N. R., Rafelsberger, O., Joly, J.-L., and Blanco, S. (1998). A model for the emergence of pillars, walls and royal chambers in termite nests. *Philosophical transactions of the Royal Society of London biological sciences*, 1375(353) :1561–1576.
- [Bowdler, 1977] Bowdler, S. (1977). *Sunda and Sahul : Prehistoric Studies in Southeast Asia, Melanesia and Australia*, chapitre The coastal colonization of Australia, pages 205–246. London :Academic Press.
- [Bowdler, 1992] Bowdler, S. (1992). *The evolution and dispersal of modern humans in Asia*, chapitre Homo Sapiens in Southeast Asia and the Antipodes, pages 559–588. Tokyo : Hokusen-Sha.
- [Briscoe, 2002] Briscoe, E. (2002). *draft for Linguistic evolution through language acquisition : formal and computational models*, chapitre Grammatical Acquisition and Linguistic Selection, pages 255–300. Cambridge University Press, Briscoe E.J. (ed).
- [Browman and Goldstein, 1989] Browman, C. P. and Goldstein, L. (1989). Articulatory gestures as phonological units. *Phonology*, 6 :201–251.

-
- [Calaby, 1976] Calaby, J. (1976). *The origins of the Australians*, chapitre Some biogeographical factors relevant to the Pleistocene movement of man to Australasia, pages 23–28. Canberra : Australian Institute of Aboriginal Studies.
- [Cancho and Solé, 2001] Cancho, R. F. i. and Solé, R. V. (2001). The small-world of human language. *Santa Fe Institute Working Paper 01-03-016*.
- [Cangelosi et al., 2002] Cangelosi, A., Greco, A., and Harnad, S. (2002). *Simulating the Evolution of Language*, chapitre Symbol Grounding and the Symbolic Theft Hypothesis. Springer, London.
- [Cangelosi and Parisi, 1998] Cangelosi, A. and Parisi, D. (1998). The emergence of a “language” in an evolving population of neural networks. *Connection Science*, 10 :83–97.
- [Cann et al., 1987] Cann, R., Stoneking, M., and Wilson, A. (1987). Mitochondrial DNA and Human evolution. *Nature*, 325 :31–36.
- [Cantalupo and Hopkins, 2001] Cantalupo, C. and Hopkins, W. D. (2001). Asymmetric Broca’s area in great apes. *Nature*, 414 :505.
- [Carfantan, 2000] Carfantan, S. (2000). Leçon 71. Langage et réalité. Site philosophie et spiritualité ; <http://perso.club-internet.fr/sergecar/cours/langag5.htm>.
- [Carré and Mrayati, 1993] Carré, R. and Mrayati, M. (1993). *Vowel transitions, vowel systems, and the Distinctive Region Model*, pages 73–89. Spring, C. et al. (eds), Elsevier, Amsterdam.
- [Carte, 1993] Carte (1993). Carte continentale indonesie est, n. 33286.
- [Cavalli-Sforza, 1994] Cavalli-Sforza, L. L. (1994). *In honor of William S-Y. Wang : interdisciplinary studies on language and language change*, chapitre An evolutionary view in linguistics, pages 17–28. Pyramid Press, Taipei, Taiwan.
- [Cavalli-Sforza et al., 1993] Cavalli-Sforza, L. L., Menozzi, P., and Piazza, A. (1993). Demic expansions and human evolution. *Science*, 259 :639–646.
- [Cavalli-Sforza et al., 1994] Cavalli-Sforza, L. L., Menozzi, P., and Plazza, A. (1994). *The History and Geography of Human Genes*. Princeton University Press.
- [Chappel et al., 1994] Chappel, J., Omura, A., McCulloch, M., Esat, T., Ota, Y., and Pandolfi, J. (1994). *Study on coral reef terraces of the Huon Peninsula, Papua New Guinea : establishment of Quaternary sea level and tectonic history*, chapitre Revised Late Quaternary sea levels between 70 and 30 ka from coral terraces at Huon Peninsula, pages 155–165. Yokohama : Department of Geography, Yokohama National University.
- [Chappell, 1974] Chappell, J. (1974). Geology of coral terraces, Huon Peninsula, New Guinea : a study of Quaternary tectonic movements and sea-level changes. *Bulletin of the Geological Society of America*, 85 :553–570.
- [Cheney and Seyfarth, 1990] Cheney, D. and Seyfarth, R. M. (1990). *How Monkeys See the World*. University of Chicago Press, Chicago.
- [Chevassus-au Louis, 2001] Chevassus-au Louis, N. (2001). Qu’est ce qu’un gène ? (recueil de propos). *La Recherche*, 348 :50–56.
- [Chomsky, 1957] Chomsky, N. (1957). *Syntactic Structures, trad. fr. Structures Syntaxiques*. Le Seuil, 1969.
- [Chomsky, 1965] Chomsky, N. (1965). *Aspects of the Theory of Syntax*. MIT Press.
- [Chomsky, 1966] Chomsky, N. (1966). *Cartesian Linguistics. A chapitre in the history of rationalist thought*. Harper & Row, New York, London.

- [Chomsky, 1981] Chomsky, N. (1981). *Principles and parameters in syntactic theory*. Explanation in Linguistics. Longman, London.
- [Chomsky, 1986] Chomsky, N. (1986). *Knowledge of Language : its Nature, Origin and Use*. Praeger, New York.
- [Christiansen, 2000] Christiansen, M. H. (2000). Using artificial language learning to study language evolution : Exploring the emergence of word order universals. Dans *Proceedings of the third Conference on the Evolution of Language*, pages 45–48. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- [Ciarlet, 1982] Ciarlet, P. G. (1982). *Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation*. Masson, Paris.
- [Clark, 1961] Clark, G. (1961). *World Prehistory : an outline*. Cambridge : Cambridge University Press.
- [Coleman, 2001] Coleman, J. (2001). Hockett's "design features" of language and other animal communication systems. *Advanced Linguistics : Biological Foundations of Language*. Course handouts. http://www.phon.ox.ac.uk/jcoleman/design_features.htm.
- [Comrie, 2000] Comrie, B. (2000). Language contact, lexical borrowing, and semantic fields. *Studies in Slavic and General Linguistics*, 28 :73–86. Issue on Languages in Contact.
- [Comte-Sponville, 1995] Comte-Sponville, A. (1995). *Petit traité des grandes vertus*. P.U.F., Paris.
- [Conroy, 1997a] Conroy, G. C. (1997a). *Reconstructing Human Origins : A Modern Synthesis*, chapitre Australopithecine Paleobiology and Phylogeny. W. W. Norton and Company.
- [Conroy, 1997b] Conroy, G. C. (1997b). *Reconstructing Human Origins : A Modern Synthesis*, chapitre Time, Climate, and Human Evolution. W. W. Norton and Company.
- [Coolidge and Wynn, 2001] Coolidge, F. L. and Wynn, T. (2001). Executive Functions of the Frontal Lobes and the Evolutionary Ascendancy of Homo Sapiens. *Cambridge Archaeological Journal*, 11(2) :255–60.
- [Coolidge and Wynn, 2002] Coolidge, F. L. and Wynn, T. (2002). Executive Functions of the Frontal Lobes and the Evolutionary Ascendancy of Homo Sapiens. Dans *Fourth International Conference on the Evolution of Language, Harvard, March 2002*, page 25.
- [Cooper, 1999] Cooper, D. L. (1999). *Linguistic Attractors : The Cognitive Dynamics of Language Acquisition and Change*, volume 2 of *Human Cognitive Processing*. John Benjamins Publishing Company, Amsterdam/Philadelphia.
- [Corballis, 2000] Corballis, M. C. (2000). Did language evolve from manual gesture ? Dans *The Evolution of Language*, pages 49–51. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- [Cormen et al., 1994] Cormen, T., Leiserson, C., and Rivest, R. (1994). *Introduction à l'algorithmique (titre original : Introduction to algorithms)*. Dunod, Paris. édition originale : 1990.
- [Croft, 1990] Croft, W. (1990). *Typology and Universals*. Cambridge Textbooks in Linguistics. Cambridge University Press.
- [Cucker et al., à paraître] Cucker, F., Smale, S., and Zhou, D.-x. Modelling language evolution. Dans *Proceedings of the ACE workshops (Acquisition-Change-Evolution)*, à paraître. City University of Hong Kong Press.
- [Damasio et al., 1996] Damasio, H., Grabowski, T., Tranel, D., Hichwa, R., and Damasio, A. R. (1996). A neural basis for lexical retrieval. *Nature*, 380 :499–505.

-
- [Darwin, 1859] Darwin, C. (1859). *L'origine des espèces*. Marabout université, ed. 1973, Verviers (Belgique).
- [Darwin, 1871] Darwin, C. (1871). *The Descent of Man*.
- [Davidson and Noble, 1992] Davidson, I. and Noble, W. (1992). Why the first colonisation of the Australian region is the earliest evidence of modern human behaviour. *Archaeology in Oceania*, 27 :113–119.
- [De Boer, 1999] De Boer, B. (1999). *Self-organization in vowel systems*. Phd. thesis, Vrije Universiteit Brussels.
- [De Boer and Kuhl, 2002] De Boer, B. and Kuhl, P. K. (2002). Co-evolution of 'motherese' and acquisition of speech. Dans *Proceedings of the Fourth International Conference on the Evolution of Language*, page 34.
- [de Brouwer, 1975] de Brouwer, D. (1975). *La Bible de Jérusalem. La Sainte Bible traduite en français sous la direction de l'école biblique de JERUSALEM*. Editions du Cerf, Paris.
- [De Waal, 1998] De Waal, F. B. (1998). *Chimpanzee Politics : Power and Sex among Apes*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- [Deacon, 1997] Deacon, T. (1997). *The Symbolic Species, the co-evolution of language and the human brain*. Penguin books.
- [DeGusta et al., 1999] DeGusta, D., Gilbert, W. H., and Turner, S. P. (1999). Hypoglossal canal size and hominid speech. *PNAS*, 96 :1800–1804.
- [Dehaene et al., 1997] Dehaene, S., Dupoux, E., Melher, J., Cohen, L., Paulesu, E., Perani, D., van de Moortele, P.-F., and Le Bihan, D. (1997). Anatomical variability in the cortical representation of first and second language. *NeuroReport*, 8 :3809–3815.
- [D'Errico et al., 2001] D'Errico, F., Henshilwood, C., and Nilssen, P. (2001). An engraved bone fragment from c. 70,000-year-old Middle Stone Age levels at Blombos Cave, South Africa : implications for the origin of symbolism and language. *Antiquity*, 75(288) :309–318.
- [D'Errico et al., 1998] D'Errico, F., Zilhão, J., Julien, M., Baffier, D., and Pelegrin, J. (1998). Neanderthal Acculturation in Western Europe. *Current Anthropology, Supplement*, 39 :1–22.
- [Descartes, 1637] Descartes, R. (1637). *Discours de la méthode*. Garnier-Flammarion (poche).
- [Descartes, 1646] Descartes, R. (1646). Lettre au Marquis de Newcastle.
- [Dessalles, 1999] Dessalles, J.-L. (1999). Coalition factor in the evolution of non-kin altruism. *Advances in complex systems*, 2(2) :143–172.
- [Dessalles, 2000] Dessalles, J.-L. (2000). *Aux origines du langage - Une histoire naturelle de la parole*. Hermes Science Publications, Paris.
- [Dik, 1980] Dik, S. (1980). *Seventeen Sentences : Basic Principles and Application of Functional Grammar*, pages 45–75. New York : Academic Press.
- [Dixon, 1980a] Dixon, R. (1980a). *The Languages of Australia*, chapitre Tribe and Language, pages 23–46. Cambridge Language Surveys. Cambridge University Press.
- [Dixon, 1980b] Dixon, R. (1980b). *The Languages of Australia*. Cambridge Language Surveys. Cambridge University Press.
- [Dixon, 1997] Dixon, R. (1997). *The rise and fall of languages*. Cambridge University Pres.
- [Dorogovtsev and Mendes, 2001] Dorogovtsev, S. N. and Mendes, J. F. F. (2001). Language as an evolving word web. *Proceedings of The Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 268(1485) :2603–2606.

- [Dunbar, 1996] Dunbar, R. (1996). *Grooming, Gossip and The Evolution of Language*. London, Farber and Farber.
- [Dunbar, 1993] Dunbar, R. I. M. (1993). Coevolution of neocortical size, group size and language in humans. *Behavioral and Brain Sciences*, (16) :681–694.
- [Edmonds, 1999] Edmonds, B. (1999). *Modelling Bounded Rationality In Agent-Based Simulations using Evolution of Mental Models*, pages 305–332. Dordrecht : Kluwer.
- [Ehala, 1996] Ehala, M. (1996). Self-organisation and language change. *Diachronica*, 13(1) :1–28.
- [Eldredge and Gould, 1972] Eldredge, N. and Gould, S. J. (1972). *Models In Paleobiology*, chapitre Punctuated equilibria : an alternative to phyletic gradualism.
- [Enard et al., 2002] Enard, W., Przeworski, M., Fisher, S. E., Lai, C. S. L., Wiebe, V., Kitano, Takashi Monaco, A. P., and Pääbo, S. (2002). Molecular evolution of FOXP2, a gene involved in speech and language. *Nature*, 418 :869.
- [Evans, 1999] Evans, N. (1999). Faint tracks in an ancient wordscape. Dans *Entering New Landscapes : a Conference to Compare the First Human Occupations of Australia, the Americas and Remote Oceania*.
- [Evenden and Warmerdam, 2000] Evenden, G. and Warmerdam, F. (2000). Proj.4, release 4.3. <http://www.remotesensing.org/proj/>.
- [Excoffier and Schneider, 1999] Excoffier, L. and Schneider, S. (1999). Why hunter-gatherer populations do not show signs of Pleistocene demographic expansions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 96 :10597–10602.
- [Fauconnier, 2000] Fauconnier, G. (2000). *Cognitive Linguistics : Foundations, Scope, and Methodology*, chapitre Methods and Generalizations (Introduction), pages 95–127. Cognitive Linguistics Research Series. Mouton De Gruyter, The Hagues.
- [Fauconnier and Turner, 1996] Fauconnier, G. and Turner, M. (1996). *Conceptual Structure, Discourse, and Language*, chapitre Blending as a Central Process of Grammar, pages 113–130. Cambridge University Press.
- [Fontana and Buss, 1994] Fontana, W. and Buss, L. W. (1994). *Complexity : Metaphors, Models, and Reality*, chapitre What would be conserved if “the tape were played twice?”, pages 223–244. Addison-Wesley, Reading, MA.
- [Fouts, 1973] Fouts, R. (1973). Acquisition and testing of gestural signs in four young chimpanzees. *Science*, 180 :978–980.
- [Freedman and Wang, 1996] Freedman, D. A. and Wang, W. S. (1996). Language Polygenesis : A Probabilistic Model. *Anthropological Sciences*, 104(2) :131–138.
- [Frege, 1879] Frege, G. (1879). Begriffsschrift, eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens. pages 1879–1931. MA : Harvard University Press, Cambridge. Transcribed as ‘Begriffsschrift, a formula language, modelled upon that of arithmetic, for pure thought’, reprinted in Jean van Heijenoort (ed), *From Frege to Gödel : a source Book in Mathematical Logic, 1879-1931, 1967*, pp. 1-82.
- [Fullagar et al., 1996] Fullagar, R., Price, D., and Head, L. (1996). Early human occupation of northern Australia : archaeology and thermoluminescence dating of Jinmium rockshelter, Northern Territory. *Antiquity*, 70 :751–773.
- [Gardner and Gardner, 1969] Gardner, A. R. and Gardner, Beatrice, T. (1969). Teaching Sign Language to a Chimpanzee. *Science*, 165 :664–672.

-
- [Gardner and Gardner, 1989] Gardner, R. and Gardner, B. (1989). *A Cross-Fostering Laboratory*, chapitre Teaching Sign Language to Chimpanzees, pages 1–28. State University of New York Press, Albany.
- [Gell-Mann, 1992] Gell-Mann, M. (1992). Complexity and complex adaptive systems. Dans Hawkins, J. A. and Gell-Mann, M., éditeurs, *The evolution of human languages*, pages 3–18. Addison-Wesley.
- [Georgopoulos et al., 1988] Georgopoulos, A., Kettner, R., and Schwartz, A. (1988). Primate motor cortex and free arm movements to visual targets in three-dimensional space.II. coding of the direction of movement by a neuronal population. *Journal of Neuroscience*, 8 :2928–2937.
- [Gerbier, 1999b] Gerbier, L. (1998-1999b). L’origine des langues. Corrigé de leçon d’agrégation, section philosophie, Ecole Normale Supérieure de Lettres et Sciences Humaines de Lyon.
- [Gerbier, 1999a] Gerbier, L. (1999a). Aristote. De l’interprétation I. Corrigés de leçons d’agrégation de Laurent Gerbier, L’Origine des Langues. <http://ma-page.noos.fr/ottoviani/section/lec/lang2.htm>.
- [Gibson, 1998] Gibson, E. (1998). Linguistic complexity : locality of syntactic dependencies. *Cognition*, 68 :1–76.
- [Gorgias, 2001] Gorgias (2001). Les sophistes. Gorgias : théorie et pratique du langage. *Données encyclopédiques, Hachette Multimédia / Hachette Livre*.
- [Gould, 1994] Gould, S. J. (1994). The Evolution of Life on the Earth. *Scientific American (October)*, page 62.
- [Gouvea, 2000] Gouvea, A. (2000). *Working Memory and theories of syntactic complexity*. Public defense : Doctoral research paper (895), University of Maryland at College Park.
- [Gratton and Fabiani, 2001] Gratton, G. and Fabiani, M. (2001). Shedding light on brain function : the event-related optical signal. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(8) :357–363.
- [Greenberg, 1966] Greenberg, J. H. (1966). *The Languages of Africa*. The Hague : Mouton.
- [Greenberg, 1978] Greenberg, J. H. (1978). *Universals of human language. Method and Theory*, volume 1, chapitre Diachrony, Synchrony, and Language Universals, pages 61–92. Stanford University Press, Stanford, California.
- [Greenberg, 1987] Greenberg, J. H. (1987). *Language in the Americas*. Stanford University Press, Stanford.
- [Groube et al., 1986] Groube, L., Chappell, J., Muke, J., and Price, D. (1986). A 40,000 year-old human occupation site at Huon Peninsula, Papua New Guinea. *Nature*, 324 :453–455.
- [Guenther and Gjaja, 1996] Guenther, F. H. and Gjaja, M. N. (1996). The perceptual magnet effect as an emergent property of neural map formation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100 :1111–1121.
- [Haken, 1988] Haken, H. (1988). *Information and self-organization : a macroscopic approach to complex systems*. Springer-Verlag, Berlin.
- [Harpending et al., 1998] Harpending, H. C., Batzer, M. A., Gurven, M., Jorde, L. B., Rogers, A. R., and Sherry, S. T. (1998). Genetic traces of ancient demography. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95 :1961–7.
- [Harpending et al., 1993] Harpending, H. C., Sherry, S. T., Rogers, A. R., and Stoneking, M. (1993). The Genetic Structure of Ancient Human Populations. *Current Anthropology*, 34(4) :483–496.

- [Hassan, 1981] Hassan, F. A. (1981). *Demographic Archaeology*. Studies in Archaeology. Academic Press.
- [Hauser, 1996] Hauser, M. D. (1996). *The Evolution of Communication*. MIT press, Cambridge, MA.
- [Hawks et al., 2000] Hawks, J., Hunley, K., Lee, S.-H., and Wolpoff, M. (2000). Population Bottlenecks and Pleistocene Human Evolution. *Mol. Biol. Evol.*, 17(1) :2–22.
- [Hebb, 1949] Hebb, D. O. (1949). *The Organization of Behavior : A Neuropsychological Theory*. Wiley, New York.
- [Heim et al., 2002] Heim, J.-L., Boë, L.-J., and Abry, C. (2002). La parole à la portée du conduit vocal de l’homme de néanderthal. *soumis à CRAS*.
- [Hinton et al., 1994] Hinton, L., Nichols, J., and Ohala, J. (1994). *Sound symbolism*, chapitre 1. Introduction : Sound-symbolic processes, pages 1–12. Cambridge University Press.
- [Holland, 1975] Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor.
- [Hombert and Li, 2000] Hombert, J.-M. and Li, C. (2000). The time scale of language evolution. Dans *Proceedings of the third Conference on the Evolution of Language*, page 129. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- [Hombert and Puech, 1984] Hombert, J.-M. and Puech, G. (1984). Espace vocalique et structuration perceptuelle en swahili. *Pholia*, 1 :199–208.
- [Honda and Tiede, 1998] Honda, K. and Tiede, M. K. (1998). An MRI study on the relationship between oral cavity shape and larynxposition. Dans *5th International Conference on Spoken Language Processing, vol. 2*, pages 437–440.
- [Hopfield and Brody, 2000] Hopfield, J. and Brody, C. D. (2000). What is a moment ? ‘cortical’ sensory integration over a brief interval. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 97(25) :13919–24.
- [Hopfield and Brody, 2001] Hopfield, J. and Brody, C. D. (2001). What is a moment ? transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 98(3) :1282–7.
- [Irwin, 1992] Irwin, G. (1992). *The prehistoric exploration and colonisation of the Pacific*. Cambridge University Press.
- [Jacquesson, 1999] Jacquesson, F. (1999). L’évolution des langues dépend-elle de la densité des locuteurs ? Dans *Colloque Gyarmathi. Deux cents ans apres l’Affinitas : regards sur Gyarmathi et les réalités finno-ougriennes*. Association pour le Développement des Etudes Finno-Ougriennes.
- [Jacquesson, 2001] Jacquesson, F. (2001). *Etudes de linguistique générale et contrastive. Hommage à Jean Perrot*, chapitre Pour une linguistique des quasi-déserts, pages 199–216. Paris, Centre de Recherche sur les Langues et les Sociétés, anne-marie loffler-laurian edition.
- [Johnson et al., 1999] Johnson, B., Miller, G., Fogel, M., Magee, J., Gagan, M., and Chivas, A. (1999). 65,000 Years of Vegetation Change in Central Australia and the Australian Summer Monsoon. *Science*, 284 :1150–52.
- [Jones, 1989] Jones, R. (1989). *The human revolution : Behavioural and biological perspectives on the origins of modern humans*, chapitre East of Wallace’s Line : Issues and problems in the colonization of the Australian continent, pages 743–782. Edinburgh : Edinburgh University Press.

-
- [Jones, 1992] Jones, R. (1992). *Continuity or replacement : Controversies in Homo Sapiens Evolution*, chapitre The human colonization of the Australian continent, pages 289–301. Rotterdam : A.A. Balkema.
- [Kamada et al., 1999] Kamada, K., Kober, H., Houkin, K., Abe, H., Mitsumori, K., and Vieth, J. (1999). Responses to silent Kanji reading of the native Japanese and German in task subtraction magnetoencephalography. *NeuroImage*, 9(6) :1006.
- [Kaplan, 2000] Kaplan, F. (2000). *L'émergence d'un lexique dans une population d'agents autonomes*. PhD thesis, Université Paris 6.
- [Kay, 1999] Kay, P. (1999). *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*, chapitre Color Categorization. MIT Press.
- [Kay et al., 1998] Kay, R., Cartmill, M., and Balow, M. (1998). The Hypoglossal Canal and the Origin of Human Vocal Behavior. *PNAS*, 95(9) :5417–5419.
- [Ke et al., 2002a] Ke, J., Minett, J., Au, C., and Wang, W. S.-Y. (2002a). Self-organization and Natural Selection in the Emergence of Vocabulary. *Complexity*, 7(3) :41–54.
- [Ke et al., 2002b] Ke, J., Wang, F., and Coupé, C. (2002b). The rise and fall of homophones : a window to language evolution. Dans *Proceedings of the Fourth International Conference on the Evolution of Language, Harvard*, page 58.
- [Keller, 1994] Keller, R. (1994). *On language change : the invisible hand in language*. Routledge, London.
- [Kimura, 1983] Kimura, M. (1983). *The neutral theory of molecular evolution*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [Kingdon, 1993] Kingdon, J. (1993). *Self-Made Man and his Undoing*. Simon and Schuster, London.
- [Kirby, 1997] Kirby, S. (1997). *Approaches to the evolution of language : Social and Cognitive Bases*, chapitre Fitness and the selective adaptation of language, pages 359–383. Cambridge University Press.
- [Kirby, 2000] Kirby, S. (2000). Syntax without Natural Selection : How compositionality emerges from vocabulary in a population of learners. Dans C. Knight, M. S.-K. and Hurford, J., éditeurs, *The Evolutionary Emergence of Language : Social function and the origins of linguistic form*, pages 303–323. Cambridge University Press.
- [Kirby, 2001] Kirby, S. (2001). Spontaneous Evolution of Linguistic Structure : an iterated learning model of the emergence of regularity and irregularity. *Special Issue of IEEE Transactions on Evolutionary Computation on Evolutionary Computation and Cognitive Science, in press*, 5(2) :102–10.
- [Klein, 1999] Klein, R. G. (1999). *The Human Career, Human Biological and Cultural Origins*. The University of Chicago Press : Chicago and London.
- [Kohonen, 1990] Kohonen, T. (1990). The Self-Organizing Map. Dans *Proceedings of the IEEE*, volume 78, pages 1464–1468.
- [Kuhl et al., 1992] Kuhl, P. K., Williams, K. A., Lacerda, F., Stevens, K. N., and Lindblom, B. (1992). Linguistic Experience Alters Phonetic Perception in Infants by 6 Months of Age. *Science*, 255 :606–608.
- [Kuhn, 1983] Kuhn, T. S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Champs Flammarion.

- [La Mettrie, 1748] La Mettrie, J. O. d. (1748). *L'Homme machine*.
- [Labov, 1972] Labov, W. (1972). *Sociolinguistic Patterns*. University of Pennsylvania Press, Philadelphia.
- [Labov, 2001] Labov, W. (2001). *Principles of Linguistic Change. Social factors*, volume 2 of *Language in Society*. Blackwell, Oxford, U.K.
- [Labov, 2002] Labov, W. (2002). Driving forces in linguistic change. Dans *International Conference on Korean Linguistics*, Seoul National University.
- [Lahr and Foley, 1994] Lahr, M. M. and Foley, R. (1994). Multiple Dispersals and Modern Human Origins. *Evolutionary Anthropology*, 3 :48–60.
- [Lai et al., 2001] Lai, C. S., Fisher, S. E., Hurst, J. A., Vargha-Khadem, F., and Monaco, A. P. (2001). A forkhead-domain gene is mutated in a severe speech and language disorder. *Nature*, 413 :519–523.
- [Lambeck and Chappell, 2001] Lambeck, K. and Chappell, J. (2001). Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle. *Science*, 292 :679–686.
- [Lass, 1997] Lass, R. (1997). *Historical linguistics and language change*, volume 81 of *Cambridge Studies in Linguistics*. Cambridge University Press.
- [Lehr Jr., 2002] Lehr Jr., R. P. (2002). Brain functions and map. Center for Neuro skills. <http://www.neuroskills.com/index.html?main=tbi/bfrontal.shtml>.
- [Leroi-Gourhan, 1964] Leroi-Gourhan (1964). *Le geste et la parole. Technique et langage*. Albin Michel.
- [Lestel, 1995] Lestel, D. (1995). *Paroles de singe - L'impossible dialogue primate-homme*. Editions La Découverte.
- [Lewis, 1990] Lewis, R. (1990). *Pourquoi j'ai mangé mon père*. Babel.
- [Li, 1999] Li, P. (1999). Generalization, representation, and recovery in a self-organizing feature-map model of language acquisition. Dans Hahn, M. and Stoness, S., éditeurs, *Proceedings of the 21st Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pages 308–313, Mahwah, NJ. Lawrence Erlbaum.
- [Lieberman and Crelin, 1971] Lieberman, P. and Crelin, E. (1971). On the speech of the Neanderthal man. *Linguistic Inquiry*, 2(2) :203–222.
- [Lindblom et al., 1984] Lindblom, B., MacNeilage, P., and Studdert-Kennedy, M. (1984). Self-organizing Processes and the Explanation of Language Universals. Dans Butterworth, B., Bernard, C., and Dahl, O., éditeurs, *Explanations for Language Universals*, pages 181–203. Walter de Gruyter & Co. reprinted in *Explanations in Language*, Pyramid Press, 1991, pp.105-130.
- [Lowe and Mazaudon, 1994] Lowe, J. and Mazaudon, M. (1994). The reconstruction engine : a computer implementation of the comparative method. *Association for Computational Linguistics Special Issue in Computational Phonology*, 20(3) :381–417.
- [Mac Intyre, 1998] Mac Intyre, A. (1998). Babel, a testbed for research in origins of language. Dans *Proceedings of COLING-ACL 98, Montreal, ACL*.
- [MacNeilage, 1998] MacNeilage, P. F. (1998). The frame/content theory of evolution of speech production. *Behavioral and Brain Sciences*, 21(4) :499–511.
- [Marsico, 1999] Marsico, E. (1999). What can a database of proto-languages tell us about the last 10,000 years of sound changes? Dans *Proceedings of the XIVth International Congress of Phonetic Sciences, San Francisco*. University of East London.

-
- [Marsico et al., 2000] Marsico, E., Coupe, C., and Pellegrino, F. (2000). Evaluating the influence of language contact on lexical changes. Dans *Proceedings of the third Conference on the Evolution of Language*, pages 154–155. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- [Marsico et al., 2002] Marsico, E., Coupé, C., Pellegrino, F., and Hombert, J.-M. (2002). Vers une mesure de la complexité des systèmes phonologiques. Dans *IIIèmes Journées d’Etudes Linguistiques, "Universaux sonores", Nantes, Mars 2002*.
- [Marwick, 2002] Marwick, B. (2002). Raw material transportation as an indicator of hominid symbolic linguistic capacity during the Pleistocene. Dans *Proceedings of the Fourth International Conference on the Evolution of Language*, page 74.
- [Maturana and Mpodozis, 1999] Maturana, H. and Mpodozis, J. (1999). *De l’origine des espèces par voie de la dérive naturelle*. Traduit de l’espagnol par Louis Vasquez et Paul Castella, Presses universitaires de Lyon.
- [Mayet, 2001] Mayet, L. (2001). Editorial : Quelle langue parlait-on il y a 100 000 ans ? la langue d’homo erectus. *Sciences et Avenir (Hors-série)*, 125 :3.
- [Mayr, 1944] Mayr, E. (1944). *Systematics and the Origin of Species*. Columbia University Press, New York.
- [McArthur et al., 1976] McArthur, N., Saunders, I. W., and Tweedie, R. (1976). Small population isolates : a micro-simulation study. *Journal of the Polynesian Society*, 85 :307–326.
- [Miller et al., 1999] Miller, G. H., Magee, J. W., Johnson, B. J., Fogel, M. L., Spooner, N. A., McCulloch, M. T., and Ayliffe, L. K. (1999). Pleistocene Extinction of *Genyornis newtoni* : Human Impact on Australian Megafauna. *Science*, 283 :205–208.
- [Milroy, 1992] Milroy, J. (1992). *Linguistic Variation and Change*. Blackwell, Oxford.
- [Minett and Wang, 2002] Minett, J. and Wang, W. S.-Y. (2002). Detecting Borrowing Among Languages : a glottochronological approach. Dans *Fourth International Conference on the Evolution of Language, Harvard, March 2002*.
- [Minsky, 1987] Minsky, M. (1987). *The Society of Mind*. Simon and Schuster.
- [Mircea and Couliano, 1990] Mircea, E. and Couliano, I. P. (1990). *Dictionnaire des religions*, chapitre Religions de la préhistoire, pages 263–266. Agora. Plon.
- [Morwood et al., 1999] Morwood, M., Aziz, F., O’Sullivan, P., Nasruddin, Hobbs, D., and Raza, A. (1999). Archaeological and palaeontological research in central Flores, east Indonesia : results of fieldwork 1997-98. *Antiquity*, 13 :273–86.
- [Mouguiama-Daouda, 1995] Mouguiama-Daouda, P. (1995). *Les dénominations ethnoichtyologiques chez les bantous du Gabon : étude de linguistique historique*. PhD thesis, Université Lumière Lyon 2.
- [Métoz et al., 2002] Métoz, L., Vallée, N., Rousset, I., Boë, L., and Bessière, P. (2002). Des formes phonétiques aux proto-formes de la langue originelle. La théorie de Merritt Ruhlen à l’épreuve des probabilités. *Proceedings des XXIVèmes Journées d’Étude sur la Parole, LORIA et ATILF, Nancy.*, pages 37–40.
- [Mufwene, 2001] Mufwene, S. S. (2001). *The Ecology of Language Evolution*. Cambridge approaches to language contact. Cambridge University Press, Cambridge.
- [Murray, 1984] Murray, P. (1984). *Quaternary extinctions : A prehistoric revolution*, chapitre Extinctions Downunder : A Bestiary of Extinct Australian Late Pleistocene Monotremes and Marsupials, pages 600–628. Tucson : University of Arizona Press.

- [Naccache, 2002] Naccache, A. F. (2002). Sociolinguistic approaches to the prehistory of the Mashriqian (Semitic) languages. Dans *4th International Conference on the Evolution of Language, Harvard, March 2002*, page 80.
- [Nakada et al., 2001] Nakada, T., Fujii, Y., and Kwee, I. L. (2001). Brain strategies for reading in the second language are determined by the first language. *Neuroscience Research*, 40 :351–358.
- [Naswa, 1999] Naswa, S. (1999). *Tribes of Andaman and Nicobar islands*. Mittal Publications, New Delhi.
- [Nettle, 1999a] Nettle, D. (1999a). Is the rate of linguistic change constant? *Lingua*, 108 :119–136.
- [Nettle, 1999b] Nettle, D. (1999b). *Linguistic Diversity*. Oxford Linguistic, Oxford University Press, Oxford.
- [Nettle, 1999c] Nettle, D. (1999c). Using Social Impact Theory to simulate language change. *Lingua*, 108 :95–117.
- [Nichols, 1992] Nichols, J. (1992). *Linguistic Diversity in Space and Time*. University of Chicago Press, Chicago and London.
- [Nicolis and Prigogine, 1977] Nicolis, G. and Prigogine, I. (1977). *Self Organization in Non-Equilibrium Systems*. J. Wiley, New York.
- [Nietzsche, 1873] Nietzsche (1873). *Introduction théorétique sur la vérité et le mensonge au sens extra-moral*. Le livre du philosophe, Garnier Flammarion.
- [Niyogi and Berwick, 1997] Niyogi, P. and Berwick, R. C. (1997). A Dynamical Systems Model for Language Change. *Complex Systems*, 11 :161–204.
- [Norman, 1988] Norman, J. (1988). *Chinese*. Cambridge Language Surveys. Cambridge University Press, Cambridge.
- [Nowak et al., 2001] Nowak, M. A., Komarova, N. L., and Niyogi, P. (2001). Evolution of Universal Grammar. *Science*, 291 :114–118.
- [Nowak and Krakauer, 1999] Nowak, M. A. and Krakauer, D. C. (1999). The evolution of language. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 96 :8028–8033.
- [Nowak et al., 2000] Nowak, M. A., Plotkin, J. B., and Jansen, V. A. (2000). The evolution of syntactic communication. *Nature*, 404(30) :495–498.
- [O’Grady and Fitzgerald, 1997] O’Grady, G. and Fitzgerald, S. (1997). *Archaeology and Linguistics; Aboriginal Australia in Global Perspective*, chapitre 19. Cognate search in the Pama-Nyungan language family, pages 341–355. Oxford University Press, Melbourne.
- [Ohala, 1993] Ohala, J. (1993). The phonetics of sound change. Dans Jones, C., editor, *Historical Linguistics : Problems and Perspectives*, pages 237–278, London. Longman.
- [Ohala, 1996] Ohala, J. (1996). *Handbook of Phonetics*, chapitre The relation between phonetics and phonology, pages 674–694. Blackwell’s.
- [Oudeyer, 2001a] Oudeyer, P.-Y. (2001a). Coupled Neural Maps for the Origins of Vowel Systems. Dans *Proceedings of ICANN 2001, International Conference on Artificial Neural Networks, Vienna, Austria*, Lectures Notes in Computer Science. Springer Verlag.
- [Oudeyer, 2001b] Oudeyer, P.-Y. (2001b). The Origins Of Syllable Systems : an Operational Model. Dans *Proceedings of the International Conference on Cognitive science, COGSCI’2001, Edinburgh, Scotland*.

-
- [Oudeyer, 2002] Oudeyer, P.-Y. (2002). Phonemic coding might be a result of non-functional sensory-motor coupling dynamics. Dans *Proceedings of the Simulation of Adaptive Behavior Conference, SAB'2002, Edinburgh, Scotland*.
- [Pagel, 2000] Pagel, M. (2000). *The History, Rate and Pattern of World Linguistic Evolution*, pages 391 – 416. Cambridge University Press, (C Knight, M. Studdert-Kennedy, and J. Hurford, eds).
- [Parunak and Brueckner, 2001] Parunak, H. V. D. and Brueckner, S. (2001). Entropy and Self-Organization in Multi-Agent Systems. Dans *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents (Agents 2001)*.
- [Patrick et al., 1997] Patrick, J., Raman, A., and Newman, J. (1997). A complexity measure for diachronic Chinese phonology. Dans *Proceedings of the SIGPHON97 Workshop on Computational Linguistics at the ACL'97/EACL'97*. Somerset, N.J. Association for Computational Linguistics Madrid, Spain.
- [Pennisi, 2001] Pennisi, E. (2001). Tracking the Sexes by Their Genes. *Science*, 291(2) :1733–1734.
- [Perrone, 1999] Perrone, E. (1999). Emergence de couplages perception-action dans une population d'agents communicants : application à l'étude des systèmes vocaliques. Mémoire de DEA de Sciences Cognitives, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales ; Sony CSL Paris.
- [Pinker and Bloom, 1990] Pinker, S. and Bloom, P. (1990). Natural language and natural selection. *Behavioral and Brain Sciences*, 13 :707–784.
- [Pinot, 1999] Pinot, S. (1999). *Simulations du climat du Dernier Maximum Glaciaire. Inter-comparaison des résultats de différents modèles. Comparaison aux données paléoclimatiques*. PhD thesis, Université Paris VI.
- [Ploux and Ji, à paraître] Ploux, S. and Ji, H. A model for matching semantic maps between languages (french/english, english/french). *Computational Linguistics (in Press)*.
- [Ploux and Victorri, 1998] Ploux, S. and Victorri, B. (1998). Construction d'espaces sémantiques à l'aide de dictionnaires de synonymes. *Traitement automatique des langues*, 39(1) :161–182.
- [Pollock, 1997] Pollock, J.-Y. (1997). *Langage et Cognition*, chapitre Rétrospective et perspectives de recherche, pages 199–217. Psychologie et sciences de la pensée. Presses Universitaires de France, Paris.
- [Popescu-Belis, 2002] Popescu-Belis, A. (2002). Theory and Experimentation in the Modeling of Language Emergence. Dans *Proceedings of the Fourth International Conference on the Evolution of Language, Harvard University, Cambridge, MA*, page 95.
- [Premack, 1971] Premack, D. (1971). Language in chimpanzee? *Science*, 172 :808–822.
- [Premack and Woodruff, 1978] Premack, D. and Woodruff, G. (1978). Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behavioral and Brain Sciences*, 1 :515–526.
- [Quintana-Murci et al., 1999] Quintana-Murci, L., Semino, O., Bandelt, H., Passarino, G., McElreavey, K., and Santachiara-Benerecetti, A. (1999). Genetic evidence for a second exit of Homo sapiens sapiens from Africa via east Africa. *Nature Genetics*, 23 :437–441.
- [Ragir, 2002] Ragir, S. (2002). *Constraints on Communities with Indigenous Sign Languages : Clues to the Dynamics of Language Genesis*, chapitre 13. Oxford University Press, Oxford.
- [Redd and Stoneking, 1999] Redd, A. J. and Stoneking, M. (1999). Peopling of Sahul : mtDNA Variation in Aboriginal Australian and Papua New Guinean Populations. *AM. J. Hum. Genet.*, 65 :808–828.

- [Ringe, 1992] Ringe, D. A. J. (1992). On calculating the factor of chance in language comparison. *Transactions of the American Philosophical Society*, 82(1).
- [Rizzolatti et al., 1996] Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., and Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor action. *Cognitive Brain Research*, 3 :131–141.
- [Roberts et al., 1998] Roberts, R., Bird, M., Olley, J., Galbraith, R., Lawson, E., Laslett, G., Yoshida, H., Jones, R., Fullagar, R., Jacobsen, G., and Hua, Q. (1998). Optical and radiocarbon dating at Jinmium rock shelter in northern Australia. *Nature*, 393 :358–362.
- [Roberts et al., 1990] Roberts, R. G., Jones, R., and Smith, M. (1990). Thermoluminescence dating of a 50,000 year-old human occupation site in northern Australia. *Nature*, 345 :153–156.
- [Roberts et al., 1994a] Roberts, R. G., Jones, R., and Smith, M. (1994a). Beyond the radiocarbon barrier in Australian prehistory. *Antiquity*, 68 :611–16.
- [Roberts et al., 1994b] Roberts, R. G., Jones, R., Spooner, N. A., Head, M., Murray, A. S., and Smith, M. (1994b). The human colonisation of Australia : optical dates of 53,000 and 60,000 years bracket human arrival at Deaf Adder Gorge, Northern Territory. *Quaternary Science Reviews (Quaternary Geochronology)*, 13 :575–583.
- [Robin, 1940] Robin, L. (1940). *Platon : Oeuvres complètes, tome 1, traduction de Léon Robin*, chapitre Platon. Le Cratyle. Gallimard (Bibliothèque de la Pléiade).
- [Rondal, 2000] Rondal, J. A. (2000). *Le langage. De l'animal aux origines du langage humain*. Mardaga.
- [Ronen, 1998] Ronen, A. (1998). *Neanertals and Modern Humans in Western Asia*, chapitre Domestic fire as evidence for language, pages 439–47. Plenum Press, New York ; London.
- [Ross, 1979] Ross, J. R. (1979). Where's English ? Dans Fillmore, C. J., Kempler, D., and Wang, W. S.-Y., éditeurs, *Individual Differences in Language Ability and Language Behavior*, pages 127–166. Academic Press.
- [Rousseau, 1781] Rousseau, J.-J. (1781). *Essai sur l'origine des langues, où il est parlé de la mélodie et de l'imitation musicale*. Du Peyrou, Genève, première édition.
- [Row and Hastings, 1999] Row, L. W. and Hastings, D. (1999). Terrainbase, global 5-minute ocean depth and land elevation. National Geophysical Data Center and World Data Center-A for Solid Earth Geophysics Boulder, Colorado U.S.A.
- [Ruhlen, 1987] Ruhlen, M. (1987). *A Guide to the World's Languages*. Stanford University Press.
- [Ruhlen, 1994] Ruhlen, M. (1994). *The Origin of Language. Tracing the evolution of the mother tongue*. John Wiley and Sons, New York.
- [Sapir, 1921] Sapir, E. (1921). *Le langage, introduction à l'étude la parole, traduction de S.M. Guillemin*. Petite Bibliothèque Payot, Paris. Titre original : Language. Introduction to the Study of Speech.
- [Saussure, 1959] Saussure, F. d. (1959). *Course in General Linguistics*. McGraw-Hill, New York. Translated by Wade Baskin ; first published in French in 1916.
- [Sauvet and Wlodarczyk, 1995] Sauvet, G. and Wlodarczyk, A. (1995). Eléments d'une grammaire formelle de l'art pariétal paléolithique. *L'Anthropologie*, 99(2-3) :193–211.
- [Sauvet and Wlodarczyk, 2001] Sauvet, G. and Wlodarczyk, A. (2001). L'art pariétal, miroir des sociétés paléolithiques. *Zephyrus*, 53-54 :à paraître.

-
- [Savage-Rumbaugh et al., 1998] Savage-Rumbaugh, S., Shanker, S. G., and Taylor, J. T. (1998). *Apes, Language, and the Human Mind*. Oxford University Press.
- [Schoenemann, 1999] Schoenemann, P. T. (1999). Syntax as an emergent characteristic of the evolution of semantic complexity. *Minds and Machines*, 9 :309–346.
- [Schoenemann and Wang, 1996] Schoenemann, P. T. and Wang, W. S.-Y. (1996). Evolutionary principles and the emergence of syntax. *Behavioural and Brain Sciences*, 19(4) :646–647.
- [Schoonderwoerd et al., 1996] Schoonderwoerd, R., Holland, O., Bruten, J., and Rothkrantz, L. (1996). Ant-based load balancing in télécommunications networks. *Adaptive Behavior*, 5(2) :169–207.
- [Sherry et al., 1997] Sherry, S. T., Harpending, H. C., Batzer, M. A., and Stoneking, M. (1997). *Alu evolution in human populations : Using the coalescent to estimate effective population size*. *Genetics*, 147 :1977–80.
- [Shibatani and Pardeshi, 2001] Shibatani, M. and Pardeshi, P. (2001). The grammar of causation and interpersonal manipulation, volume 48 of *Typological Studies in Language, chapitre The causative continuum, pages 85–126*. John Benjamins Publishing Company, Amsterdam/Philadelphia.
- [Sigman and Cecchi, 2002] Sigman, M. and Cecchi, G. A. (2002). *Global organization of the Wordnet lexicon*. *PNAS*, 99(3) :1742–1747.
- [Singh et al., 1981] Singh, G., Kershaw, A., and Clark, R. (1981). Fire and the Australian Biota, *chapitre Quaternary vegetation and fire history in Australia, pages 23–54*. Canberra : Australian Academy of Science.
- [Smith et al., 2001] Smith, E., Bowles, S., and Gintis, H. (2001). *Costly Signaling and Cooperation*. Santa Fe Institute Working Paper.
- [Sperber, 1995] Sperber, D. (1995). How things are : A science toolkit for the mind, *chapitre How do we communicate ? , pages 191–199*. Morrow, New York.
- [Steels, 1996] Steels, L. (1996). *Self-organising vocabularies*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Steels, 1997a] Steels, L. (1997a). *Language Learning and Language Contact*. Dans Daelemans, W., editor, *Proceedings of the workshop on Empirical Approaches to Language Acquisition*, Prague, pages 11–24.
- [Steels, 1997b] Steels, L. (1997b). Synthesizing the origins of language and meaning using coevolution, self-organization and level formation, pages 384–404. *Cambridge University Press, Hurford J.R., Studdert-Kennedy M., Knight C. (eds)*.
- [Steels, 1997c] Steels, L. (1997c). *The synthetic modeling of language origin*. *Evolution of Communication Journal*, 1(1) :1–34.
- [Steels, 1999] Steels, L. (1999). *The Talking Heads Experiment, Volume 1 : Words and Meanings*. VUB Artificial Intelligence Laboratory.
- [Steels, 2000] Steels, L. (2000). *A brain for language*. Dans *The Ecological Brain. Sony CSL - Paris - 2000 Symposium*.
- [Steels and Kaplan, 1998] Steels, L. and Kaplan, F. (1998). *Spontaneous Lexicon Change*. Dans *Proceedings of the 36th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and 17th International Conference on Computational Linguistics, COLING-ACL'98, volume 2, pages 1243–1249, San Francisco, CA. ACL/ Morgan Kaufmann Publishers*.

- [Steels and Oudeyer, 2000] Steels, L. and Oudeyer, P.-Y. (2000). *The cultural evolution of syntactic constraints in phonology*. Dans Proceedings of the VIIIth Artificial life conference (Alife 7). MIT Press.
- [Stiner et al., 1999] Stiner, M. C., Munro, N. D., Surovell, T. A., Tchernov, E., and Bar-Yosef, O. (1999). *Paleolithic Population Growth Pulses Evidenced by Small Animals Exploitation*. Science, 283 :190–4.
- [Stockdale, 1807] Stockdale, J. (1807). The Collected Works of Sir William Jones III, *chapitre Troisième discours anniversaire : On the Hindus*, pages 23–46. London.
- [Stoneking and Wilson, 1989] Stoneking, M. and Wilson, A. (1989). The Colonization of the Pacific : A Genetic Trail, *chapitre Mitochondrial DNA*, pages 215–245. Oxford University Press, Oxford.
- [Stringer, 2000] Stringer, C. (2000). *Coasting out of Africa*. Nature, 405 :24–27.
- [Studdert-Kennedy, 1998] Studdert-Kennedy, M. (1998). Approaches to the Evolution of Language : Social and Cognitive Bases, *chapitre The particulate origins of language generativity : from syllable to gesture*, pages 202–220. Cambridge University Press.
- [Studdert-Kennedy, 2002] Studdert-Kennedy, M. (2002). *Vocal imitation, facial imitation, and the gestural origin of linguistic discrete infinity*. Dans Hurford, J. and Fitch, T., éditeurs, Proceedings of the Fourth Conference on the Evolution of Language, page 109.
- [Sur and Leamey, 2001] Sur, M. and Leamey, C. A. (2001). *Development and plasticity of cortical areas and networks*. Nature reviews, 2 :251–261.
- [Takahata et al., 1995] Takahata, N., Satta, Y., and Klein, J. (1995). *Divergence Time and Population Science in the Lineage Leading to Modern Humans*. Theoretical Population Biology, 48 :198–221.
- [Terrace, 2000] Terrace, H. S. (2000). *Serial Expertise and the Evolution of Language*. Dans The Evolution of Language, pages 154–155. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- [Terrace et al., 1979] Terrace, H. S., Petitto, L., Sanders, R., and Bever, T. (1979). *Can an Ape Create a Sentence ?* Science, 206 :891–902.
- [Thomason and Kaufman, 1991] Thomason, S. G. and Kaufman, T. (1991). Language Contact, Creolization, and Genetic Linguistics. University of California Press, Berkeley 94720.
- [Thorne et al., 1999] Thorne, A., Grun, R., Mortimer, G., Spooner, N., Simpson, J., McCulloch, M., Taylor, L., and Curnoe, D. (1999). *Australia’s oldest human remains : age of the Lake Mungo 3 skeleton*. Journal of Human Evolution, 36(6) :591–612.
- [Thorne, 1980] Thorne, A. G. (1980). The Cambridge encyclopaedia of archaeology, *chapitre The arrival of man in Australia*, pages 96–100. Cambridge : Cambridge University Press.
- [Thorne and Raymond, 1989] Thorne, A. G. and Raymond, R. (1989). Man on the Rim : The Peopling of the Pacific. Sydney : Angus and Robertson.
- [Thorne and Wolpoff, 1992] Thorne, A. G. and Wolpoff, M. (1992). *The multiregional evolution of humans*. Scientific American, 266 :76–83.
- [Trask, 1980] Trask, R. L. (1980). Historical Linguistics, *chapitre Chapitre 10 : The origin and propagation of change*, pages 285–297. Arnold, London.
- [Tsou et al., 1997] Tsou, B. K., Lin, H. L., Liu, G., Chan, T., Hu, J., Chew, C. H., and Tse, J. K. P. (1997). *A Synchronous Chinese Language Corpus from Different Speech Communities : Construction and Applications*. Computational Linguistics and Chinese Language Processing, 2(1) :91–104.

-
- [Turner, 2000] Turner, M. (2000). *Review of Leonard Talmy, Toward a Cognitive Semantics. Volume 1 : Concept Structuring Systems. Volume 2 : Typology and Process in Concept Structuring.* Cambridge : MIT Press. Language : Journal of the Linguistic Society of America.
- [Tzeng et al., 1994] Tzeng, O. J., Lü, C.-C., and Hung, D. L. (1994). Lexical diffusion : a neurolinguistic perspective, pages 551–560. Pyramid Press, Taipei, Taiwan.
- [Underhill et al., 2001] Underhill, P., Passarino, G., Lin, A., Shen, P., Mirazon Lahr, M., Foley, R., Oefner, P., and Cavalli-Sforza, L. (2001). The phylogeography of y chromosome binary haplotypes and the origins of modern human populations. *Annals of Human Genetics*, 65 :43–62.
- [Underhill et al., 2000] Underhill, P. A., Shen, P., Lin, A. A., Jin, L., Passarino, G., Yang, W. H., Kauffman, E., Bonn -Tamir, B., Bertranpetit, J., Francalacci, P., Ibrahim, M., Jenkins, T., Kidd, J. R., Mehdi, S. Q., Seielstad, M. T., Wells, R. S., Piazza, A., Davis, R. W., Feldman, M. W., Cavalli-Sorza, L. L., and Oefner, P. J. (2000). Y chromosome sequence variation and the history of human populations. *Nature Genetics*, 26(11) :358–361.
- [Vallée, 1994] Vallée, N. (1994). Systèmes vocaliques : de la typologie aux prédictions. *PhD thesis, Université Stendhal Grenoble.*
- [Van der Veen and Hombert, 2001] Van der Veen, L. and Hombert, J.-M. (2001). On the origin and diffusion of bantu : a multidisciplinary approach. Dans Proceedings of the 32nd Annual Conference on African Languages (ACAL 32), Berkeley, CA, page sous presse.
- [Victorri, 2000] Victorri, B. (2000). The role of narration in the emergence of human language. Dans Proceedings of the third Conference on the Evolution of Language, pages 241–244. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris.
- [Victorri et al.,   paraître] Victorri, B., François, J., and Manguin, J.-L. Points of comparison in linguistic theory : from morphology to discourse, *chapitre Dynamical construction of meaning in polysemic units (  paraître).*
- [Wallman, 1992] Wallman, J. (1992). Aping Language. Cambridge University Press, Cambridge.
- [Walter et al., 2000] Walter, R. C., Buffler, R. T., Bruggemann, J. H., Guillaume, M. M., Berhe, S. M., Negassi, B., Libsekal, Y., Cheng, H., Edwards, L., von Cosel, R., Neraudeau, D., and Gagnon, M. (2000). Early human occupation of the Red Sea Coast of Eritrea during the last interglacial. *Nature*, 405 :65–69.
- [Wang, 1969] Wang, W. S.-Y. (1969). Competing changes as a cause of residue. *Language*, 45 :9–25. reprinted in *Explorations in Language*, Pyramid Press, 3-19, 1991.
- [Wang, 1978] Wang, W. S.-Y. (1978). The three scales of diachrony. Dans Kachru, B., editor, *Linguistics in the Seventies*, pages 63–75. Department of Linguistics, University of Illinois, Paris.
- [Wang, 1991] Wang, W. S.-Y. (1991). *Explorations in Language.* Pyramid Press, Taiwan.
- [Wang, 2002a] Wang, W. S.-Y. (2002a). Computational studies of language evolution. 19th International Conference on Computational Linguistics (COLING), Taipei.
- [Wang and Chen, 1975] Wang, W. S.-Y. and Chen, M. (1975). Sound change : actuation and implementation. *Language*, 51 :255–281. reprinted in *Explorations in Language*, Pyramid Press, 3-19, 1991.
- [Wang, 2002b] Wang, X. F. (2002b). Complex networks : Topology, dynamics and synchronization. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 12(5) :885–916.

- [Weber, 2002] Weber, G. (2002). Lonely Islands : The Andamanese, an on-line Documentation by George Weber, *chapitre The Languages. The Andaman Association, Switzerland, www.andaman.org.*
- [Weisbuch and Stauffer, 2000] Weisbuch, G. and Stauffer, D. (2000). Hits and flops dynamics. *Physica A*, 287(3-4) :563–576.
- [Wernicke, 1874] Wernicke, K. (1874). Der aphasische Symptomencomplex. Eine psychologische Studie auf anatomischer Basis. *Breslau.*
- [Wertheimer, 1925] Wertheimer, M. (1925). Über gestalttheorie. [an address before the Kant Society, Berlin, 7th December, 1924], *Erlangen.*
- [Whitehouse et al., 2002] Whitehouse, P., Usher, T., Ruhlen, M., and Wang, W. S.-Y. (2002). *Kusunda : an indo-pacific language in Nepal.* en préparation.
- [Wilde, 1995] Wilde, O. (1995). Aphorismes. *Mille et une nuits.*
- [Wright, 1986] Wright, R. (1986). How old is zone F at Lake George ? *Archaeology in Oceania*, 21 :138–139.
- [Yang, 1999] Yang, C. D. (1999). Resource Logics and Minimalist Grammars. Workshop held at the 11th European Summer School in Logic, Language and Information (ESSLLI), Utrecht University, *chapitre A Formal Theory of Language Development. Christian retoré and edward stabler edition.*
- [Yang, 2000] Yang, C. D. (2000). Internal and external forces in language change. *Language Variation and Change*, 12(3) :231–250.
- [Zhivotovsky et al., 2000] Zhivotovsky, L. A., Bennett, L., Bowcock, A. M., and Feldman, M. W. (2000). Human population expansion and microsatellite variation. *Mol. Biol. Evol.*, 17(5) :757–67.
- [Zubrow, 1989] Zubrow, E. B. (1989). The Human Revolution, *chapitre The Demographic Modelling of Neanderthal Extinction*, pages 212–31. *University Press, Edinburgh.*