



HAL
open science

Changements sémantiques et cognition : Différentes méthodes pour différentes échelles temporelles

Jean-Philippe Magué

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Magué. Changements sémantiques et cognition : Différentes méthodes pour différentes échelles temporelles. Linguistique. Université Lumière - Lyon II, 2005. Français. NNT: . tel-00410044

HAL Id: tel-00410044

<https://theses.hal.science/tel-00410044>

Submitted on 16 Aug 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Lumière Lyon 2
Institut de Psychologie
École doctorale de Sciences Cognitives

Changements Sémantiques et Cognition
Différentes Méthodes pour Différentes
Échelles Temporelles

Thèse soutenue et présentée publiquement par

Jean-Philippe Magué

En vue de d'obtention du diplôme de
Docteur ès Sciences Cognitives, mention Sciences du
Langage

Le 25 novembre 2005

Jury :

Pr. Gérard Philippson	Président du jury
Dr. Martine Vanhove	Rapporteur
Dr. Bernard Victorri	Rapporteur
Pr. Jean-Marie Hombert	Directeur de thèse
Pr. Peter Koch	Examineur

Table des matières

<i>Introduction</i>	1
<i>Chapitre I: Changements sémantiques</i>	5
1.1 Michel Bréal	8
1.1.1 La science des significations	8
1.1.2 La classification de Bréal	9
1.1.3 Critiques de la classification de Bréal	14
1.2 Stephen Ullmann	17
1.2.1 Causes des changements sémantiques	17
1.2.2 Types de changements sémantiques	20
1.2.3 Conséquences des changements sémantiques	23
1.2.4 Critiques de la classification d'Ullmann	24
2.1 Trier : Évolution de la structuration des champs sémantiques	28
2.1.1 Structuralisme et champs sémantiques	28
2.1.2 Évolution du champ sémantique de la connaissance en alle- mand	29

TABLE DES MATIÈRES

2.1.3	Critique des travaux de Trier	31
2.2	Stern : Lois sémantiques	32
2.3	Williams : Adjectifs synesthétiques	35
2.4	Viberg : Verbes de perception	38
2.4.1	Changements sémantiques des verbes de perception	38
2.4.2	Les verbes de perception dans d'autres langues que celles étudiées par Viberg (1983)	40
3.1	Catégorisation	44
3.1.1	Conception classique des catégories	44
3.1.2	Ressemblance de famille	46
3.1.3	Structure des catégories et structure des taxonomies	48
3.1.4	La révolution roschienne	55
3.1.5	Deux interprétations possibles de la nouvelle vision des ca- tégories	57
3.2	Sémantique du prototype	59
3.2.1	Catégorisation et sémantique	59
3.2.2	Implications diachroniques	60
3.3	Linguistique cognitive	67
3.3.1	Structuration de notre système conceptuel	67
3.3.2	Changements sémantiques et métaphore conceptuelle	78
3.3.3	Métonymie	82

Chapitre II: Changements sémantiques et sociolinguistique variationniste

89

1.1	Martha's Vineyard	91
-----	-----------------------------	----

1.2	Hypothèse du temps apparent	94
2.1	Inférence de structures sémantiques	97
2.2	Matériel et méthode	98
2.2.1	Sujets	98
2.2.2	Synonymes	99
2.3	Résultats	102
2.3.1	Analyse des matrices M_i	102
2.3.2	Structure sémantique commune	102
2.3.3	Différences inter-générationnelles	104
2.4	Conclusion	109

Chapitre III: Changements sémantiques et linguistique évolutionnaire

113

1.1	Modèles à sémantique publique	116
1.2	Modèles à sémantique privée	119
1.2.1	Sémantique à catégories classiques	120
1.2.2	Sémantique à catégories prototypiques	123
1.3	Remarques conclusives	126
2.1	Architecture cognitive des agents	129
2.1.1	Théorie des ensembles flous	130
2.1.2	Modélisation de concepts par nombres flous	130
2.2	Structure de l'environnement	135
2.3	Structure de la population	136
2.4	Protocole des interactions	137
2.5	Modification de la structure conceptuelle	138

TABLE DES MATIÈRES

2.5.1	Modification des scores de confiance	139
2.5.2	Création de concepts	139
2.5.3	Modification des concepts	140
3.1	Mesures	143
3.2	Expérience 1	144
3.2.1	Succès et stabilité	144
3.2.2	Composition du lexique	146
3.3	Expérience 2 à 8	149
3.3.1	Succès et stabilité	150
3.3.2	Composition du lexique	151
3.4	Discussion	156
Chapitre IV: Petits mondes		161
1.1	Les ponts de Königsberg	165
1.2	Généralités sur les graphes	167
1.3	Caractérisation des graphes	168
1.4	Le modèle de graphes aléatoire d'Erdős et Rényi	170
1.4.1	Distribution de degrés	171
1.4.2	Coefficient de regroupement	173
1.4.3	Longueur caractéristique	173
1.4.4	Les graphes aléatoires comme modèle des réseaux naturels .	173
2.1	Nombre d'Erdős	175
2.2	Réseaux sociaux	176
2.2.1	Collaborations scientifiques	176
2.2.2	Collaborations cinématographiques	178

2.3	Réseaux technologiques	180
2.3.1	Web	180
2.3.2	Internet	182
2.3.3	Réseaux électriques	183
2.4	Réseaux biologiques	183
2.4.1	Réseaux métaboliques	183
2.4.2	Réseaux écologiques	184
2.4.3	Réseaux neuronaux	186
2.5	Caractéristiques des grands réseaux naturels	187
3.1	Graphes petits mondes	191
3.2	Graphes sans échelle	195
3.2.1	Le modèle de Barabási et Albert	195
3.2.2	Élaborations autour du modèle de Barabási et Albert	197
3.3	Modélisation des réseaux naturels	200
4.1	Réseaux anatomiques et réseaux fonctionnels	203
4.2	Réseaux de voxels	204
4.3	Construction du réseau	206
4.4	Propriétés du réseau fonctionnel cérébral	208
4.4.1	Coefficient de regroupement et longueur caractéristique	208
4.4.2	Distribution de degrés	208
4.5	Origines des propriétés du réseau extrait de <i>NeuroImage</i>	212
4.5.1	Graphes bipartites	213
4.5.2	Simulations numériques des propriétés des projections mono- partites de graphes bipartites	219

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre V: Changements sémantiques et réseaux lexicaux.	229
1.1 Réseaux construits à partir de ressources lexicographiques	232
1.1.1 Réseaux de dictionnaires	232
1.1.2 Réseaux de thésaurus	235
1.1.3 Wordnet	236
1.2 Réseaux construits à partir de productions de locuteurs	240
1.2.1 Réseaux construits à partir de tâches de libre association	241
1.2.2 Réseaux construits à partir de corpus	243
1.3 Conclusions	245
2.1 Introduction	249
2.2 Construction des réseaux	252
2.3 Analyse statistique des réseaux	255
2.3.1 Longueurs caractéristiques et coefficients de regroupement	255
2.3.2 Distributions de degrés	257
2.4 Analyse des évolutions sémantiques du chinois	258
2.4.1 Extraction du voisinage sémantique	260
2.4.2 Détermination des sens	264
2.4.3 Quantification des changements sémantiques	267
2.5 Conclusions	273
Conclusions	279
<i>Bibliographie</i>	287
Annexe 1: Questionnaire.	316

Annexe 2: From changes in the world to changes in the words . . . 319

Table des figures

1.1	Frontières linguistiques dans le spectre des couleurs en français et en gallois médiéval	29
1.2	Évolution du champ sémantique de la connaissance en allemand entre le début et la fin du 13 ^e siècle.	31
1.3	Transferts métaphoriques synesthétiques possibles. D’après Williams (1976).	37
1.4	Changements sémantiques des verbes de perception	40
1.5	Changements sémantiques des verbes de perception dans les langues Australiennes	41
1.6	Exemples de stimuli utilisés par Labov (1973)	51
1.7	Une des neuf taxonomies étudiées par Rosch, Mervis, David Johnson, & Boyes-Braem (1976)	53
1.8	Développements diachroniques de <i>vergrijpen</i>	64
2.1	Pourcentages de variance expliqués par les 10 premières composantes après l’ACP des réponses des sujets.	104

TABLE DES FIGURES

2.2	Structure sémantique commune. Chaque point correspond au barycentre de la position des mots des tous les sujets dans les 2 premières dimension de l'ACP.	105
2.3	Ellipse ajustant le mieux la position des mots dans l'espace sémantique commun.	106
2.4	Superposition des structures sémantiques des deux groupes	107
2.5	Pourcentages de variance expliquée par les 50 premières composantes après ACP des formes des structures sémantiques	108
3.1	Exemple d'arbre de discrimination. Chaque nœud représente un intervalle de la gamme de valeurs, et donc une catégorie.	121
3.2	Espace conceptuel bidimensionnel associé aux arbres de discrimination de deux canaux.	122
3.3	Un espace conceptuel bidimensionnel avant et après la création de nouveaux prototypes. D'après Vogt (2000)	124
3.4	Réponse d'un réseau à trois fonctions de base radiale définissant une catégorie. D'après Belpaeme (2002)	125
3.5	Exemple de fonction caractéristique d'un nombre flou	131
3.6	Fonction caractéristique d'un nombre flou définie par un ensemble d' α -coupes	133
3.7	Fonction caractéristique d'un nombre flou dans \mathbb{R}^2 définie par un ensemble d' α -coupes	134
3.8	Environnement des agents	136
3.9	Extension d'un concept	141
3.10	Affinement d'un concept	142

3.11	Expérience 1. Évolution du succès, et la stabilité	145
3.12	Expérience 1. Nombre de mots dans la population et nombre de mots connus par chaque agent	146
3.13	Expérience 1. Durée de vie des mots dans la population	147
3.14	Expérience 1. Mots en compétition	148
3.15	État final de l’environnement des agents lors des expériences 2, 3 et 4	150
3.16	Évolution du succès lors des expériences 2 à 8	152
3.17	Évolution de la stabilité lors des expériences 2 à 8	153
3.18	Représentation de la dynamique des lexiques lors des expériences 1 à 8	155
3.19	Synonymie lors des expériences 2 à 8	156
4.1	Plan de la ville de Königsberg	166
4.2	Graphe construit à partir des ponts de Königsberg	166
4.3	Deux représentations graphiques du même graphe	167
4.4	Graphes aléatoires construits selon le modèle d’Erdős et Rényi . . .	171
4.5	Distribution de degrés d’un graphe aléatoire	172
4.6	Loi de puissance et loi de puissance avec coupure exponentielle . .	179
4.7	Trois exemples de graphes réguliers	192
4.8	Graphes construits selon le modèle de Watts et Strogatz	192
4.9	Longueur caractéristique et coefficient de regroupement en fonction de la probabilité de rebranchement	194
4.10	Distribution des degrés du réseau fonctionnel cérébral	209
4.11	Distribution cumulative des degrés du réseau fonctionnel cérébral .	210

TABLE DES FIGURES

4.12	Ajustement de la distribution de degrés du réseau fonctionnel cérébral	211
4.13	Structure bipartite sous-jacente du réseaux fonctionnel cérébral construit.	213
4.14	Un graphe bipartite et ses deux projections monopartites	214
4.15	Distribution cumulative des degrés bas du graphe monopartite sous-jacent	216
4.16	Ajustement de la distribution cumulative des degrés bas du graphe monopartite sous-jacent	217
4.17	Ajustement de la distribution cumulative des degrés hauts du graphe monopartite sous-jacent	218
4.18	Longueurs caractéristiques des graphes aléatoires	220
4.19	Coefficients de regroupement des graphes aléatoires	221
4.20	Distribution des degrés de 100 graphes aléatoires	223
5.1	Sous-graphe de dictionnaire. D'après Gaume, Hathout, & Muller (2004)	233
5.2	Longueurs caractéristiques et coefficients de regroupement des réseaux étudiés par Sigman & Cecchi (2002)	239
5.3	Exemple de structure de dépendance	244
5.4	Similarités entre les réseaux étudiés	256
5.5	Distributions de degrés des 10 réseaux	259
5.6	Distributions des temps moyens de premier passage des 10 réseaux .	261
5.7	Distributions des temps moyens de premier passage pour les modèles de Barabasi et Albert, Erdos et Renyi, et Watts et Strogatz . .	262
5.8	Distributions des temps de premier passage moyens de marches aléatoires au départ et à l'arrivée d'un nœud arbitrairement choisi	263

TABLE DES FIGURES

5.9	Nombre de sens des morphèmes en fonction de leur fréquence . . .	268
5.10	Nombre de sens des morphèmes dans chaque paire de corpus consécutifs	269
5.11	Similarité sémantique des corpus en fonction de la durée de la période les séparant	270
5.12	Évolution du nombre de sens en fonction de la fréquence	271
5.13	Variation de la fréquence des morphèmes entre deux corpus consécutifs en fonction de la variation du nombre de leurs sens	272
5.14	Évolution du nombre de sens en fonction de la polysémie	272

Liste des tableaux

1.1	Les types de changements sémantiques dans la classification de Ullmann (1962/1967)	21
1.2	Paradigme des verbes de perception en anglais	39
1.3	Propriétés des catégories sémantiques d’après Geeraerts (1997)	61
1.4	Fréquence de l’ensemble des configurations présentant une déviation donnée, année par année. D’après Geeraerts (1997).	63
1.5	Gloses des labels de la figure 1.8.	65
2.1	Centralisation des diphtongues /aj/ et /aw/ par les habitants de Martha’s Vineyard en fonction de leur âge	92
2.2	Fréquences des synonymes de <i>maison</i>	100
2.3	Différences significatives entre les jugements des deux groupes	103
3.1	Matrice d’association entre sens et mots	117
3.2	Nombre d’interactions et début et fin de l’évolution de l’environnement dans les expériences 2 à 8	150

LISTE DES TABLEAUX

4.1	Caratéristiques des réseaux de collaboration scientifique d'après Newman (2001b)	178
5.1	Caratéristiques des réseaux lexicaux	247
5.2	Nombre de caractères recensés par des dictionnaires représentatifs de différentes périodes	251
5.3	Époque d'écriture et taille des corpus utilisés dans notre étude.	253
5.4	Nombre de nœuds et degré moyen des réseaux lexicaux issus des 10 corpus de chinois	254
5.5	Longueurs caractéristiques et coefficients de regroupement des réseaux lexicaux issus des 10 corpus de chinois	257

Introduction

N'avez-vous pas honte, messieurs,
de vous commettre ainsi dans cette
assemblée de vieilles tiges creuses,
rien dans la cafetière, tout dans la
coupole ?

Pierre Desproges

LA CONSULTATION du *Dictionnaire Historique de la Langue Française* (Rey, 1992) nous apprend que le mot *tête* "est issu du latin *testa* 'coquille' et 'carapace (de tortue)' d'où 'récipient en argile cuite ou en terre de potier', 'tuile' et 'tesson de tuile ou de poterie'. À basse époque, *testa* a pris par plaisanterie le sens de 'crâne' puis de 'boîte crânienne, tête'". Aujourd'hui le sens originel de "coquille" et "carapace (de tortue)" a complètement disparu. En sus de l'évolution phonologique qui a transformé *testa* en *tête*, ce mot a été l'objet d'un changement sémantique. La succession des étapes du changement : latin *testa*

LISTE DES TABLEAUX

"coquille, carapace" > français *tête* est caractéristique des changements sémantiques en général, qui peuvent être schématisés par le diagramme suivant :

$$\begin{array}{l} t_0 : M \rightarrow S_1 \\ t_1 : M \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} S_1 \\ S_2 \end{array} \right\} \\ t_2 : M \rightarrow S_2 \end{array}$$

À un instant t_0 de son histoire, un mot M porte un sens S_1 à partir duquel se développe un sens S_2 à un instant t_1 . L'étape finale est la perte du sens S_1 à un instant t_2 . Cette dernière n'est pas indispensable pour pouvoir parler de changement sémantique, l'étape cruciale étant le développement du sens S_2 à partir du sens S_1 . La polysémie est donc la manifestation synchronique des changements sémantiques.

Plutôt que de considérer qu'un changement sémantique intervient lorsqu'un mot change de sens, nous aurions pu adopter la posture converse et considérer qu'un changement sémantique intervient lorsqu'un concept vient à être associé à un nouveau mot. Ces deux postures, respectivement *sémasiologie* et *onomasiologie*, sont également légitimes. Néanmoins, l'immense majorité des recherches sur les changements sémantiques adopte une approche sémasiologique (Buck (1949) et Blank (2001) sont d'excellents contre exemples), et l'interrogation centrale qui motive ces recherches est : quelles relations entretiennent les sens S_1 et S_2 pour qu'un mot portant le sens S_1 soit l'objet d'un changement sémantique et vienne à porter le sens S_2 ?

L'étude scientifique des changements sémantiques peut se prévaloir d'une tradition vieille de plus d'un siècle et demi (Nerlich, 1992). Longtemps restées descriptives, les recherches sur les changements sémantiques ont vécu un tournant au

début des années 1980 avec l'avènement de la linguistique cognitive qui a offert un cadre théorique permettant d'aborder les changements sémantiques avec une optique explicative (Sweetser, 1990). Néanmoins, en dépit des évolutions théoriques, les procédés méthodologiques sous-tendant les études sur les changements sémantiques sont restés inchangés : analyse des manifestations synchroniques, c'est-à-dire de la polysémie à l'intérieur d'une langue ou des groupes de cognats à l'intérieur d'une famille linguistique, et, le cas échéant, recherche dans des corpus des développements sémantiques. L'objectif de cette thèse est de montrer que d'autres voies méthodologiques sont possibles. Nous en proposons trois, chacune s'appliquant à des profondeurs historiques différentes.

Le plan de ce manuscrit est le suivant : le premier chapitre est consacré à l'exposé d'un panorama des recherches passées et actuelles sur les changements sémantiques. Le second chapitre détaille une étude que nous avons menée et au cours de laquelle nous avons conjugué les concepts de la sociolinguistique variationniste avec des méthodologies issues de l'anthropologie quantitative afin d'observer un changement sémantique en cours de réalisation. Le troisième chapitre présente un modèle multi-agents dans la lignée de la linguistique évolutionnaire qui nous permet d'étudier des changements sémantiques se déroulant sur plusieurs générations de locuteurs. Enfin, les quatrième et cinquième chapitres sont consacrés à la quantification d'un certain nombre de facteurs des changements sémantiques, en nous appuyant sur des réseaux lexicaux construits à partir de corpus de chinois couvrant une période de 3000 ans. Plus spécifiquement, le quatrième chapitre introduit les notions sur les réseaux nécessaires à notre étude ; il se conclut par une parenthèse dans laquelle nous démontrons plusieurs propriétés du réseau de coactivation des aires cérébrales. Le cinquième décrit notre étude sur les corpus du chinois à proprement parler.

CHAPITRE I

Changements sémantiques

C E CHAPITRE dresse un panorama des recherches passées et actuelles sur les changements sémantiques. La naissance de l'étude scientifique des changements sémantiques coïncide avec l'avènement de la sémantique en tant que part de la linguistique au 19^e siècle. Celle-ci est alors encore une science jeune, et son approche est par essence diachronique. À l'image de la phonologie qui, à cette époque, se préoccupe uniquement de l'évolution de la forme des mots, la sémantique naissante se penche naturellement sur l'évolution de leurs sens. Les travaux de cette époque ont principalement abouti à diverses classifications des types de changements sémantiques. Nous y référerons par la suite sous le nom de tradition taxonomique. Particulièrement foisonnante au début du 20^e siècle, son déclin est marqué à partir des années 30. Néanmoins son apogée est postérieure à cette date, et correspond aux travaux de Ullmann (1951/1957, 1952/1965, 1962/1967)

représentant une grande synthèse de toute cette tradition. La première partie de ce chapitre lui est consacrée.

Le structuralisme saussurien, qui a établi la distinction entre diachronie et synchronie, a contribué au déclin de la tradition taxonomique en réorientant la sémantique vers la synchronie. Néanmoins, la notion d'interdépendance entre les éléments de langue qu'il postule aura contribué à un renouveau des recherches sur les changements sémantiques. Tandis que les taxonomistes focalisaient leur attention sur les changements de sens de mots pris isolément, s'est développé dans les années 70 un mouvement d'obédience typologique, qui a considéré les évolutions au sein de *champs sémantiques* et de manière trans-linguistique afin de dégager des universaux des changements sémantiques. La seconde partie de ce chapitre sera consacrée à ces travaux. Ils seront cependant précédés de l'exposé des travaux de Trier (1931) et de Stern (1931), deux précurseurs de l'étude diachronique des champs sémantiques.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre introductif sera consacrée à l'étude de travaux plus récents, affiliés à la linguistique cognitive. À la différence de ceux présentés dans les première et seconde parties qui restent descriptifs, ces travaux avancent des explications quant aux mécanismes cognitifs sous-tendant les changements sémantiques.

1 La tradition taxonomiste

Il est généralement reconnu d'accorder la paternité de la sémantique au philologue allemand Christian Karl Reisig (Nerlich, 1992 ; Gordon, 1982). En effet, lors des cours qu'il dispensa dans les années 1820, il plaida en faveur d'une *sémasiologie*, ou science des significations, qui viendrait compléter la grammaire traditionnelle, alors cantonnée à l'étude de la forme des mots, l'*étymologie* (qui correspond, en termes d'aujourd'hui, à ce qui va de la phonétique/phonologie à la morphologie), et à l'étude de l'articulation des mots entre eux, la *syntaxe*. À l'image de la linguistique du 19^e siècle, la proposition de Reisig est essentiellement diachronique :

Si nous pouvions mettre en avant un certain nombre de principes qui démontreraient le développement du sens et l'usage d'un certain nombre de mots, une autre partie intégrale de la grammaire émergerait, la science du sens, ou sémasiologie.

(Reisig, 1839, p. 18–19 ; cité par Nerlich, 1992)

Les principes généraux qui gouvernent les changements de sens que Reisig appelle de ses vœux pieux, ont constitué la pierre philosophale de tous les sémanticiens diachroniciens jusqu'à aujourd'hui. Il faudra attendre le Français Michel Bréal et son *Essai de Sémantique* en 1897 pour avoir une première proposition marquante des dits principes. Ce faisant, il ouvre le bal de toute une série de classifications des changements sémantiques, de leurs mécanismes et de leurs causes, qui culminera dans les années 1950 avec les travaux du Suédois Stephen Ullmann.

1.1 Michel Bréal

1.1.1 La science des significations

Si Reising fut l'instigateur de la sémiologie allemande, Bréal a été le fondateur de la sémantique française. Les motivations qui poussèrent Bréal à proposer un nouveau champ d'étude – méritant un nouveau nom, c'est en effet à lui que l'on doit le terme *sémantique* – sont sensiblement comparables à celles de Reising : le constat de l'oubli de tout un pan de la nature du langage – le sens – dans son étude :

L'étude où nous invitons le lecteur est d'espèce si nouvelle qu'elle n'a même pas encore reçu de nom. En effet, c'est sur le corps et la forme des mots que la plupart des linguistes ont exercé leur sagacité : les lois qui président à la transformation des sens, au choix d'expressions nouvelles, à la naissance et à la mort des locutions, ont été laissées dans l'ombre ou n'ont été indiquées qu'en passant. Comme cette étude, aussi bien que la phonétique et la morphologie, mérite d'avoir son nom, nous l'appellerons la SÉMANTIQUE (du verbe *σημαίνω*), c'est-à-dire la science des significations. (Bréal, 1883/1995, p. 273)

Ce que Bréal entend par *sémantique* diffère de son acception actuelle ; le mot 'sémantique' lui-même a subi un changement sémantique. Comme la sémasiologie de Reising et l'ensemble de la linguistique pré-saussurienne, la sémantique de Bréal est un programme d'essence diachronique. Mais surtout, dans l'idée de Bréal, la sémantique correspond à l'ensemble des éléments convoyant les bases de la compréhension lors de la communication linguistique. Elle recouvre donc des phénomènes qui, selon l'économie actuelle de la linguistique, seraient désignés comme non seulement sémantiques, mais aussi syntaxiques ou morphologiques (Nerlich, 1992). Il ne faut pas dès lors se trouver surpris par le titre, *Comment s'est formée la syntaxe*, de la troisième partie de son *Essai de sémantique*. Néanmoins, la séman-

tique lexicale, bien qu'elle ne soit jamais nommée comme telle dans ses écrits, est l'une des préoccupations majeures de Bréal, et c'est cet aspect de son œuvre que nous allons développer.

L'objectif affiché par Bréal lors de l'établissement de la sémantique n'est pas de partir à la recherche du sens premier des mots, comme le fait la grammaire comparée qui cherche à reconstruire des états de langue anciens. Plutôt qu'historique, la démarche de Bréal est psychologique : à la différence de bien de ses contemporains, qui usent et abusent de métaphores darwinistes, assimilant langues et mots à espèces et organismes, appliquant aux premiers les mécanismes évolutifs des seconds, Bréal insiste sur le caractère psychologique du langage et voit la sémantique comme une démarche cherchant à expliciter les "*lois intellectuelles*" – on dirait aujourd'hui lois cognitives – qui guident l'évolution des sens.

On a appelé le langage un organisme, mot creux, mot trompeur, mot prodigué aujourd'hui, et employé toutes les fois qu'on veut se dispenser de chercher les vraies causes. Puisque d'illustres philologues ont déclaré que l'homme n'était pour rien dans l'évolution du langage, [...] il m'est apparu utile d'avoir enfin raison de ces affirmations et d'en finir avec ces fantasmagories. (Bréal, 1897/1924, p. 255)

Je ne crois pas cependant me tromper en disant que l'histoire du langage, ramenée à des lois intellectuelles, est, non seulement plus vraie, mais plus intéressante : il ne peut être indifférent pour nous de voir, au-dessus du hasard apparent qui règne sur la destinée des mots et des formes du langage, se montrer des lois correspondant chacune à un progrès de l'esprit. (*ibid.*, p. 257–258)

1.1.2 La classification de Bréal

Cette approche psychologique de la sémantique a conduit Bréal (1897/1924) à distinguer dix types de changements sémantiques : les quatre tendances des mots

que sont la péjoration, la mélioration, l'affaiblissement et le nivellement, puis la restriction et l'élargissement de sens, la métaphore, l'épaississement de sens, le raccourcissement et la contagion. Nous allons à présent passer en revue ces différents types de changements sémantiques.

Les tendances des mots

Bréal distingue quatre "*prétendues*" tendances auxquelles sont soumis les mots.

Péjoration La tendance péjorative est celle par laquelle les mots sont conduits à prendre des connotations négatives. Bréal cite, entre autres, l'exemple suivant : latin *mentire* "imaginer" > "mentir". L'explication avancée par Bréal pour justifier la péjoration est "*une disposition très humaine qui nous porte à voiler, à atténuer, à déguiser les idées fâcheuses, blessantes ou repoussantes*" (*ibid*, P. 100). Par pro-pension à l'euphémisme, nous utilisons, pour désigner le choquant, des mots sans connotation particulière, qui, à force, subissent une péjoration.

Mélioration La tendance inverse est décrite par Bréal sous le nom de mélioration. Il propose comme exemple : anglais *smart* "tranchant, pointu, douloureux" > "vif, spirituel". S'étendant peu sur la mélioration, Bréal invoque comme justification que "*[l]a politesse a ses raffinements singuliers, l'affection a de curieux détours qui font que des termes à signification défavorable perdent ce qu'ils avaient de fâcheux. L'amitié, comme si elle était en peine d'adjectifs appropriés, change le blâme en éloge et fait du reproche une louange plus savoureuse*" (*ibid*, p.102).

Affaiblissement La tendance à l'affaiblissement se pose aussi en opposition à la péjoration. Alors que cette dernière est due à l'utilisation, par euphémisme, de mots

peu marqués pour se référer à des choses négativement marquées – acquérant par là-même cet aspect négatif –, l'affaiblissement est dû à l'utilisation, par exagération, de mots très marqués pour des choses peu marquées, conduisant ces mots à un affaiblissement de leur marque. Un des exemples de Bréal est : français *tourmenter* "supplicier, torturer" > "tracasser, préoccuper".

Nivellement Enfin, la dernière tendance identifiée par Bréal est le nivellement, du fait duquel les mots changent de registre :

Herr, en allemand, était un titre réservé aux gentilshommes : c'est le comparatif d'un ancien adjectif signifiant «élevé». La chambre des seigneurs à Berlin s'appelle encore *das Herren Haus*. Mais ce titre n'est pas plus magnifique aujourd'hui qu'en français celui de *Monsieur*.

(*ibid*, p. 104)

Restriction et élargissement de sens

Restriction et élargissement de sens sont deux phénomènes que Bréal attribue à la même cause :

Un fait qui domine toute la matière, c'est que nos langues, par une nécessité dont on verra les raisons, sont condamnées à un perpétuel manque de proportion entre le mot et la chose. L'expression est tantôt trop large, tantôt trop étroite.

(*ibid*, p.107)

Restriction de sens La restriction de sens est, selon Bréal, la conséquence de l'existence dans les langues de mots au caractère général, pouvant être employés dans des situations particulières. "*Si, pour une cause quelconque, le mot vieillit dans toutes ses acceptions, sauf une seule, il s'en va aux âges futurs avec la valeur unique qui lui est restée*" (p.111). Par exemple : latin *fenum* "produit" > "foin", de son usage par les paysans.

Élargissement de sens L'élargissement de sens est donc le phénomène inverse de la restriction, par lequel les mots ont tendance à se doter d'un sens plus large que celui qu'ils ne possédaient. Tandis que Bréal attribue les causes de la restriction aux conditions d'utilisation des langues, l'élargissement trouve ses causes dans les "événements de l'histoire (*ibid*, p. 117) : français *gain* "récolte agricole" > "profit, bénéfice". Au fur et à mesure que des activités autres que l'agriculture ont pris de plus en plus d'importance, le sens de *gain* s'est élargi.

Métaphore

La métaphore est, nous le verrons par la suite, un élément fondamental des changements sémantiques, et Bréal ne manque pas de la reconnaître comme telle en mentionnant "*combien la langue en est pleine*" (*ibid*, p. 125). Non spécifiquement définie par Bréal qui en accepte la définition rhétorique classique, la métaphore confère à un mot un nouveau sens en vertu de l'analogie structurelle entre ses nouveau et ancien sens : "*La vue d'une similitude entre deux objets, deux actes, la fait naître*" (*ibid*, p. 124).

Parmi la multitude d'exemples fournis par Bréal dans son exposé sur la métaphore en tant que mécanisme de changement sémantique, les tous premiers, illustrant "*comment le peuple romain nomme ce qui est bon et ce qui est mauvais*", sont les plus intéressants. Sans le dire explicitement, il montre comment on s'exprime sur l'abstrait et le subjectif, à partir du concret et du perceptif, anticipant ainsi de près d'un siècle les propos de Lakoff & Johnson (1980) que nous détaillerons à la section 3.3.1 :

Ce qui est bon : c'est ce qui va droit et en mesure (*recte atque ordine*¹),

¹(sic) ; *recte atque ordine* : avec droiture et ordre ; correctement et dans l'ordre.

ce qui est plein et a du poids (*integer, gravis*¹). Mais la légèreté est un mauvais signe (*levis, vanus, nullius momenti*²). Ce qui est de travers devient le symbole de toute perversité (*pravus*³). L'intelligence est comme une pointe qui pénètre (*acumen*⁴), mais la sottise ressemble à un couteau émoussé (*hebes*⁵) ou un plat qui manque de sel (*insulsus*⁶).
(*ibid*, p. 125)

Bréal insiste aussi sur "*une espèce de métaphore, extrêmement fréquente dans toutes les langues*" (*ibid*; p. 131), qui repose sur la transposition d'une expérience sensorielle sur une autre, comme par exemple "*transporter à l'ouïe des sensations éprouvées par la vue, ou au goût les idées que nous devons au toucher*" (*ibid*, p. 132). Ce type de métaphores a été depuis étudié en détail (voir section 2.3).

Épaississement de sens

L'épaississement de sens désigne, chez Bréal, le processus par lequel des mots au référent abstrait viennent à désigner des objets concrets. Bréal cite l'exemple du latin *mansio*, qui référait originellement à l'action de s'arrêter, qui a pris le sens de "auberge, gîte d'étape" (l'endroit où l'on s'arrête) avant de donner le français *maison*

Raccourcissement

Le raccourcissement est le nom donné par Bréal à l'ellipse, ou plutôt à sa conséquence : le processus par lequel, lorsque deux mots sont fréquemment associés, si

¹*integer* : plein, non entamé ; intègre. *gravis* : lourd ; grave, digne, noble.

²*levis* : léger ; sans importance, superficiel. *vanus* : vide ; sans fondement, mensonger, vaniteux. *nullius momenti* : sans importance.

³*pravus* : tordu ; défectueux, mauvais.

⁴*acumen* : pointe ; subtilité, finesse.

⁵*hebes* : émoussé ; sans vivacité, sans finesse, obtus.

⁶*insulsus* : insipide, sans sel ; sot, niais.

l'un vient à être omis régulièrement, l'autre absorbe son sens. Par exemple lat. *novella* "nouvelle" > "jeune vigne", par omission de *vitis* dans le syntagme *novella vitis*, "la nouvelle vigne". Bréal cite encore comme exemple qu'"à Versailles, le lever était le lever du roi".

Contagion

Contagion est le terme employé par Bréal pour le principe selon lequel la cooccurrence répétée de deux mots peut conduire à l'absorption (d'une partie) du contenu sémantique de l'un par l'autre. L'exemple employé par Bréal pour illustrer son propos est celui de la négation en français : initialement la négation était portée uniquement par *ne*. Les mots *pas*, *point*, *rien*, *personne*, ..., ont servi à renforcer et nuancer la négation, jusqu'à l'incorporer complètement, le *ne* étant fréquemment omis en français oral.

1.1.3 Critiques de la classification de Bréal

La classification des changements sémantiques établie par Bréal est, on l'a vu, la première à avoir été proposée. En ce sens, elle revêt une importance particulière : elle a ouvert la voie vers l'établissement de taxonomies toujours plus précises, étape linnéenne indispensable avant d'aborder une étude plus poussée de tout phénomène. La classification bréalienne, ainsi que la démarche qui l'y a conduit, est par ailleurs anticipatrice en plusieurs aspects de travaux qui lui sont postérieurs, préfigurant en particulier le cheminement et les résultats de la grammaire cognitive, notamment dans les apports de celle-ci à l'étude des changements sémantiques.

En premier lieu, il nous paraît primordial de souligner, une fois de plus, la vo-

lonté affichée par Bréal de faire de la sémantique une science visant à expliciter les "lois intellectuelles", ou les mécanismes cognitifs dans un vocabulaire plus actuel, expliquant les phénomènes linguistiques observés. Cette orientation allait à contre courant de la mouvance d'alors qui tendait à conceptualiser les langues comme des organismes autonomes soumis à une évolution dont les mécanismes leur sont propres. Cette orientation psychologique, incarnée aussi par quelques uns de ses contemporains et surtout par nombre de ses successeurs (voir Geeraerts (1991), qui cite, entre autres, Darmesteter (1887), Wundt (1900) – initiateur de la psychologie expérimentale – et Stern, 1931), sera abandonnée suite aux avènements du structuralisme saussurien puis du générativisme chomskien en linguistique, et du behaviorisme en psychologie. Le premier, qui pose la langue comme objet d'étude autonome, exclut tout recours au psychologique dans les explications des phénomènes linguistiques. Le second, adjoignant à l'autonomie de la langue la consécration de la syntaxe et du synchronisme, laisse ainsi bien peu de place à une sémantique diachronique. Enfin le dernier, né en réaction à la psychologie expérimentale de Wundt, refuse dans l'élaboration d'une théorie psychologique, l'invocation de toute entité mentale, car réputées inobservables, au profit des comportements, qui sont, eux, observables. Le behaviorisme écarte de fait la possibilité d'assimiler le sens à un objet mental, et de là-même, de caractériser la sémantique en termes psychologiques. La linguistique cognitive, réintroduisant une composante psychologique dans le langage, referme une parenthèse anti-psychologique et propose à nouveau, avec des méthodes et des concepts renouvelés, un paradigme qui la précédait d'un siècle.

Le second point de la classification de Bréal qui nous paraît être indice d'une intuition d'une finesse remarquable, est le traitement proposé par Bréal de la métaphore. Sans doute ce second point découle-t-il du premier : la réidentification de

la sémantique à la psychologie par la linguistique cognitive repose, en partie, sur un recentrage de la métaphore au cœur de la cognition. Reprenons à nouveau les propos de Bréal sur la métaphore, déjà cités ci-dessus : "*La vue d'une similitude entre deux objets, deux actes, la fait naître*" (p. 124). Pour Bréal, la métaphore est une conséquence automatique de la perception, elle est des lois intellectuelles qu'il aspire à déchiffrer.

Si être la première est un mérite pour la classification de Bréal, il ne faut pas pour autant en négliger les conséquences malheureuses. Bréal n'a pu éviter les écueils inhérents aux premières esquisses. Sa classification est imprécise, les catégories se recoupent et les phénomènes qu'elles regroupent apparaissent comme appartenant à des niveaux différents. La métaphore lat. *pravus* : "tordu" > "mauvais" n'est-elle pas une péjoration ? À l'opposé, lat. *integer* : "plein" > "intègre" n'est-elle pas une mélioration ? Pourquoi dire de ang. *smart* : "tranchant" > "spirituel" que c'est une mélioration tout en classant lat. *acumen* : "pointe" > "finesse" dans les métaphores, les deux cas semblant pourtant similaires ? De même, bien que Bréal s'en défende, il est possible de voir dans les raccourcissements des restrictions ou des élargissement de sens. Par ailleurs, la distinction entre contagion et raccourcissement semble obscure. Enfin, les argumentations qu'il propose sur la péjoration et la mélioration sont plus sociales que psychologiques.

Première tentative, la classification de Bréal, ne demandait qu'à être raffinée et améliorée. Les propositions alternatives ont été nombreuses (Nerlich, 1992), et nous ne nous arrêterons que sur la dernière, apogée de cette tradition, celle(s) de Ullmann.

1.2 Stephen Ullmann

L'œuvre d'Ullmann (1951/1957, 1952/1965, 1962/1967) se pose comme une synthèse de l'ensemble des travaux de sémantique en général, et de sémantique diachronique en particulier, qui l'ont précédée (Nerlich, 1992 ; Blank, 1999). En ce qui concerne la sémantique diachronique, Ullmann représente la quintessence de la tradition taxonomique des changements sémantiques et, de ce fait, la classification qu'il a établie a longtemps été considérée comme la référence en la matière.

La classification d'Ullmann est plus qu'une simple classification des types de changements sémantiques telle que celle de Bréal. En effet, il distingue les causes de changements sémantiques, les types de changements à proprement parler, et leurs conséquences.

1.2.1 Causes des changements sémantiques

Ullmann identifie six classes de causes pouvant provoquer un changement sémantique : les causes linguistiques, historiques, sociales, psychologiques, l'influence étrangère et le besoin d'un nouveau nom.

Causes linguistiques

Les causes linguistiques, historiques et sociales reconnues par Ullmann découlent directement des travaux de Meillet (1905). Ullmann regroupe sous le vocable *causes linguistiques* ce que Bréal désignait par *contagion*. Un mot change de sens sous l'effet d'une cause linguistique lorsque, suite à sa cooccurrence répétée avec un autre mot, il en absorbe une partie du sens.

Causes historiques

Les causes historiques entraînent des changements sémantiques du fait, paradoxalement, du conservatisme des langues par rapport à d'autres champs culturels. Ces causes interviennent lorsqu'il y a évolution des artefacts, des institutions, des idées ou des concepts scientifiques (Ullmann ne semblant pas considérer cette liste comme exhaustive) de manière concomitante avec le maintien du mot pour désigner l'objet en évolution. Par exemple le mot ang. *car* "voiture", provient de lat. *carrus* "chariot". L'évolution technologique des moyens de transport, couplée à la conservation de *carrus* > *car* entraîne un changement sémantique. Nous avons étudié les mécanismes associés à ce type de causes (Magué, 2005) ; ces résultats seront exposés au Chapitre III.

Causes sociales

Ces causes rassemblent les cas d'appropriation d'un mot par une partie spécifique d'une communauté linguistique, ou, au contraire, d'adoption par l'ensemble de la communauté d'un mot auparavant d'usage restreint. Le premier cas est illustré par Ullmann avec, entre autre, lat. *ponere* "placer, poser" > fr. *pondre*, du fait de son utilisation agricole. C'est le type de cause invoqué par Bréal pour motiver les restrictions de sens. Il est rejoint par Ullmann qui, explicitement, attribue comme conséquence à ce phénomène une spécialisation du sens.

Pour éclaircir son propos sur l'expansion à l'ensemble d'une communauté d'un mot à l'usage initialement confiné, Ullmann propose parmi ses exemples ang. *lure* "assemblage de plumes utilisé par les fauconniers pour rappeler leurs faucons" > "leurre". Ullmann voit dans ces expansions d'usage la cause des extensions de sens,

là où Bréal invoquait des causes historiques.

Causes psychologiques

Les causes psychologiques avancées par Ullmann sont celles directement imputables aux locuteurs. Outre les dispositions à détecter des similarités déjà soulignées par Bréal, Ullmann s'étend particulièrement sur deux caractéristiques psychologiques grandes pourvoyeuses de changements sémantiques : les facteurs émotionnels et les tabous.

Ullmann utilise le terme de facteurs émotionnels en référence à la théorie des "métaphores dominantes", d'inspiration freudienne, exposée par H. Sperber (1923). Selon celle-ci, les domaines émotionnellement saillants ont tendance à être source et cible de métaphores. Par exemple, pendant la première guerre mondiale, l'argot des poilus était influencé par ce qui avait trait aux armes, aussi bien en tant que source de métaphores (*mitrailleuse à gosses*, pour une femme ayant beaucoup d'enfants) qu'en tant que cible (*cuisine à roulette* pour tank).

Les tabous entraînent des changements sémantiques qui appellent à être étudiés sous un angle onomasiologique :

[Le tabou] impose un bannissement non seulement de certaines personnes, animaux ou choses, mais aussi de leur nom. Dans la plupart des cas, sinon dans tous, le mot tabou va être abandonné, et un substitut anodin, un euphémisme, va être introduit pour combler le manque. Cela va souvent conduire à un ajustement du sens du substitut, et de cette façon le tabou est une cause importante de changements sémantiques ¹.
(Ullmann, 1962/1967, p. 205)

Ullmann distingue trois classes de tabous, selon leur motivation psychologique : les tabous de superstition (*Seigneur* pour *Dieu*), les tabous de délicatesse (*non-voyant*

¹Notre traduction.

pour *aveugle*) et les tabous de bienséance (*faire pour déféquer*).

Influence étrangère

Un changement sémantique peut être l'imitation d'un changement déjà réalisé dans une autre langue. Par exemple, jusqu'à la fin du 19^e siècle, le verbe fr. *réaliser* avait comme unique sens "accomplir, achever". Parallèlement, le verbe ang. *realize* avait acquis le sens de "comprendre, se rendre compte". Ce changement en anglais a alors été emprunté de l'anglais par le français.

Besoin d'un nouveau nom

Enfin, la dernière cause de changements sémantiques identifiée par Ullmann est l'apparition d'un nouvel objet ou d'une nouvelle idée et la nécessité qui en découle de le ou la nommer. À cette fin, trois stratégies sont possibles : créer un nouveau mot, l'emprunter dans une langue étrangère, ou bien utiliser un mot existant de la langue, imposant alors à celui-ci un changement sémantique.

1.2.2 Types de changements sémantiques

Les causes identifiées par Ullmann sont autant de déclencheurs de processus selon lesquels un mot va acquérir un sens nouveau. Ces processus sont d'une grande variabilité, à l'intérieur de laquelle Ullmann reconnaît, à la suite de Roudet (1921) et de Gombocz (1926) quatre classes de changements sémantiques : la métaphore ou similarité de sens, la métonymie ou contiguïté de sens, l'étymologie populaire ou similarité de forme, et l'ellipse ou contiguïté de forme. Elles peuvent être schématiquement représentées par le Tableau 1.1.

	Similarité	Contiguïté
Sens	Métaphore	Métonymie
Forme	Étymologie populaire	Ellipse

Tableau 1.1 – Les types de changements sémantiques dans la classification de Ullmann (1962/1967)

Métaphore

Comme Bréal, et l'immense majorité des sémanticiens qui se sont attelés à l'établissement de classifications, Ullmann reconnaît à la métaphore une place d'importance parmi les différentes options offertes pour le déroulement d'un changement sémantique. Les changements par métaphore opèrent sur la base de la ressemblance entre le sens original et le sens nouveau. Ullmann définit la métaphore comme la désignation d'une notion (la cible) par une autre (la source) en conséquence du fait que "*par un acte d'assimilation aperceptive, on conjugue les deux notions en vertu de ce qu'elles ont en commun et l'on fait abstraction des différences*" (1951/1957, p. 278). Ullmann mentionne quatre types de métaphores récurrentes :

- Les métaphores anthropomorphiques, pour lesquelles les parties du corps constituent (le plus souvent) la source (une *bouche* de métro, la *tête* du cortège) ; les parties du corps peuvent néanmoins être aussi la cible de ces métaphores (la *pomme* d'Adam) ;
- Les métaphores animalières, qui ont comme source le règne animal et qui prennent pour cible des objets inanimés (*chien* de fusil) ou les Hommes (*rusé comme renard*) ;

- Les métaphores qui ont pour source le concret et pour cible l'abstrait (*brillant* "lumineux, étincelant" > "doué");
- les métaphores synesthétiques, dont la source et la cible sont des domaines perceptifs (une voix *chaude*).

Métonymie

Les métonymies sont les changements sémantiques reposant sur la contiguïté du sens initial et du sens nouveau. Ullmann propose une classification, non exhaustive, des types de contiguïté pouvant sous-tendre une métonymie :

- Les métonymies basées sur une relation spatiale, le nouveau sens étant spatialement contigu au premier (lat. *coxa* "hanche" > fr. *cuisse*).
- Les métonymies basées sur une relation temporelle, le mot désignant un événement venant à être utilisé pour quelque chose précédant ou suivant l'événement (fr. *collation* "conférence du soir des moines" > "repas suivant la conférence")
- Les métonymies allant de la partie vers le tout (fr. *blouson noir* "vêtement" > "personne qui porte le vêtement", ou encore fr. *clocher* > "village").
- Les métonymies de type inventeur / invention ou découvreur / découverte (*ampère* d'après André Ampère).

Sans les identifier, Ullmann rapporte la métonymie à l'épaississement de sens de Bréal, du fait que les métonymies, à l'inverse des métaphores, auraient tendance à associer un sens concret à un mot auparavant pourvu d'un sens abstrait (fr. *addition* "opération arithmétique" > "note du restaurant").

Étymologie populaire

L'étymologie populaire est le mécanisme selon lequel les locuteurs d'une langue réinterprètent la structure morphologique d'un mot, pouvant conduire dans certains cas à un changement de la forme (Fr *unicorne* > *une icorne*, puis *l' icorne* > *li-corne*), et dans d'autres, à un changement de sens (lat. *foris* "en dehors" > fr. *forain*. Initialement, *marchand forain* signifiait donc "marchand sans boutique, marchand ambulant". Parallèlement, lat. *feria* "vacances, repos, loisir" > fr. *foire*. La similarité phonologique entre *forain* et *foire*, conjuguée à la présence de marchands ambulants dans les foires a conduit à fr. *forain* "marchand ambulant" > "personne itinérante qui exerce son activité dans des foires".)

Ellipse

L'ellipse est le phénomène décrit par Bréal sous le vocable de *raccourcissement* par lequel lorsque deux mots sont fréquemment apposés, l'un tend à absorber le sens du syntagme (un *journal quotidien* > un *quotidien*).

1.2.3 Conséquences des changements sémantiques

Après avoir donné des classifications des causes de changement sémantique et de leurs mécanismes, Ullmann en propose une classification des conséquences. Ces conséquences, au nombre de quatre, étaient déjà présentes chez Bréal : deux concernent la portée du sens, qui peut subir soit une extension, soit une restriction ; les deux autres concernent la connotation : la péjoration et l'amélioration.

1.2.4 Critiques de la classification d'Ullmann

La classification proposée par Ullmann est l'aboutissement de plus de trois quarts de siècle de réflexions à propos de l'organisation à donner aux phénomènes de changements sémantiques. En choisissant de présenter la classification de Bréal, la première à avoir été proposée, et celle de Ullmann, l'apogée de cette tradition taxonomiste, nous avons souhaité mettre en lumière le parcours intellectuel effectué. Depuis la classification de Bréal, hétéroclite, mélangeant causes, processus et conséquences, les distinctions avancées se recoupant parfois et ne semblant pas toujours pertinentes, la progression suivie par plusieurs générations successives de sémanticiens a permis d'aboutir au système structuré d'Ullmann. Il ne faut néanmoins partir de celui-ci pour définitif et indiscutable. S'il est demeuré une référence pendant plusieurs décennies¹, le renouveau des études en sémantique diachronique, d'orientation résolument cognitive, opéré depuis un quart de siècle, tend, sinon à l'abandonner, tout du moins à le remettre en question, en particulier pour les causes et les processus.

La typologie des causes de changements sémantiques proposée par Ullmann a été l'objet d'une analyse critique par Blank (1999) qui lui reproche d'être "*une collection éclectique de motivations* [le terme pour 'cause' dans la terminologie de Blank], *conditions nécessaires et d'éléments accessoires*"² (p. 66). Si Blank reconnaît des causes véritables dans les *causes sociales* et *causes psychologiques* de Ullmann, il conteste plus ou moins fermement les autres éléments de la classification. Bien que Blank admette que les *causes historiques* et le *besoin d'un nouveau nom* puissent être causes de changements sémantiques, il y voit les deux pôles d'un même

¹Blank (1999) se risque à dater aux années 1990 le déclin de l'importance d'Ullmann

²Notre traduction.

phénomène, argumentant qu'une évolution technologique, institutionnelle ou autre, produit un nouvel objet, donc un nouveau concept, pour lequel un nom est nécessaire (une position similaire est défendue par Geeraerts, 1997). Par ailleurs, le *besoin d'un nouveau nom* est, selon Blank, la cause réelle des changements pour lesquels Ullmann invoque l'*influence d'une langue étrangère*. L'imitation d'un changement sémantique n'est que l'une des stratégies possibles en cas de besoin d'un nouveau nom, et est donc à mettre aux côtés des autres stratégies évoquées par Ullmann (Section 1.2.1 : la création d'un nouveau mot, l'emprunt lexical et le changement sémantique (mais l'argument de Blank ne rend pas compte de l'exemple de Ullmann fr. *réaliser* "accomplir" > "comprendre"). Enfin, Blank se refuse à voir dans les *causes historiques* de Ullmann de réelles causes de changements sémantiques, considérant les cooccurrences comme des conditions nécessaires aux ellipses, ces dernières restant déclenchées pour d'autres raisons.

Ullmann reconnaît lui-même qu'un changement sémantique peut appartenir à plusieurs des quatre classes qu'il propose, citant comme exemple *un Picasso* pour *une peinture de Picasso*. Dans ce cas, on a affaire, selon Ullmann, à un changement 'composite', étant donné qu'il s'agit à la fois d'une ellipse et d'une métonymie. On peut cependant argumenter qu'il s'agit uniquement d'une métonymie. Le trouble provient du fait même d'avoir intégré l'ellipse à la classification. En effet, celle-ci implique une appréhension onomasiologique du changement, alors que les autres classes impliquent une appréhension sémasiologique. Si l'exemple ci-dessus semble appartenir à deux classes différentes, ce n'est donc pas parce qu'il est de nature 'composite', mais parce qu'il peut être considéré simultanément onomasiologiquement ("*une peinture de Picasso*" : *une peinture de Picasso* > *un Picasso*) et sémasiologiquement (*Picasso* : "*le peintre Picasso*" > "*une peinture de Picasso*").

D'autre part, parmi les quatre types de changements sémantiques qu'il distingue, Ullmann reconnaît une importance supérieure à la métaphore et à la métonymie, qu'il place au cœur même du langage : "*une langue sans ellipse ni étymologie populaire serait un moyen de communication parfaitement adéquat, alors qu'une langue sans métaphore ni métonymie est inconcevable : ces deux forces sont inhérentes à la structure basique de la parole humaine*"¹ (Ullmann, 1962/1967, p. 223). La linguistique cognitive qui, encore une fois, sous-tend la plupart des recherches actuelles en sémantique diachronique, avance des positions proches de cette dernière assertion. Encore plus fermement qu'Ullmann, elle perçoit métaphore et métonymie comme deux éléments centraux non seulement du langage, mais surtout de la cognition en général (section 3.3.1). Du fait de ces présupposés théoriques, empiriquement soutenus, il est maintenant consensuel d'adopter la dichotomie métaphore / métonymie comme classification des changements sémantiques (Sweetser, 1990 ; Nerlich, 1992 ; McMahon, 1994 ; Wilkins, 1996 ; Bartsch, 2002 ; Györi, 2002 ; Traugott & Dasher, 2002 ; Haser, 2003).

¹Notre traduction.

2 Changements sémantiques et universaux

Une des tâches auxquelles se sont attelés les sémanticiens concernés par la diachronie est la recherche de ‘lois’, ou du moins de ‘tendances’, qui guident les développements sémantiques. La découverte de ces lois était déjà un objectif affiché par les fondateurs qu’étaient Reisig et Bréal (Section 1). L’idéal recherché est la démonstration que certains changements sémantiques obéissent à des lois universelles, transcendant langues et cultures. De telles régularités sont aujourd’hui reconnues. Leur découverte s’est opérée par une approche différente de celle des taxonomistes précédemment exposée, et constituent une tradition typologique. Tandis que ces derniers s’intéressaient à décrire la trajectoire de mots pris isolément, les universaux de changement sémantique ont été découverts au sein de champs sémantiques. La première section de cette partie sera consacrée à l’exposé des travaux de Trier (1931). Bien que ces travaux ne portent pas sur l’universalisme ou la régularité de changements sémantiques, ils nous intéressent ici en tant qu’éléments fondateurs de la diachronie des champs sémantiques. La seconde section sera consacrée à Stern (1931), qui fut le premier à mettre en évidence la présence de régularités dans les changements sémantiques. Enfin, les deux dernières sections seront respectivement consacrées aux travaux de Williams (1976) et Viberg (1983), premières démonstrations translinguistiques de l’existence d’universaux dans les changements sémantiques.

2.1 Trier : Évolution de la structuration des champs sémantiques

2.1.1 Structuralisme et champs sémantiques

Les enseignements dispensés par Saussure dans son *Cours de Linguistique Générale* (Saussure, 1916/1995) marquent l'amorce d'une rupture avec la linguistique telle qu'elle était pratiquée par ses prédécesseurs. Parmi les différentes réformes qu'il introduisit, Saussure définit le signe linguistique comme une entité bipolaire constituée d'un *signifiant* et d'un *signifié* inextricablement liés. Un point essentiel de la pensée de Saussure et du courant structuraliste qui lui succède, est que les signifiés ne sont pas des concepts pré-établis auxquels les langues devraient se conformer, mais au contraire, un découpage effectué par les langues sur notre pensée qui "*abstraction faite de son expression par les mots, [...] n'est qu'une masse amorphe et indistincte*" (Saussure, 1916/1995, p. 1155). Les signifiés n'étant donc pas définis par un contenu référentiel pré-établi, ils le sont relativement les uns par rapport aux autres :

[les concepts] sont purement différentiels, définis non pas positivement par leur contenu, mais négativement par leurs rapports avec les autres termes du système. Leur plus exacte caractéristique est d'être ce que les autres ne sont pas. (*ibid*, p. 1162)

Il en découle que chaque langue est à même d'effectuer son propre découpage de la pensée :

Si les mots étaient chargés de représenter des concepts donnés d'avance, ils auraient chacun, d'une langue à l'autre, des correspondants exacts pour le sens ; or il n'en est pas ainsi. (*ibid*, p. 161)

Hjelmslev (1943/1968) illustre ce point en comparant les découpages effectués dans une partie du spectre chromatique par le français et le gallois médiéval. Le découpage *vert / bleu / gris / brun* en français n'est pas superposable au découpage de la même gamme de couleur en gallois médiéval (figure 1.1) : ce qui est *vert* en français était en partie *gwyrdd* et en partie *glas*. Ce terme recouvrait aussi tout ce qui est *bleu* en français et une partie de ce qui est *gris*. L'autre partie du *gris* était *llwyd*, qui recouvrait aussi l'ensemble du *brun*.

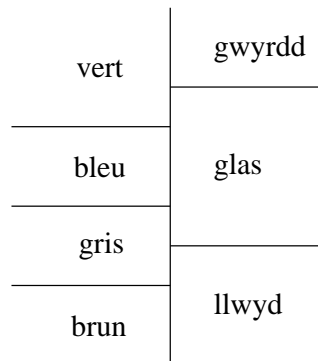


Figure 1.1 – Frontières linguistiques dans le spectre des couleurs en français et en gallois médiéval

2.1.2 Évolution du champ sémantique de la connaissance en allemand

Sur la base de ces considérations, une étude d'orientation structurale des changements sémantiques ne saurait se contenter de la description et de la classification des trajectoires de mots pris isolément, à l'image des travaux exposés dans la section 1. Le sens d'un mot étant délimité par celui de ses voisins, il convient d'étudier au contraire la manière dont évoluent les rapports sémantiques d'un groupe de mots

sémantiquement proches, c'est-à-dire l'évolution de la structuration d'un *champ sémantique*. Cette idée a été développée et appliquée par Trier (1931).

Trier s'est intéressé à l'évolution de la structuration du champ sémantique de la connaissance en allemand entre 1200 et 1300. En 1200, ce champ était organisé autour de trois mots : *Wisheit*, *Kunst* et *List*. La société allemande était au début du 13^e siècle encore féodale, et distinction était faite entre ce qui relevait de la chevalerie et ce qui n'en relevait pas. Ainsi, *Kunst*, s'appliquait aux savoirs chevaleresques, tels que la connaissance des codes de l'honneur, de bonnes conduites en tournois ou de courtoisie envers les femmes. Par opposition, *List* regroupait les savoirs roturiers, tels que l'artisanat. Face à cette opposition de nature sociale, se trouvait *Wisheit*, qui englobait à la fois *Kunst* et *List* et des connaissances spirituelles, morales et religieuses qui transcendaient les conditions sociales. Par un jeu d'oppositions, chevaleresque / roturier entre *Kunst* et *List*, et matériel / spirituel entre *Kunst* et *List* d'un côté et *Wisheit* de l'autre, ces trois termes se délimitaient les uns les autres et découpaient ainsi le champ sémantique de la connaissance.

Cent ans plus tard, la situation est tout autre. Les trois mots qui régissent le domaine des connaissances sont *Wisheit*, *Kunst* et *Wizzen*. Mais la transformation qui s'est effectuée ne s'est pas limitée à la substitution de *Wizzen* à *List*. En un siècle le féodalisme a disparu, et l'ensemble des rapports entre les termes du champ sémantique ont changé. *Wisheit* s'est spécialisé dans la morale religieuse ne recouvrant plus *Kunst* et *List* (ni *Wizzen*). L'opposition sociale qui existait entre *Kunst* et *List* a disparu. *Kunst* a pris le sens de la connaissance des arts, tandis que *Wissen* désigne la connaissance ou l'habileté technique. L'ensemble de cette transformation peut être schématiquement représentée par la figure 1.2.

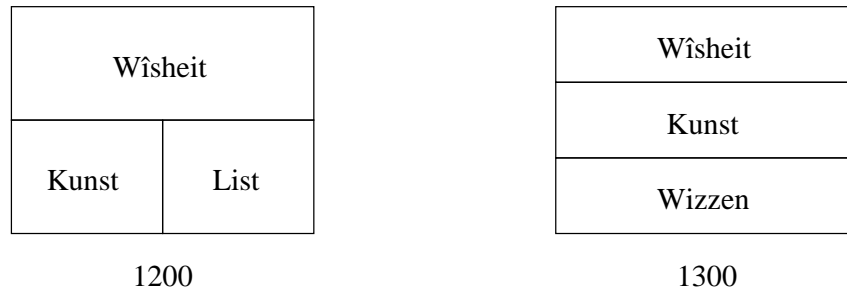


Figure 1.2 – Évolution du champ sémantique de la connaissance en allemand entre le début et la fin du 13^e siècle.

2.1.3 Critique des travaux de Trier

Plusieurs critiques ont été formulées à l'égard de ce type d'analyse. La principale ligne d'argumentation récuse la notion même de champ sémantique, ou plutôt l'idée que les sens d'un ensemble de mots puissent découper un domaine particulier sans vide ni chevauchement (Ullmann, 1962/1967 ; Traugott & Dasher, 2002). En effet, le corollaire de l'acceptation d'un structuralisme orthodoxe, en vertu duquel les signifiés se délimitent les uns les autres, est la nécessité de frontières clairement définies et imperméables entre les signifiés. Or, au contraire, ces frontières sont floues et seulement partiellement définies (Section 3.1).

Néanmoins, un rejet complet de l'idée que des mots de sens proches, se partageant un même domaine, s'influencent les uns les autres serait préjudiciable pour plusieurs raisons. Cette approche permet en effet de contextualiser les changements sémantiques et ainsi d'apporter une vision plus complète des mécanismes en jeu. L'exemple de métonymie lat. *coxa* "hanche" > fr. *cuisse* (page 22) a ainsi été analysé en détail par Wartburg (cité dans Ullmann, 1962/1967) : le latin *fimur*, *fimi*

"fumier, engrais" est devenu en latin vulgaire *femus, femoris* sous l'influence de son synonyme *stercus, stercoris* "fumier, fiente". De ce changement a résulté un conflit homonymique avec *femur, femoris* "cuisse" qui conduit à l'abandon de ce dernier. Le vide sémantique créé par cet abandon a alors conduit à une réorganisation du champ sémantique : *coxa* "hanche" a changé de sens pour devenir "cuisse" et le nouveau vide créé a été comblé par l'emprunt du germanique **hanka* "hanche". Le panorama complet du changement *coxa* "hanche" > fr. *cuisse* n'est accessible qu'en considérant la réorganisation du champ suite à l'abandon de *femur*.

Dans la suite de cette partie, nous allons étudier des universaux des changements sémantiques. Ces universaux n'ont pu être découverts que par l'étude comparée d'évolutions parallèles dans des langues différentes au sein de champs sémantiques explicitement définis.

Enfin, au Chapitre II, nous présenterons une autre application des champs sémantiques en sémantique diachronique, en montrant comment, couplés aux concepts de la sociolinguistique, ils permettent d'aborder sous un angle nouveau l'étude des changements sémantiques.

2.2 Stern : Lois sémantiques

La première avancée marquante en direction de l'établissement d'universaux dans les changements sémantiques est due à Stern (1931) et à son étude des adverbes en anglais moyen ayant subi un changement de "rapidement" vers "immédiatement". Stern a montré que tous les adverbes anglais ayant acquis le sens de "rapidement" avant 1300 (il en liste 22) ont développé le sens de "immédiatement". Les adverbes ayant acquis le sens de "rapidement" après cette date n'ont, en revanche, pas subi ce

changement.

Deux éléments sont importants dans la démonstration de Stern. Tout d'abord, le fait que plusieurs termes aient subi le même développement, suggérant l'existence d'une loi guidant le développement du sens des adverbes de "rapidement" vers "immédiatement". Que ces développements cessent après 1300 n'est pas en soi problématique : il est toujours possible d'imaginer que cette hypothétique loi ait des conditions d'application (qui restent à découvrir), vérifiées avant 1300 mais plus après. Par contre, malgré les 22 changements parallèles relevés par Stern, le fait qu'ils proviennent tous de la même langue empêche d'élever au rang d'universel ce phénomène. En effet, il est impossible d'exclure que ces 22 changements, plutôt qu'être 22 manifestations d'une même loi, soient dus à l'influence qu'ils ont pu exercer les uns sur les autres. Afin de s'affranchir de ce risque, il est nécessaire de collecter des données dans des langues différentes. Dans le chapitre sur le temps de son *Dictionary of Selected Synonyms in the Principal Indo-European Languages*, Buck (1949) note que "la majorité des mots pour 'bientôt' sont, ou ont été, simplement 'rapidement'"¹ (Buck, 1949, p. 964). Il fournit plusieurs exemples dans cette famille linguistique : moyen haut allemand *bald* "rapide" > allemand *bald* "bientôt" ; polonais *rychło* "immédiat" est cognat avec tchèque *rychlý* "rapide" ; letton *drīz* "immédiat" et *drīzs* "rapide" ; slave religieux, serbo-croate et russe *skoro* "immédiat", cognats avec slave religieux *skorŭ* "rapide". Néanmoins, les différents contacts entre ces langues ne permettent toujours pas d'exclure l'hypothèse de changements s'influençant mutuellement. Plus récemment, Traugott & Dasher (2002) ont proposé plusieurs exemples de polysémie issus du japonais : japonais Moyen *hayaku*², *sas-*

¹Notre traduction.

²La transcription est celle Traugott & Dasher (2002)

soku et *sumiyaka ni* "rapidement, immédiatement" ; haut japonais tardif *tosi, soosoo* "rapidement, immédiatement", donnant ainsi plus de crédit à l'hypothèse d'un universel.

Le second élément d'importance de l'étude de Stern sur les adverbes de l'anglais moyen est que tous les changements qu'il a observés sont dans la même direction, de "rapidement" vers "immédiatement". Aucun adverbe signifiant "immédiatement" n'a vu son sens évoluer vers "rapidement". Stern justifie cette *unidirectionalité* par le fait qu'"il est évident que si une personne remonte rapidement au niveau d'une autre, l'action est sur le point d'être terminée ; mais il n'est pas possible d'inverser l'argument et de dire que si une personne est sur le point de remonter au niveau d'une autre, alors l'action est effectuée rapidement aussi"¹. (Stern, 1931, p. 186 ; cité dans ; Traugott & Dasher, 2002). Les données telles que celles présentées par Buck (1949) ne permettent pas de déterminer la direction des changements qu'elles présupposent. Traugott & Dasher (2002) avancent que "*bien que les données écrites ne fournissent aucune preuve directe de la direction du changement en japonais, la distribution des fréquences pour 'rapidement' et 'immédiatement' laisse penser que le sens 'rapidement' est antérieur à 'immédiatement' dans cette langue aussi*"² (p. 68).

La notion d'unidirectionalité est quasi absente des travaux de classification discutés dans la partie 1, qui au contraire avaient souvent tendance à appréhender les changements sémantiques par le biais de couples de mécanismes opposés (extension / restriction, mélioration / péjoration chez Bréal et Ullmann ; domaines émo-

¹Notre traduction. "*It is evident that if a person rides rapidly up to another, the action is soon completed ; but we cannot reverse the argument and say that if a person rides soon up to another, then the action is also rapidly performed*".

²Notre traduction.

tionnellement saillants pouvant être sources *ou* cibles de métaphores chez Sperber et Ullmann, ...). L'unidirectionalité est pourtant une caractéristique récurrente des régularités que l'on observe dans les changements sémantiques. Les deux études que nous allons à présent passer en revue, celle de Williams (1976) et celle de Vi-berg (1983), ont marqué un virage dans l'étude des changements sémantiques en introduisant de manière explicite cette unidirectionalité.

2.3 Williams : Adjectifs synesthétiques

Les premières lignes de l'article de Williams (1976) sont les suivantes :

Malgré l'intérêt intense et croissant porté à la sémantique descriptive théorique, la sémantique historique théorique continue de se languir dans les eaux stagnantes de la lexicographie et de la philologie, ou dans les histoires sans profondeur de la langue anglaise ¹.

(p. 461, Williams, 1976)

À cette date, les connaissances sur les changements sémantiques se résument à la taxonomie établie par Ullmann vingt ans auparavant, taxonomie largement fondée sur des travaux antérieurs aux années 1930. Après avoir été l'objet d'une intense activité au début du 20^e siècle, sous les influences combinées du behaviorisme, du structuralisme et du générativisme, la sémantique diachronique était tombée en désuétude. Le diagnostic de Williams sur l'état des recherches en la matière est sans appel : "*Les articles de journaux sur les changements sémantiques ne sont remarquables que par leur rareté*"² (p. 461). L'étude de Williams se voulut donc comme un renouveau dans l'analyse des changements sémantiques.

¹Notre traduction.

²Notre traduction.

Williams (1976) a porté son attention sur les "*adjectifs anglais [...] qui réfèrent à une expérience sensorielle primaire*". Ces expériences sensorielles primaires sont au nombre de six : toucher, goût, odeur, dimension perçue visuellement, couleur et son. Des adjectifs y référant sont par exemple *hot* "chaud" ou *sharp* "acéré, pointu" pour le toucher, *high* "haut" ou *low* "bas" pour les dimensions perçues visuellement, ... Plus précisément, Williams (1976) a étudié la manière dont ces adjectifs ont développé, au cours des douze derniers siècles, de nouveaux sens au travers de métaphores synesthétiques à partir des dates de première attestation des différentes acception fournies par deux dictionnaires, le *English Oxford Dictionary* et le *Middle English Dictionary*. Ces métaphores, déjà notées par Bréal, sont très fréquentes : une note peut être haute, une couleur chaude, une saveur douce, une odeur sucrée, ... Dans ces cas, l'adjectif est utilisé en référence à une expérience sensorielle qui n'est pas son expérience sensorielle primaire. Dans les exemples ci-dessus¹, *haut* a été métaphoriquement transposé d'une dimension visuellement perçue à un son, *chaud* du toucher aux couleurs, *doux* du toucher au goût, *sucré* du goût à l'odeur.

Williams (1976) a montré que tous les transferts métaphoriques n'étaient pas possibles, et que ceux qui le sont, sont pour la plupart unidirectionnels. Les adjectifs dont l'expérience sensorielle primaire est le toucher peuvent se développer métaphoriquement vers les goûts (une saveur *douce*), les sons (une note *chaude*) ou les couleurs (un bleu *feutré*). Ceux des goûts peuvent se développer vers les odeurs (une odeur *sucrée*) ou les sons (une musique *mielleuse*). Les adjectifs référant à une dimension perçue visuellement peuvent être étendus aux couleurs (un rouge *pro-*

¹Les exemples de métaphores synesthétiques proposés dans cette section ne sont pas nécessairement des traductions de ceux donnés par Williams (1976). En effet, les exemples anglais ne sont pas toujours les plus pertinents après avoir été traduits en français.

fond) ou vers les sons (une note *haute*). Les adjectifs pour les sons sont uniquement transférables aux couleurs (un jaune *criard*). Il n’y a pas en anglais (et vraisemblablement en français non plus) d’adjectif référant aux odeurs ayant développé de nouveau sens par métaphore synesthétique. Les transferts possibles sont synthésisés par la figure 1.3.

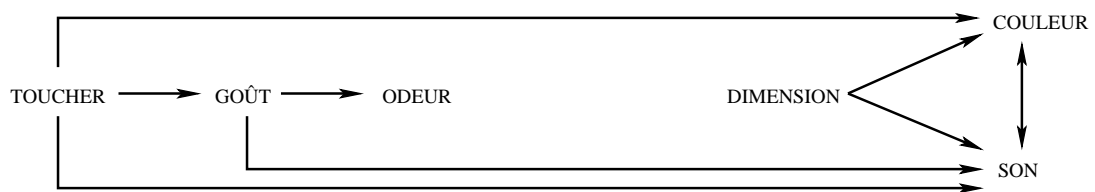


Figure 1.3 – Transferts métaphoriques synesthétiques possibles. D’après Williams (1976).

Williams (1976) a étudié plus d’une centaine de ces adjectifs, et 65 d’entre eux ont subi une ou plusieurs métaphores synesthétiques. Si l’on ne considère que les premières extensions métaphoriques de ces adjectifs, 54 changements, soit 83%, sont conformes au schéma établi. De plus, parmi les 11 changements irréguliers observés par Williams, seulement 2 ont persisté en anglais moderne, les autres ayant été abandonnés. En prenant en compte ces abandons, près de 97% des développements sont conformes.

Il arrive que des adjectifs soient soumis à plusieurs développements métaphoriques synesthétiques successifs, référant alors à trois, quatre, voire cinq expériences sensorielles primaires. Quantifier l’adéquation entre ces développements et ceux prédits par la figure 1.3 n’est pas aussi évident que dans le cas de l’étude des premiers développements seulement. En effet, lorsqu’apparaît un nouveau sens pour un adjectif en ayant déjà plusieurs, il n’y a aucun moyen de déterminer lequel des anciens sens constitue la source du nouveau développement. Selon les manières

d'appréhender ces développements en série, Williams (1976) évalue entre 65% et 89% la congruence entre son schéma et ses observations.

Bien que son étude ait spécifiquement porté sur l'anglais, Williams (1976) a testé son schéma prédictif sur l'Indo-Européen à partir des données contenues dans Buck (1949) et sur le Japonais à partir d'un dictionnaire et d'informateurs. Les changements suivent les directions prédites par Williams dans 14 cas sur 19 en Indo-Européen, et dans 40 sur 44 en Japonais, résultats allant dans le sens de l'existence d'un universel dans les changements sémantiques.

2.4 Viberg : Verbes de perception

2.4.1 Changements sémantiques des verbes de perception

L'étude de Viberg (1983) est proche de celle de Williams (1976). Viberg a étudié les verbes de perception dans 53 langues appartenant à 14 familles linguistiques. C'est la première étude trans-linguistique de cette envergure réalisée dans le champ des changements sémantiques. Néanmoins, malgré sa taille considérable, cet échantillon reste imparfait "*car les langues européennes sont surreprésentées, alors que celles de certaines régions, comme l'Amérique du nord, l'Amérique du sud ou l'Océanie sont hautement sous-représentées*"¹ (Viberg, 1983, p. 124). Les verbes étudiés par Viberg appartiennent à un champ sémantique structuré d'une part par les cinq modalités perceptives (vision, audition, toucher, olfaction et gustation), et d'autre part par les trois types d'événements associés à la perception sensorielle, c'est-à-dire l'activité contrôlée de perception (*j'écoute la radio*), l'expérience pas-

¹Notre traduction.

sive de perception (*j'entends la radio*) et la description de l'état de la source (*la rose sent bon* par opposition à *je sens l'odeur de la rose*). Le tableau 1.2 donne les 15 verbes de ce champ sémantique en anglais.

	ACTIVITÉ	EXPÉRIENCE	SOURCE
VISION	look at	see	look
AUDITION	listen to	hear	sound
TOUCHER	feel	feel	feel
GUSTATION	taste	taste	taste
OLFACTION	smell	smell	smell

Tableau 1.2 – Paradigme des verbes de perception en anglais

La plupart de ces verbes peuvent posséder un certain nombre d'hyponymes. Par exemple, l'activité liée à la vision peut aussi être dénotée en français par les verbes *scruter*, *admirer*, ... Viberg laisse de côté ces hyponymes pour se focaliser sur les verbes de base, les plus généraux. Le premier constat qui ressort d'un rapide examen du cas de l'anglais est la forte polysémie à l'intérieur de ce champ sémantique : neuf verbes se partagent les 15 sens possibles. Ce constat est valable trans-linguistiquement, très peu de langues possédant 15 verbes différents. Viberg a étudié les patterns de polysémie en limitant son étude aux seuls verbes d'expérience passive qui présentent plus de polysémie que les verbes d'activité contrôlée ou basés sur la source. Toutes les langues présentent des patterns de polysémie dont les changements sémantiques qui en sont à l'origine sont conformes au schéma de la figure 1.4.

Ce schéma doit être interprété comme suit : si un verbe a comme sens initial la modalité visuelle, alors les extensions autorisées vont vers l'audition, le toucher et la gustation. Si le sens initial est la modalité auditive, les extensions possibles vont vers le toucher et l'olfaction. Si le sens initial est la modalité tactile, la gustation est

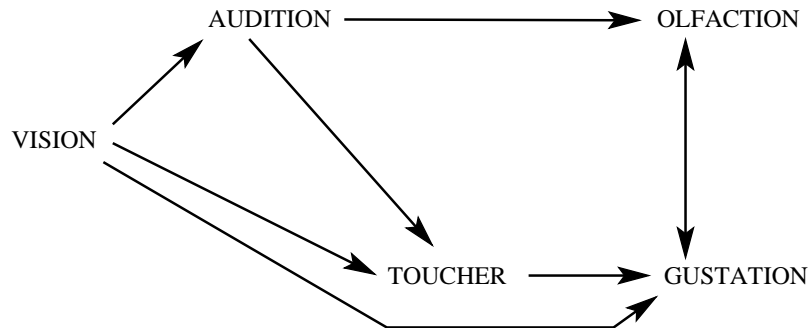


Figure 1.4 – Changements sémantiques des verbes de perception. D’après Viberg (1983)

la seule extension possible. Enfin, les verbes pour la gustation et l’olfaction peuvent étendre leur sens respectivement vers l’olfaction et le goût.

2.4.2 Les verbes de perception dans d’autres langues que celles étudiées par Viberg (1983)

Comme précisé ci-dessus, si l’échantillon utilisé par Viberg est de taille considérable, il pêche par la sous-représentation de certaines zones linguistiques, particulièrement en Amérique et en Australie. Dans cette section, nous présentons des travaux ultérieurs à ceux de Viberg (1983) concernant ces zones.

Akatek

Les verbes de perception en akatek, langue Maya parlée au Guatemala et au Mexique, ont été étudiés par Schüle (2000) qui décrit cette langue comme typologiquement représentative de l’ensemble des langues Maya. L’akatek dispose de

deux verbes de perception passive, *il* "voir" et *ab'* "entendre", ce dernier s'étendant aussi aux modalités tactile, gustative et olfactive. L'Akatek est donc conforme à la hiérarchie de Viberg.

Langues australiennes

Evans & Wilkins (2000) ont étudié les verbes de perception dans une soixantaine de langues australiennes, fournissant ainsi un riche complément à l'étude de Viberg (1983). La distinction entre les trois types d'événements de Viberg (activité, expérience et source) n'étant pas pertinente pour les langues australiennes qui ne la lexicalisent pas (préférant s'appuyer sur le contexte et des constructions différentes), elle n'a pas été prise en compte dans cette étude. Les résultats qu'ils obtiennent sont schématisés sur la figure 1.5

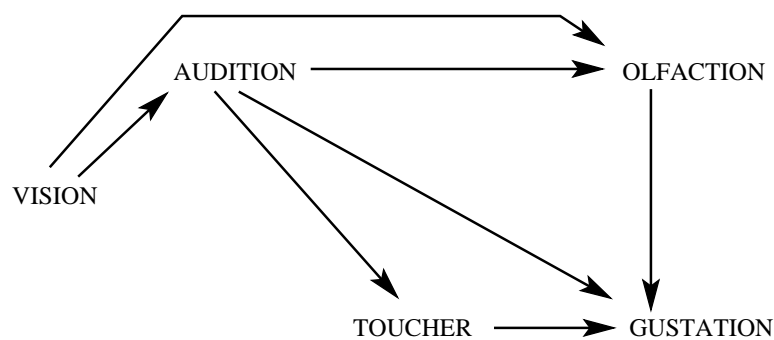


Figure 1.5 – Changements sémantiques des verbes de perception dans les langues australiennes. D'après Evans & Wilkins (2000)

Plusieurs différences sont à noter entre les résultats de Evans & Wilkins (2000) et ceux de Viberg (1983). Alors que les langues étudiées par Viberg peuvent présenter des extensions de la modalité visuelle vers la modalité tactile, aucune langue australienne ne suit ce chemin. En revanche, ces langues montrent des extensions de

la modalité visuelle vers la modalité olfactive, aucun changement de ce type n'ayant été observé par Viberg. Par ailleurs, dans les langues australiennes des extensions sont attestées entre l'ouïe et le goût, alors qu'aucune ne l'est entre le goût et l'odorat.

Mais au delà de ces différences, les changements observés par Evans & Wilkins (2000) et ceux observés par Viberg (1983) sont très similaires. Les changements qu'ils observent induisent des hiérarchies entre les différentes modalités perceptives. La hiérarchie de Viberg (1983) est la suivante :

$$\text{Vision} > \text{Audition} > \text{Toucher} > \begin{cases} \text{Olfaction} \\ \text{Gustation} \end{cases}$$

Celle qui ressort des résultats de Evans & Wilkins (2000) est :

$$\text{Vision} > \text{Audition} > \text{Toucher} > \text{Olfaction} > \text{Gustation}$$

Malgré les variations entre les changements attestés dans les langues étudiées par Viberg et ceux attestés dans les langues australiennes, les grandes lignes de la hiérarchie entre les différentes modalités sensorielles sont conservées, suffisamment pour permettre à Evans & Wilkins (2000) de conclure que "*le fait que nos résultats sur les extensions sémantiques dans le domaine des verbes de perception soient si finement corrélés avec ceux de Viberg supporte l'idée d'un degré d'universalisme*"¹ (p. 561).

¹Notre traduction.

3 Fondements cognitifs des changements sémantiques

Les deux précédentes parties se sont attachées à décrire les travaux sur l'étude des changements sémantiques antérieurs à l'immixtion de la linguistique cognitive dans ce champ d'étude. Nous avons regroupé ces travaux selon deux traditions, l'une taxonomiste et l'autre typologiste. La première a conduit à l'établissement de classifications des types de changements sémantiques, faisant ressortir que métaphore et métonymie sont les deux mécanismes fondamentaux à la source de ce phénomène, tandis que la seconde a su mettre en lumière des tendances universelles dans les changements sémantiques. Ces deux traditions sont essentiellement descriptives. Elles nous proposent un regard plus aiguisé sur le phénomène des changements sémantiques, mais manquent de pouvoir explicatif. On ne saurait leur reprocher cette absence : comme le fait remarquer Haspelmath (2004) à propos de changement dans les langues, "*tant que l'on ne sait pas si un changement est une instance particulière d'une tendance plus générale, on ne sait pas s'il y a quoi que ce soit à expliquer*" (p. 19). Aussi cette phase descriptive était-elle indispensable afin de dégager les mécanismes fondamentaux récurrents, la métaphore et la métonymie, et montrer l'existence de changements sémantiques parallèles.

L'avènement, au début des années 1980, de ce qu'il est maintenant convenu

d'appeler linguistique cognitive¹ constitue pour les changements sémantiques une révolution puisque, d'une phase descriptive, leur étude est passée à une phase explicative. Cette troisième partie vise à exposer ces développements récents.

3.1 Catégorisation

3.1.1 Conception classique des catégories

À observer notre environnement, un constat s'impose : bien que chaque objet qui le compose soit unique, il partage avec d'autres un certain nombre de similitudes qui nous conduisent à conclure qu'ils appartiennent à la même catégorie. Nous passons notre existence à faire et refaire ce même constat. Il nous est impossible de percevoir un objet, un événement, d'accomplir une action ou de ressentir une émotion sans lui accorder une appartenance à une catégorie. Il n'est pas d'entité qui n'appartienne à une catégorie. Cette systématisme a conduit la tradition philosophique occidentale à réifier les catégories et à considérer l'appartenance d'un objet à une catégorie comme étant une propriété intrinsèque de l'objet, ou plutôt comme étant équivalente à la possession des propriétés caractéristiques de la catégorie par l'objet. Selon cette conception dite classique des catégories, étant donné une catégorie C et un objet o , soit o possède la ou les propriétés caractéristiques de C et appartient de fait à C , soit il ne les possède pas et n'appartient pas à C . La possession des propriétés caractéristiques de C est une condition nécessaire et suffisante pour appartenir à C . Par exemple, étant donné la catégorie des objets pesant plus de 100 kg, un objet

¹Il est souvent risqué de s'aventurer à proposer des dates pour la naissance de courants scientifiques, et l'on trouvera sans doute des travaux antérieurs aux années 1980 pouvant se réclamer de la linguistique cognitive.

donné appartiendra à cette catégorie si et seulement si il a la propriété de peser plus de 100 kg.

Une des conséquences de cette conception des catégories est que la question de l'appartenance à une catégorie est une question propre aux objets, et indépendante d'un quelconque observateur qui formulerait des jugements d'appartenance. Toujours selon cette conception, lorsque l'on dit que l'on catégorise un objet de telle ou telle manière, il y a abus de langage : on émet seulement une hypothèse, laquelle pouvant être soit vraie, si l'on a correctement identifié les propriétés caractéristiques de la catégorie et correctement vérifié leur présence chez l'objet, soit fausse si l'une des deux étapes n'a pas été correctement effectuée. Mais l'appartenance à proprement parler est antérieure à nos jugements, elle ne dépend que des propriétés de l'objet, et constitue une vérité absolue qu'il nous appartient d'atteindre en découvrant les propriétés nécessaires et suffisantes.

Les catégories peuvent, éventuellement, être organisées hiérarchiquement. La catégorie HUMAIN est une sous-catégorie de ANIMAL. Les propriétés caractéristiques d'une catégorie sont celles de la catégorie qui lui est immédiatement supérieure, plus un trait distinctif qui constitue la spécificité de la catégorie. Le trait distinctif qui distingue l'humain des autres animaux est sa rationalité ¹. La condition nécessaire et suffisante pour appartenir à la catégorie HUMAIN est d'appartenir à la catégorie ANIMAL *et* d'être rationnel.

Cette conception a prévalu jusqu'à la moitié du 20^e siècle sans être remise en question. Pourtant, depuis, cette conception a acquis le statut de théorie, peut donc être falsifiable, et a été mise en défaut. Les premières brèches ont été ouvertes par

¹Nous reprenons ici un exemple classique, sans pour autant adhérer à ce qu'il exprime. Nous sommes tout à fait enclin à reconnaître au moins certaines formes de rationalité chez d'autres espèces animales que l'humain.

Wittgenstein (1953) et les travaux de Rosch ont conduit à une théorie alternative, plus résistante à la vérification empirique, la théorie du prototype ¹.

3.1.2 Ressemblance de famille

À deux reprises, le philosophe d'origine autrichienne Ludwig Wittgenstein a bouleversé la philosophie du langage (et même l'ensemble de notre système de pensée). Le premier de ces bouleversements est exposé dans son unique ouvrage publié de son vivant, le *Tractatus Logico-Philosophicus* (Wittgenstein, 1921). Cette monographie s'inscrit dans la révolution de la logique et de la formalisation des fondements des mathématiques opérée au début du 20^e siècle, illustrée entre autres par Gotlob Frege ou Bertand Russel. Le *Tractatus Logico-Philosophicus* se veut une réponse à la question "en quoi les propositions de la logique se distinguent-elles de toutes les autres propositions du langage ?" (Marconi, 1997). La réponse apportée par Wittgenstein l'a conduit à définir le sens d'une expression comme étant ses conditions de vérité, posant, se faisant, les jalons de la sémantique formelle. Convaincu que toutes les questions philosophiques reposaient sur l'ambiguïté de leur formulation en langue naturelle et que ses travaux résolvaient ce problème, Wittgenstein considéra, après la publication du *Tractatus Logico-Philosophicus*, que toutes les questions philosophiques avaient trouvé solutions, et que la philosophie était par conséquent achevée. Il se retira alors dans les Alpes autrichiennes où il devint instituteur, puis jardinier.

Le second bouleversement provoqué par Wittgenstein est une autocritique exemplaire, synthétisée dans son ouvrage posthume *Investigations Philosophiques* (Witt-

¹Si Wittgenstein et Rosch sont les plus représentatifs de la mise à mal de la conception classique des catégories, ils n'en sont pas pour autant les seuls. Voir Lakoff (1987, chapitre 2) pour un historique détaillé de l'évolution des idées qui a conduit à la remise en cause de la conception classique.

genstein, 1953). Toujours convaincu que les problèmes philosophiques naissent de la confusion de leur formulation, Wittgenstein y réfuse le recours à la logique pour rendre compte de la signification des énoncés, argumentant que le sens des mots réside dans leurs usages. En développant cette position, Wittgenstein jette bas la conception classique des catégories. Illustrant son propos avec la catégorie JEU, Wittgenstein part à la recherche des propriétés caractéristiques de cette catégorie, partagées par tout jeu. Plutôt que de paraphraser son argumentation, nous préférons la reproduire intégralement :

Considérons par exemple les processus que nous nommons les "jeux". J'entends les jeux de dames et d'échecs, de cartes, de balle, les compétitions sportives. Qu'est-ce qui leur est commun à tous ? – Ne dites pas : Il *faut* que quelque chose leur soit commun, autrement ils ne se nommeraient pas " jeux " – mais *voyez* d'abord si quelque chose leur est commun. – Car si vous le considérez, vous ne verrez sans doute pas ce qui leur serait commun à *tous*, mais vous verrez des analogies, des affinités, et vous en verrez toute une série. Comme je l'ai dit : ne pensez pas, mais *voyez* ! *Voyez*, par exemple, les jeux sur damiers avec leurs multiples affinités. Puis passez aux jeux de cartes : ici vous trouverez beaucoup de correspondances avec la classe précédente, beaucoup de traits communs disparaissent, tandis que d'autres apparaissent. Si dès lors nous passons aux jeux de balle, il reste encore quelque chose de commun, mais beaucoup se perd. - Tous ces jeux sont-ils "divertissants" ? Comparez les échecs et la marelle. Ou bien y a-t-il en tous une façon de gagner ou de perdre, ou une compétition des joueurs ? Songez aux patiences. Dans les jeux de balle on gagne et on perd ; mais quand un enfant lance la balle contre le mur et la rattrape, ce caractère se perd. *Voyez* quel rôle jouent l'adresse et la chance. Et combien différentes l'adresse aux échecs et l'adresse au tennis. Songez maintenant aux jeux de rondes : ici il y a l'élément du divertissement, mais combien d'autres caractéristiques ont disparu ! Et ainsi nous pouvons parcourir beaucoup d'autres groupes de jeux ; voir surgir et disparaître des analogies.

Et tel sera le résultat de cette considération : nous voyons un réseau complexe d'analogies qui s'entrecroisent et s'enveloppent les unes aux autres. Analogies d'ensemble comme de détail.

(Wittgenstein, 1953, §66)

À travers l'exemple de la catégorie JEU, Wittgenstein nous montre que l'hypothèse selon laquelle l'appartenance à une catégorie repose sur la vérification d'une condition nécessaire et suffisante, ou autrement dit, que tous les membres d'une catégorie partagent des propriétés en commun (et qu'ils sont les seuls), n'est pas fondée. Au contraire, il ressort de cette analyse que si des similitudes sont bien observables entre les membres d'une catégorie telle que JEU, chacune d'entre elle ne concerne qu'une partie des membres de la catégorie. Le ciment qui unit les membres au sein d'une même catégorie ne peut être une ou plusieurs propriétés vérifiées simultanément par tous, mais plutôt un ensemble de propriétés, vérifiées chacune par un nombre variable de membres. Pour caractériser cette structuration des catégories, Wittgenstein introduit le terme de *ressemblances de famille* :

Je ne puis caractériser mieux ces analogies que par le mot : "ressemblances de famille" ; car c'est de la sorte que s'entrecroisent et que s'enveloppent les unes sur les autres les différentes ressemblances qui existent entre les différents membres d'une famille : la taille, les traits du visage, la couleur des yeux, la démarche, le tempérament, etc. – Et je disais : les "jeux" constituent une famille.

(Wittgenstein, 1953, §67)

3.1.3 Structure des catégories et structure des taxonomies

Si la contestation de Wittgenstein de la conception classique des catégories se situe sur un terrain philosophique, la psychologue américaine Eleanor Rosch a articulé la sienne sur le terrain empirique (Rosch, 1973, 1975a, 1975b, 1977, 1978 ; Rosch, Mervis, et al., 1976 ; Rosch, Simpson, & Miller, 1976 ; Rosch & Mervis, 1975). Selon la conception classique des catégories, la structure interne d'une catégorie est homogène : ses constituants en sont tous membres pour la même raison, en vertu du fait qu'ils vérifient les propriétés qui définissent l'appartenance à la catégorie. Il

n'y a donc aucune raison pour qu'un ou plusieurs des éléments d'une catégorie se différencient des autres ou acquièrent un statut particulier ; tous les membres d'une catégorie sont situés sur un même pied d'égalité. De la même manière, au sein d'une taxonomie, une hiérarchie de catégories, la conception classique ne privilégie aucun niveau par rapport aux autres : Milou est autant un FOX TERRIER, qu'un CHIEN, qu'un CANIDÉ, qu'un MAMMIFÈRE, qu'un VERTÉBRÉ ou qu'un ANIMAL. Ce sont ces deux prédictions de la théorie classique des catégories, l'homogénéité interne des catégories et l'homogénéité des taxonomies, que les travaux de Rosch ont falsifiées.

Structure interne des catégories

En multipliant les paradigmes expérimentaux, Rosch et ses collègues ont montré que la structure interne des catégories n'est pas homogène. Il existe au sein des catégories un gradient de typicalité. Les membres (ou plutôt les sous-catégories) d'une catégorie ne sont pas tous également représentatifs de la catégorie, certains étant plus typiques que d'autres. Par exemple, dans la catégorie FRUIT, la pomme est un meilleur exemplaire que l'olive. Les paradigmes empiriques exhibant un gradient de typicalité, ou effet de prototype, c'est-à-dire mettant en lumière l'hétérogénéité de la structure interne des catégories, sont variés et les résultats sont robustes d'un paradigme à l'autre : lorsque l'on demande aux sujets de produire des exemples d'une catégorie, les plus typiques sont plus fréquemment cités (Rosch, 1975b ; Rosch, Simpson, & Miller, 1976) ; lorsque l'on demande d'évaluer la véracité de phrases telles que *la pomme est un fruit*, les temps de réponse sont d'autant plus courts que l'exemplaire est représentatif de la catégorie proposée (Rosch, 1973 ; Rosch, Simpson, & Miller, 1976) ; lorsque l'on demande d'évaluer directement la typica-

lité d'exemplaires d'une catégorie, les réponses des sujets sont hautement corrélées entre elles et avec les résultats d'expériences telles que celles décrites ci-dessus. Par ailleurs, un effet de prototype apparaît aussi dans les jugements de similarité entre membres d'une catégorie par une asymétrie des réponses : si *a* et *b* sont deux exemplaires d'une même catégorie et que *a* est plus typique que *b*, alors *b* est jugé plus similaire à *a* que *a* à *b* (Rosch, 1975b). De même, les propriétés d'un exemplaire ont d'autant plus tendance à être généralisées à l'ensemble de la catégorie que celui-ci est typique (Rosch, 1975a ; B. Tversky, 1977 ; A. Tversky & Gati, 1978). Enfin, lors de l'apprentissage de catégories artificielles, les exemplaires les plus typiques sont les plus rapidement appris (Rosch, Simpson, & Miller, 1976), ce qui est également le cas d'un point de vue développemental chez les enfants (Rosch, 1973)

L'effet de prototype que l'on observe dans les catégories peut être assorti d'un gradient d'appartenance. Alors que la conception classique des catégories prédit que la question de l'appartenance à une catégorie attend une réponse tranchée, ce n'est que rarement le cas. Labov (1973) a proposé à des sujets des dessins de vaisselle tels que ceux de la figure 1.6. Dans l'une des conditions de son expérience, il était simplement demandé aux sujets de nommer le dessin. Alors que l'ensemble des sujets s'accordaient à catégoriser le stimulus 1 comme étant une *cup* et qu'une majorité catégorisait le stimulus 4 comme étant un *bowl*, les stimuli intermédiaires étaient nettement moins consensuels, indiquant que la frontière entre les catégories CUP et BOWL n'est pas franche comme le prédit la conception classique, mais graduelle, floue, certains objet n'étant ni totalement une tasse, ni totalement un bol.



Figure 1.6 – Exemples de stimuli utilisés par Labov (1973)

Niveau de base

Le second point étudié par Rosch découle directement des observations de Wittgenstein : les catégories sont caractérisées par un faisceau de similitudes, un ensemble de propriétés plus ou moins partagées par leurs membres. Au sein d'une taxonomie, une catégorie possède, pourvu qu'elle ne soit pas la plus générale ou une des plus spécifiques, une catégorie superordonnée, la catégorie qui lui est immédiatement supérieure, et des catégories subordonnées, les catégories qui lui sont immédiatement inférieures. Ainsi, la catégorie JEU a comme catégorie superordonnée par exemple LOISIR, qui est aussi la catégorie superordonnée de catégories comme SPORT ou PHILATÉLIE. Les catégories subordonnées de JEU sont JEU DE CARTES, JEU DE BALLON, ...

Le faisceau de similitudes d'une catégorie est composé de ceux de ses catégories subordonnées. Ainsi, parmi les propriétés pouvant être possédées par les membres de la catégorie JEU figurent les propriétés pouvant être possédées par les membres de la catégorie JEU DE CARTES, celles pouvant être possédées par les membres de la catégorie JEU DE BALLON ... Certaines des propriétés d'une catégorie, les plus générales, sont fréquentes dans l'ensemble de ses catégories subordonnées, alors que d'autres sont plus spécifiques à certaines. Par exemple, la propriété *divertis-*

sant est possédée par beaucoup de jeux, quelle que soit leur catégorie subordonnée, alors que la propriété *demande de la réflexion* est plus fréquente dans la catégorie subordonnée JEU DE CARTES que dans la catégorie JEU DE BALLON.

Sur ces considérations, Rosch, Mervis, et al. (1976) ont fait l'hypothèse qu'il existe dans les taxonomies un niveau plus saillant que les autres, et privilégié lors de la catégorisation. Ce niveau, le niveau de base, est celui auquel se réalise le compromis entre deux heuristiques guidant la catégorisation d'un objet : (1) faire en sorte que l'objet soit similaire aux autres membres de la catégorie et (2) qu'il soit différent des membres des catégories 'contrastives' (les catégories contrastives d'une catégorie sont les autres catégories subordonnées de sa catégorie superordonnée). La figure 1.7 présente l'une des neuf taxonomies étudiées par Rosch, Mervis, et al. (1976). Étant donné, par exemple, un stimulus représentant une table de cuisine, l'heuristique (1) pousse à le catégoriser dans la catégorie TABLE DE CUISINE, catégorie avec les membres de laquelle le stimulus partagera un grand nombre de propriétés. Mais cette catégorisation va à l'encontre de l'heuristique (2) : dans le cadre de notre exemple la catégorie contrastive de TABLE DE CUISINE est TABLE DE SALLE À MANGER. Or, une table de cuisine n'est pas fondamentalement différente d'une table de salle à manger. Pour satisfaire l'heuristique (2), il conviendrait de catégoriser le stimulus dans la catégorie MEUBLE. Ainsi serait maximisée la dissimilarité entre le stimulus et les membres des catégories contrastives de MEUBLE, des catégories d'artefacts différents de MEUBLE, tels que VÉHICULE ou OUTIL. Mais catégoriser le stimulus à ce niveau va à l'encontre de l'heuristique (1). L'équilibre entre ces deux tendances inverses se trouve à un niveau intermédiaire de la catégorie, le niveau de base. L'hypothèse de ce niveau de base a été vérifiée empiriquement de différentes manières.

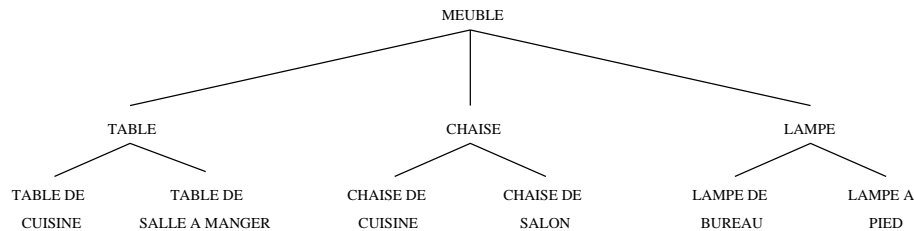


Figure 1.7 – Une des neuf taxonomies étudiées par Rosch, Mervis, et al. (1976)

Antérieurement aux travaux de Rosch, l'anthropologue Brent Berlin et ses collaborateurs avaient déjà proposé des éléments en faveur d'un niveau de base dans les taxonomies (Berlin, Breedlove, & Raven, 1966, 1973, 1974). Ces travaux ont porté sur les classifications zoologique et botanique des locuteurs Tzeltal, langue parlée au Mexique dans la région du Chiapas. Berlin et ses collaborateurs ont montré que, bien que les Tzeltal aient une connaissance poussée des plantes et des animaux de leur environnement, en étant capables de distinguer les familles, les genres, les espèces et les variétés¹, le nom usuel pour dénommer une plante ou un animal est le nom correspondant au genre de la plante ou de l'animal. À ce niveau, la classification des Tzeltal est largement concordante avec la classification scientifique, alors qu'aux autres niveaux les divergences se font plus grandes. De plus, le niveau du genre est le premier à être appris par les jeunes Tzeltal (Stross, 1969). Tous ces points supportent l'idée que le genre constitue le niveau de base des taxonomies biologiques des locuteurs Tzeltal.

Rosch, Mervis, et al. (1976) ont, dans un article très riche relatant onze expériences, apporté les preuves empiriques de l'existence et de l'utilité cognitive d'un

¹Les êtres vivants se décomposent en 5 règnes. Chacun de ces règnes est décomposé en embranchements, eux mêmes décomposés en classes, puis en ordres, en familles, en genres, en espèces et finalement en variétés.

niveau de base dans les taxonomies. Confirmant la pertinence de l'heuristique (1), ils ont montré que le niveau de base est le plus abstrait des niveaux auxquels on observe une grande cooccurrence des propriétés des objets. C'est aussi le niveau le plus abstrait pour lequel on dispose de programmes moteurs permettant d'interagir avec l'ensemble des objets de la catégorie : alors que l'on a des programmes moteurs associés aux chaises en général, aucun n'est commun à l'ensemble des meubles. Quant aux programmes moteurs pour des catégories plus spécifiques, les chaises de cuisine ou les chaises de salon, ils ne diffèrent pas ou très peu de ceux des chaises en général. Il en va de même pour la similarité des formes des membres des catégories : le niveau de base est le plus abstrait auquel les membres présentent des formes similaires. Nous avons à ce niveau une perception gestaltique, c'est-à-dire que nous percevons les objets comme des touts psychologiquement plus saillants que la somme de leurs parts. Cela a pour conséquence que le niveau de base est le niveau le plus abstrait auquel il est possible de procéder à de l'imagerie mentale (Shepard & Meltzer, 1971 ; Kosslyn, Ball, & Reiser, 1978). Le niveau de base est le niveau auquel s'effectue par défaut la catégorisation, le premier auquel un objet est reconnu comme étant membre d'une catégorie. C'est le niveau auquel apparaissent les premiers mots, tant du point de vue de l'acquisition des langues (les premiers mots appris par les enfants désignent les catégories situées au niveau de base), que du point de vue de l'évolution des langues : Rosch, Mervis, et al. (1976) ont montré que le lexique de la Langue des Signes Américaine ne recouvre pas tous les niveaux des taxonomies et que le niveau de base est le plus lexicalisé. Cette observation suggère que les termes correspondant au niveau de base sont les premiers à entrer dans le lexique des langues, ceux des catégories superordonnées et subordonnées ne les enrichissant qu'ultérieurement. Enfin, les termes correspondant aux catégories

situées au niveau de base ont tendance à être plus courts que ceux pour les autres catégories.

Comme nous le verrons par la suite (Section 3.3.1), les catégories de niveau de base sont fondamentales à la cognition. Lakoff & Johnson (1999) retiennent quatre critères pour caractériser ces catégories de niveau de base :

- C'est le plus haut niveau auquel il nous est possible de former une image mentale représentant l'ensemble de la catégorie.
- C'est le plus haut niveau auquel nous avons une perception gestaltique.
- C'est le plus haut niveau auquel nous avons des programmes moteurs pour agir avec les objets de la catégorie.
- C'est le niveau auquel s'organise la plupart de notre savoir.

3.1.4 La révolution roschienne

Les avancées de Wittgenstein et de Rosch proposent une approche des catégories fondamentalement différente de celle de la conception classique. Cette dernière identifie l'appartenance d'un objet à une catégorie à la présence nécessaire et suffisante chez l'objet des propriétés qui caractérisent la catégorie. Les catégories sont de fait réifiées, et accèdent à un mode d'existence indépendant de toute implication psychologique : les catégories existent antérieurement et indépendamment de tout observateur catégorisateur. L'activité catégorisatrice d'un tel observateur est d'identifier les propriétés de l'objet à catégoriser, de s'assurer que les conditions nécessaires et suffisantes d'appartenance sont vérifiées, afin de *reconnaître* que l'objet appartient à la catégorie.

La vision roschienne diffère radicalement. Les catégories y sont des objets men-

taux. Elles n'existent pas hors des observateurs catégorisateurs, mais leur sont des constructions propres, et leur raison d'être est cognitive ; elles sont des outils pour appréhender l'environnement : "*Le monde consiste en un nombre virtuellement infini de stimuli discriminables. Une des fonctions les plus basiques de tous les organismes est de découper l'environnement en classifications par lesquelles des stimuli non-identiques peuvent être traités comme étant équivalents*" (Rosch, Mervis, et al., 1976, p. 383). Ce découpage se fait donc en suivant la structure du monde extérieur tel qu'il est perçu, et non pas selon une vérité absolue. La perception du monde peut varier d'une espèce à l'autre ("*le sens de l'odorat des chiens est plus hautement différencié que celui des humains, et la structure du monde pour un chien doit certainement inclure des attributs olfactifs que nous sommes, en tant qu'espèce, incapables de percevoir*", Rosch, Simpson, & Miller, 1976, p. 429). Elle peut aussi varier d'une culture à l'autre et même d'un individu à l'autre selon l'emphase portée sur telle ou telle propriété, ou selon le degré de connaissance des objets à catégoriser.

La cognition, telle que théorisée par ce que Lakoff & Johnson (1999) nomment les sciences cognitives de première génération (voir Gardner, 1985/1993 pour un panorama global de cette période), est intrinsèquement liée à la conception classique des catégories. Les premiers balbutiements de l'intelligence artificielle (Newell & Simon, 1972), le fonctionnalisme en philosophie (Putnam, 1973 ; Fodor, 1975), la psychologie du traitement de l'information (Bruner, Goodnow, & G., 1956), la grammaire générative (Chomsky, 1957) ou encore la sémantique formelle (Montague, 1970) acceptent et justifient l'idée que la cognition consiste en la manipulation de symboles abstraits. Le substrat de cette manipulation, qu'il soit un cerveau humain ou un ordinateur, n'influence en rien les opérations cognitives réalisées par

¹Notre traduction.

ces manipulations de symboles, pour peu que les mêmes manipulations soient praticables par les différents substrats. Bien que les manipulations opérées sur les symboles ne répondent qu'à des contraintes syntaxiques, sans regard sur leur contenu, ces symboles n'en sont pas moins dépourvus de contenu : ils symbolisent des entités du monde, et ces entités sont des catégories. Par exemple, les symboles mentaux manipulés pour programmer la séquence d'actions permettant de remplir un verre avec une bouteille sont reliés aux catégories VERRE et BOUTEILLE. La conception classique des catégories est nécessaire pour envisager la cognition de cette manière, car il faut que les symboles représentent des entités du monde physique, et donc que les catégories aient un mode d'existence indépendant de toute composante psychologique. Or, Wittgenstein et Rosch nous ont justement appris que les catégories sont des constructions mentales, et non des entités du monde physique. La conception de la cognition en tant que manipulation de symboles abstraits n'est donc pas tenable et doit être abandonnée. Dans la section suivante, nous allons présenter une conception alternative née, entre autres, de la linguistique cognitive. Cette approche récuse l'idée que la cognition est indépendante de son substrat, insistant au contraire sur le rôle fondamental que joue notre corps. En plus d'être en accord avec les observations expérimentales, cette conception de la cognition fournit des explications sur les mécanismes engagés dans les processus de changements sémantiques.

3.1.5 Deux interprétations possibles de la nouvelle vision des catégories

Les résultats obtenus par Rosch, en particulier ceux concernant le gradient de typicalité qui caractérise la structure interne des catégories sont interprétables de

deux façons (Rosch, 1978 ; Lakoff, 1987 ; Taylor, 1989). La première de ces interprétations est historiquement la première à avoir été avancée par Rosch, bien que cette dernière l'ait finalement récusée (Rosch, 1978). Elle demeure néanmoins vivace (Kleiber, 1990). Partant des observations empiriques qui présentent des effets de typicalité, cette interprétation affirme que les catégories sont organisées autour d'un *prototype*, parfait représentant de la catégorie et porteur d'une typicalité maximale. L'appartenance et la typicalité sont définies en terme de similarité avec le prototype : pour qu'un objet appartienne à une catégorie définie par un prototype il faut qu'il en soit suffisamment similaire ; par ailleurs, plus un objet est similaire au prototype, plus il est typique de la catégorie. Le prototype peut être un des éléments de la catégorie, ou une idéalisation abstraite. Le pendant sémantique de cette théorie psychologique du prototype est désigné sous le terme de sémantique du prototype.

La seconde interprétation, qui constitue l'un des piliers de la linguistique cognitive, considère que les résultats empiriques exhibant un gradient de typicalité au sein des catégories sont des phénomènes de surface, des effets secondaires du fait que nous organisons notre savoir au moyen de structures encapsulant l'ensemble de nos connaissances relatives à un champ d'expérience.

Nous allons tour à tour passer en revue la sémantique du prototype et la linguistique cognitive, en nous arrêtant particulièrement sur leurs implications diachroniques

3.2 Sémantique du prototype

3.2.1 Catégorisation et sémantique

L'abandon de la conception classique n'est pas sans conséquence sur la sémantique. En effet, "*toute théorie de la catégorisation débouche inévitablement, à un endroit ou à un autre, sur une théorie du sens lexical*" (Kleiber, 1990, p. 58). Lorsque l'on adopte la vision prototypique, les implications sur le sens lexical opèrent à deux niveaux (Geeraerts, 1997) : d'une part au niveau des sens, les différents sens d'une unité polysémique formant une catégorie au sein de laquelle certains sont plus centraux que d'autres. D'autre part à l'intérieur des sens eux-mêmes, ces derniers étant des catégories de référents affichant un gradient de typicalité. Par exemple, le mot *fruit* est polysémique : son sens le plus central, ayant la plus grande typicalité, est celui de *fruit* en tant qu'aliment. Ce sens est organisé autour d'un prototype, duquel la pomme est proche ; un peu plus loin de du prototype on trouvera la fraise, et sans doute plus loin la noix de coco. Le mot *fruit* a d'autres sens ; encore relativement central est le sens biologique de *fruit*. Celui-ci est aussi organisé autour d'un prototype, mais différemment : la pomme n'est pas un fruit très typique car issu d'un ovaire infère et donc entouré du réceptacle floral. La tomate et le haricot vert sont en revanche, au sens biologique du terme, des fruits très typiques. La fraise par contre n'est pas un fruit ; les fruits du fraisier sont les akènes, les petits grains sombres à la surface des fraises. Enfin le mot *fruit* a des sens encore moins centraux, comme *fruit* en tant que progéniture ("*Vous fûtes le premier fruit de notre amour...*", Ponson du Terrail, 1859), ou bien *fruit* en tant que résultat d'une action ("*Était-ce possible de perdre, en un quart d'heure, le fruit d'un an de travail ?*", Zola, 1887), etc.

3.2.2 Implications diachroniques

Geeraerts (1997) a étudié, théoriquement et empiriquement, les conséquences diachroniques d'une sémantique lexicale axée sur la théorie du prototype. Le point de départ des réflexions de Geeraerts (1997) est l'identification de quatre propriétés d'une sémantique basée sur la théorie du prototype (toutes les catégories ne possèdent pas nécessairement les quatre propriétés) :

- (α) Les référents exhibent des degrés de typicalité.
- (β) Les différents sens d'une unité lexicale polysémique sont structurés par une ressemblance de famille, certains étant plus centraux.
- (γ) Il y a des fluctuations aux frontières des catégories de référents.
- (δ) Les sens ne peuvent être définis par une condition nécessaire et suffisante.

Ces propriétés se déploient selon deux dimensions (tableau 1.3) : d'un côté ces caractéristiques s'appliquent soit au niveau des référents (niveau extensionnel : α , γ), soit au niveau des sens (niveau intensionnel : β , δ). De l'autre, elles mettent l'accent soit sur l'inhomogénéité de la structure interne des catégories (gradient de typicalité : α , β), soit sur le problème de délimitation des frontières des catégories (pas de condition nécessaire et suffisante : β , γ).

Si l'on reprend l'exemple de *fruit*, la propriété (α) se manifeste par le fait que, dans l'acception de *fruit* en tant qu'aliment, la pomme est plus typique que la noix de coco. La propriété (β) transparait dans les similitudes entre les différents sens de *fruit* qui présentent une ressemblance de famille. La propriété (γ) traduit la sempiternelle question de savoir si, alimentaires, la tomate est un fruit plutôt qu'un légume. Quant à la propriété (δ), elle exprime le fait qu'il est vain de chercher un

	Niveau extensionnel	Niveau intensionnel
Gradient de typicalité	(α) Les référents exhibent des degrés de typicalité.	(β) Les sens sont structurés par des ressemblances de famille, certain étant plus centraux.
Pas de condition nécessaire et suffisante	(γ) Il y a des fluctuations aux frontières des catégories de référents.	(δ) Les sens ne peuvent être définis par une condition nécessaire et suffisante.

Tableau 1.3 – Propriétés des catégories sémantiques d’après Geeraerts (1997)

critère, une condition nécessaire et suffisante, permettant de répondre une bonne fois pour toutes si, oui ou non, la tomate est un fruit, alimentaires parlant.

Ayant identifié ces quatre propriétés, Geeraerts (1997) établit pour chacune d’entre elles une hypothèse quant à son influence sur les changements sémantiques.

- (ζ) La contrepartie diachronique de la propriété (α) est que le noyau prototypique des référents d’un des sens d’une unité lexicale peut changer.
- (η) La contre partie diachronique de la propriété (β) est que la structure synchronique des différents sens d’une unité lexicale reflète ses développements diachroniques.
- (θ) La contrepartie diachronique de la propriété (γ) est que l’incertitude quant aux frontières des sens d’une unité lexicale peut produire un phénomène de polygénèse sémantique.

- (*l*) La contrepartie diachronique de la propriété (δ) est que le savoir encyclopédique peut être à l'origine de développements sémantiques et qu'il est par conséquent impossible de dresser une démarcation entre sens linguistique et savoir encyclopédique.

L'hypothèse (ζ) stipule que l'ensemble des référents les plus typiques d'un des sens d'une unité lexicale peut varier au cours du temps. Pour illustrer son propos, Geeraerts (1997) présente une étude au cours de laquelle il a étudié les variations entre 1988 et 1992 des référents désignés par le néerlandais *legging* (les caleçons longs, fins et moulants pour femme, dont Geeraerts (1997) date l'apparition en 1987) en utilisant comme corpus des catalogues de vente par correspondance. Pour chaque vêtement appelé *legging* (ou bien *leggings* ou *caleçon*, des synonymes de *legging*), Geeraerts (1997) a relevé à partir des photos de catalogues six caractéristiques : sa longueur (au-dessus du genou, juste au-dessous du genou, ou long jusqu'à la cheville), sa largeur (moulant, près du corps ou ample), la présence ou non d'un pli, le type de tissu (un tissu doux et finement tissé, un tissu tissé plus épais, un tissu transparent, ou un autre tissu, comme de la toile de jean), sa fonction (vêtement à porter de jour de manière apparente ou bien élément de lingerie ou vêtement de nuit) et le sexe de la personne portant le vêtement. À partir de leur fréquence, Geeraerts (1997) a ainsi pu établir la typicalité de chaque configuration d'année en année. Pour les cinq années sur lesquelles porte l'étude, la configuration la plus fréquente est celle d'un *legging* long jusqu'à la cheville, moulant, sans pli, confectionné dans un tissu fin et doux, porté de jour de manière apparente et par une femme. Il en déduit que cette configuration était le prototype de la catégorie et calculé un score de déviation par rapport au prototype pour toutes les autres configurations (tableau 1.4).

Il ressort que d'année en année des configurations de plus en plus éloignées du

Année	Déviation							
	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
1988	38.9	44.4	16.17					
1989	52.4	19.0	23.8	4.8				
1990	31.9	38.3	21.3	6.4	2.1			
1991	47.8	30.1	14.0	4.8	1.6	1.1	0	0.5
1992	42.8	34.6	11.3	8.2	1.9	0.6	0.3	0.3

Tableau 1.4 – Fréquence de l'ensemble des configurations présentant une déviation donnée, année par année. D'après Geeraerts (1997).

prototype sont désignées par le terme *legging*. Cela a pour conséquence d'élargir le champ des configurations les plus typiques : les configurations présentant une déviation de 1, étaient en 1988 à la frontière de la catégorie, donc peu typiques. En 1991, ces mêmes configurations sont proches du prototype au regard des nouvelles configurations introduites entre temps. Elles ont donc gagné en typicalité, au fur et à mesure que le sens de *legging* s'élargissait. C'est le type de comportement prédit par l'hypothèse (ζ).

Si l'hypothèse (ζ) porte sur un des sens d'une unité lexicale, l'hypothèse (η) porte sur l'ensemble de ses sens, regardés comme un catégorie. Les différents sens qui forment cette catégorie exhibent une ressemblance de famille, et certains sont plus typiques que d'autres. Les développements diachroniques se font en prenant en compte les caractéristiques de cette catégorie. Comme exemple, Geeraerts (1997) donne les développements successifs du néerlandais *vergrijpen*, entre 1500 et 1900, sur la base des données historiques fournies par le *Woordenboek der Nederlandsche Taal* (Dictionnaire Historique du Néerlandais) (1.8 et 1.5).

Les différents développements de *vergrijpen* et les relations entre ses sens in-

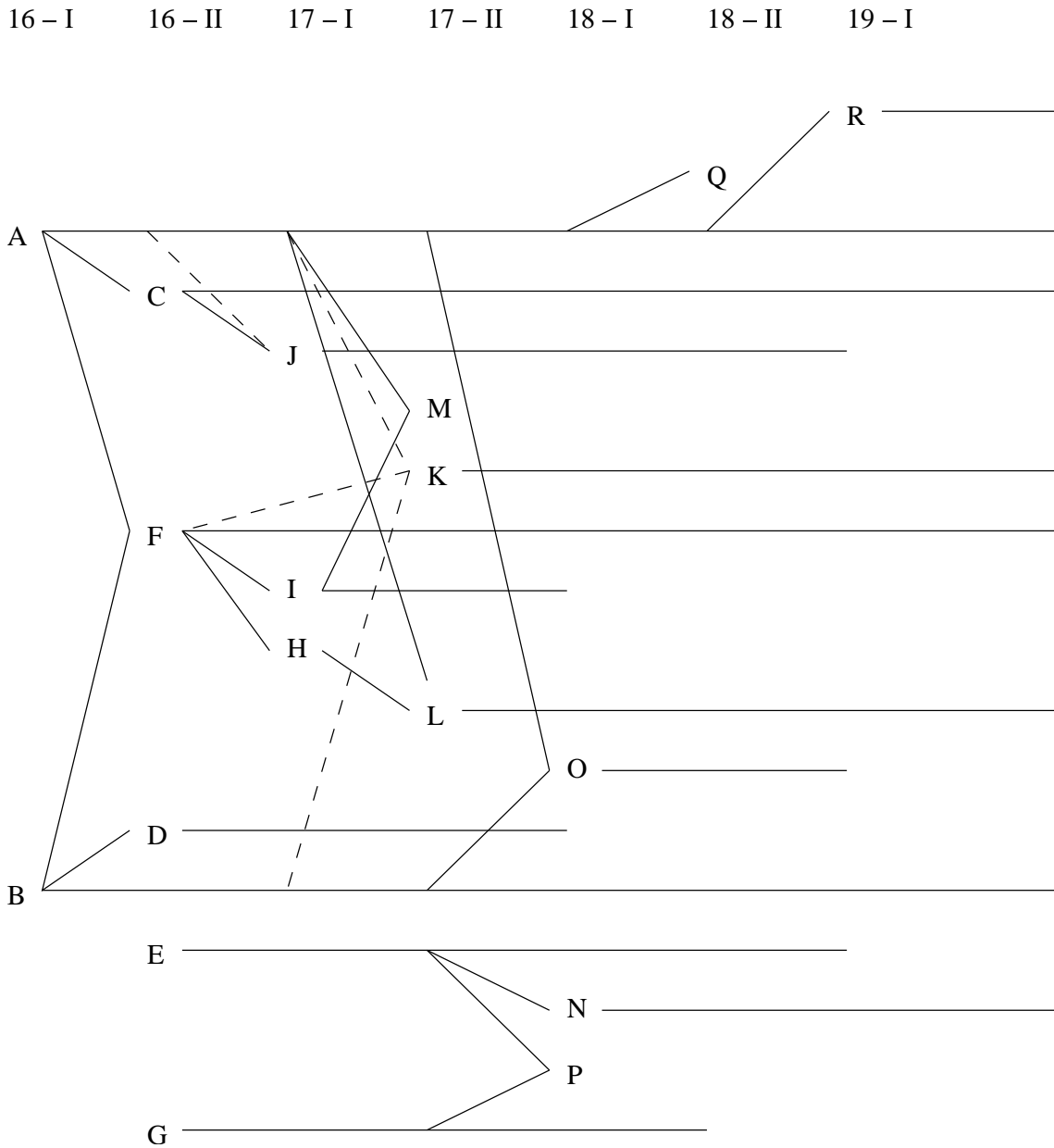


Figure 1.8 – Développements diachroniques de *vergrijpen*. Le décours temporel est discrétisé en demi-siècles, de la première moitié du 16^e siècle (16-I) à la première moitié du 19^e (19-I). Les gloses des labels A à R sont données par le tableau 1.5. Les lignes horizontales indiquent la persistance temporelle des sens. Les lignes obliques indiquent les rapports diachroniques qu'ils entretiennent, les lignes en pointillés indiquant des rapports plus faibles. D'après Geeraerts (1997).

Label	Glose
A	Utiliser la violence physique envers quelqu'un
B	S'opposer à quelqu'un à qui l'on doit respect et obéissance
C	Nuire à quelqu'un d'une manière non physique
D	S'opposer à un principe abstrait
E	Se tromper
F	Faire quelque chose d'interdit
G	Faire une erreur
H	Commettre un adultère
I	Faire quelque chose de déconseillé
J	Nuire à quelque chose d'une manière non physique
K	Voler
L	Bafouer l'honneur d'une femme
M	Boire ou manger excessivement
N	Se faire mal en saisissant quelque chose
O	Se rebeller violemment
P	Arrêter quelqu'un d'autre que le suspect recherché
Q	Se suicider
R	Endommager quelque chose

Tableau 1.5 – Gloses des labels de la figure 1.8.

diquent que ces derniers ne forment pas une catégorie classique. Tout d'abord, le fait qu'il soit possible qu'un nouveau sens soit issu de plusieurs anciens sens (F, J, K, L, M, O et P) indique que ceux-ci partagent des traits (le socle commun sur lequel se développe le nouveau sens) ; autrement dit la catégorie des sens est structurée par une ressemblance de famille. Ensuite, certaines nuances apparaissent mais ne se maintiennent que pendant une période restreinte (I, P, Q) : ces sens sont marginaux et peu typiques. Inversement, d'autres sens apparaissent plus centraux, et donc plus résistants au temps et plus productifs lors des changements sémantiques (A, B, F). Tous ces éléments sont le reflet diachronique du fait que la structure sémantique synchronique de *vergrijpen* est une catégorie non classique (et inversement, la structure

sémantique synchronique est une conséquence des développements diachroniques).

L'hypothèse (γ) prédit que, puisque les frontières des catégories sémantiques sont floues, des fluctuations à ces frontières peuvent se produire, dont une des manifestations est un phénomène que Geeraerts (1997) appelle *polygénèse lexicale* et par lequel un nouveau sens pour une unité lexicale peut apparaître plusieurs fois éphémèrement et de manière indépendante, à différentes époques. Comme exemples, Geeraerts (1997) cite plusieurs cas empruntés au néerlandais, comme *verduisteren* "devenir ou rendre sombre ; éclipser". On trouve ce mot dans le sens de "faire disparaître quelqu'un" dans les corpus des 16^e, 17^e et 18^e siècles. Après 200 ans d'abandon de ce sens, Geeraerts en a relevé une nouvelle utilisation par un chanteur néerlandais apparemment non influencé par les écrits de la Renaissance.

Enfin, l'hypothèse (ι) prédit qu'en l'absence de conditions nécessaires et suffisantes pour définir chacun des sens d'une unité lexicale, la distinction entre sens linguistique et savoir encyclopédique s'effondre, et que le savoir encyclopédique peut contribuer à la création de nouveaux sens. Geeraerts (1997) considère, entre autre, l'exemple tiré du néerlandais *kruipen* "ramper". Si parmi tous les déplacements auxquels peut référer *kruipen* une majorité sont des déplacements lents, on peut néanmoins très bien concevoir qu'il est possible de ramper rapidement. Si le sens de *kruipen* était une condition nécessaire et suffisante délimitant l'ensemble des déplacements auxquels *kruipen* peut référer, la vitesse du déplacement ne serait donc pas un critère définissant cette catégorie. Le fait que *kruipen* implique, dans la plupart des cas, se déplacer lentement, n'appartiendrait donc pas au sens linguistique de ce mot, mais au savoir encyclopédique. La vitesse de déplacement ne devrait donc pas intervenir dans les processus changements sémantiques, concernés par le sens. Or, *kruipen* a été l'objet du changement "ramper" > "se déplacer lentement". Il n'est

donc pas possible d'identifier le sens *kruipen* "ramper" à une condition nécessaire et suffisante. Celle-ci ne rendrait pas compte de la structure interne de la catégorie des référents. Néanmoins, au sein de celle-ci, bien qu'il soit possible de ramper rapidement, les déplacements lents forment un sous-ensemble plus saillant – ils sont plus typiques – à l'origine d'un changement sémantique. La structuration interne de la catégorie doit donc faire partie intégrante du sens, et la distinction entre sens linguistique et savoir encyclopédique n'a plus lieu d'être.

3.3 Linguistique cognitive

3.3.1 Structuration de notre système conceptuel

La linguistique cognitive a été érigée sur les ruines de la sémantique générative. Cette dernière, du fait de l'instabilité d'une partie de ses fondations (elle reposait sur la grammaire générative, une vision classique des catégories, ...) s'était effondrée face à l'épreuve de la validation empirique. Néanmoins, une autre partie de ses fondations (une vision du langage reposant sur l'ensemble de la cognition, la place de la sémantique au centre du langage, ...) se révèle aujourd'hui un socle solide sur lequel repose l'ensemble de l'édifice de la linguistique cognitive.

Plus qu'une entrée en matière historique à la linguistique cognitive, le paragraphe précédent se veut être un exemple pour illustrer les propos de Lakoff & Johnson (1980) : les métaphores sont omniprésentes dans le langage. Elles sont systématiques et cette systématisme nous apprend qu'elles ne sont pas juste des façons de parler, mais qu'elles reflètent directement le fonctionnement de la cognition : *"notre système conceptuel ordinaire, qui nous sert à penser et à agir, est de nature*

fondamentalement métaphorique" (Lakoff & Johnson, 1980, p. 13). Le paragraphe précédent regorge de métaphores : il y est dit que la linguistique cognitive est *érigée*, que la sémantique générative est en *ruines* car elle s'est *effondrée* à cause de l'instabilité de ses *fondations*, ... La toute dernière métaphore de ce paragraphe donne la clé permettant de saisir la systématité de ces métaphores : la linguistique cognitive est un *édifice*. Toutes ces métaphores ont comme source ce qui a trait au bâtiment, et toutes ont comme cible ce qui a trait à la linguistique cognitive ou à la sémantique générative. Ce qu'affirment Lakoff & Johnson (1980), c'est que toutes ces métaphores langagières sont des instances d'une opération métaphorique plus générale par laquelle l'ensemble du domaine conceptuel du bâtiment est projeté métaphoriquement sur le domaine conceptuel des théories scientifiques (Grady, 1997). Ce type de projection, la métaphore conceptuelle, est à la base de l'organisation de notre système conceptuel proposée par la linguistique cognitive.

Par *système conceptuel*, nous entendons la manière dont nos concepts sont organisés et la manière dont ils acquièrent une signification. Le concept est l'unité de base du système conceptuel. Il définit une catégorie et un mot possède un sens en vertu du fait qu'il est associé à un concept. Un mot polysémique est associé à plusieurs concepts. Un concept n'apparaît jamais isolément, mais est toujours saisi, ou *profilé* (Langacker, 1987), vis-à-vis d'un contexte qui encapsule le savoir présupposé par le concept. La littérature propose plusieurs outils théoriques pour rendre compte de ces structures : *frames* (Fillmore, 1982), *domaines* (Langacker, 1987), *modèles cognitifs idéalisés* (Lakoff, 1987), ... Toutes ces propositions théoriques ne sont pas strictement identiques, mais toutes constituent un contexte vis-à-vis duquel les concepts sont saisis (Clausner & Croft, 1999). Nous utiliserons le terme générique de *domaine* pour désigner ces structures contextuelles. Pour illustrer ce point,

prenons l'exemple du domaine temporel. Futur, passé et présent sont des concepts, mais ne peuvent être compris indépendamment les uns des autres. Ils doivent au contraire être appréhendés à travers le domaine temporel qui les structure le long d'un axe orienté.

Nous avons débuté cette section en montrant qu'un domaine peut être appréhendé en y projetant métaphoriquement un autre domaine. Les concepts du domaine source sont alors projetés sur les concepts du domaine cible (les fondations des bâtiments sont par exemple projetées sur les postulats des théories scientifiques). Ce type de projection est fondamental à la structuration de notre système conceptuel, car "*les métaphores nous permettent de comprendre un domaine d'expérience dans les termes d'un autre*" (Lakoff & Johnson, 1980, p. 127). Mais pour que ce processus de transfert de compréhension soit possible, encore faut-il que nous ayons au préalable une compréhension du domaine source. Il n'est pas possible d'envisager que tous les domaines de notre structure conceptuelle soient porteurs de sens par le seul processus de métaphore conceptuelle, car nous ferions alors face à une circularité, une récurrence infinie de métaphores, d'où nous ne tirerions aucune compréhension. Pour que la métaphore conceptuelle puisse être un mécanisme de transfert de compréhension, il est donc nécessaire de justifier une compréhension directe de certains concepts. Cette compréhension directe est rendue possible par ce qui constitue un des axiomes de la linguistique cognitive : notre activité mentale est inscrite dans notre corps (*embodied*), qui, en tant que média de nos interactions avec le monde extérieur, ancre dans notre système sensori-moteur notre compréhension de certains concepts (Lakoff & Johnson, 1980 ; Johnson, 1987 ; Lakoff, 1987 ; Lakoff & Turner, 1989 ; Langacker, 1987 ; Lakoff & Johnson, 1999 ; Lakoff & Núñez, 2000 ; Talmy, 2000 ; des idées similaires ont été proposées dans d'autres domaines que la linguistique).

tique : Merleau-Ponty, 1945 ; Varela, Thompson, & Rosch, 1991 ; Edelman, 1992 ; Damasio, 1994 ; Barsalou, 1999).

Ancrage corporel

Nous avons une compréhension directe des concepts concrets, c'est-à-dire directement appréhendables par notre système sensori-moteur. Parmi ceux-ci, se trouvent les concepts correspondant à des catégories de niveau de base : rappelons que pour ces catégories nous avons une perception gestaltique, la faculté de former et manipuler des images mentales et des programmes moteurs. Les concepts correspondants sont donc directement ancrés dans notre système sensori-moteur. Plus précisément, nous appréhendons le monde via notre corps, et ce corps, de par sa forme, ses fonctions, sa structuration, nous offre une vision du monde organisée autour des catégories de niveau de base. Ainsi, nous comprenons ces concepts car ils correspondent à notre expérience telle que nous la vivons à travers notre corps.

Nous avons aussi une compréhension directe des relations spatiales, du fait que notre système sensori-moteur nous permet de percevoir l'espace, et de nous y mouvoir. Johnson (1987) a introduit la notion d'image-schéma pour formaliser notre conceptualisation de l'espace. Les images-schémas, ou plus simplement schémas, sont les éléments sensori-moteurs basiques, correspondant à des expériences corporelles récurrentes de l'espace. Par exemple nous possédons une image-schéma CONTENANT. Nous conceptualisons en permanence des zones de l'espace comme des contenants :

Consider just a small fraction of the orientational feats you perform constantly in your daily activities—consider, for example, only a few of the many *in-out* orientations that might occur in the first few minutes of an ordinary day. You wake *out* of a deep sleep and peer *out* from

beneath the covers *into* your room. You gradually emerge *out* of your stupor, pull yourself *out* from under the covers, climb *into* your robe, stretch *out* your limbs, and walk *in* a daze *out* of your bedroom and *into* the bathroom. You look *in* the mirror and see your face staring *out* at you. You reach *into* the medicine cabinet, take *out* the toothpaste, squeeze *out* some toothpaste, put the toothbrush *into* your mouth, brush your teeth, and rinse *out* your mouth. At breakfast you perform a host of further *in-out* moves—pouring *out* the coffee, setting *out* the dishes, putting the toast *in* the toaster, spreading *out* the jam on the toast, and on and on ¹. (Johnson, 1987, pp 30-31)

L'ancrage corporel de ce schéma est d'autant plus profond que l'appréhension même de notre corps se fait au travers de ce schéma : nous comprenons notre corps comme un intérieur délimité de l'extérieur par une frontière. Nous avons une telle compréhension de notre corps car inspirer, expirer, manger, boire, déféquer, uriner, ... sont des activités récurrentes que nous vivons à travers notre corps, en impliquant une distinction entre intérieur et extérieur. Émanant directement de notre expérience corporelle, l'image-schéma CONTENANT est directement porteuse de sens pour nous. Un schéma est une entité structurée. Pour reprendre l'exemple du schéma CONTENANT, celui-ci est décomposable en un INTÉRIEUR, une FRONTIÈRE et un EXTÉRIEUR. Les images-schéma ont ceci de schématiques qu'elles ont juste une structure topologique. En tant que structures dont nous possédons une compréhension directe, les images-schémas nous permettent d'organiser notre structure conceptuelle : "la notion même de «structure» dans notre système conceptuel est caractérisée par des images-schémas"² (Lakoff & Johnson, 1999, p. 77). Nous disposons de nombreuses images-schémas pour structurer notre système conceptuel : CENTRE/PÉRIPHÉRIE, PARTIE/TOUT, SOURCE/CHEMIN/DESTINATION, HAUT/BAS,

¹ Afin de conserver toute la pertinence de l'exemple de Johnson, nous avons préféré lui épargner l'épreuve de notre traduction.

² Notre traduction.

DEVANT/DERRIÈRE, ... Toutes correspondent à des schématisations topologiques d'expériences corporelles récurrentes.

Soutiens empiriques de l'ancrage corporel

De nombreux résultats expérimentaux soutiennent l'hypothèse de l'existence de représentations directement ancrées dans les systèmes sensori-moteurs. Barsalou et son équipe ont utilisé des paradigmes de génération et de vérification de propriétés (Barsalou, Solomon, & Wu, 1999 ; Solomon & Barsalou, 2001 ; Kan, Barsalou, Solomon, Minor, & Thompson-Schill, 2003 ; Wu & Barsalou, 2003). Dans les paradigmes de génération de propriétés, un nom d'objet est présenté aux sujets, et il leur est demandé d'en lister les propriétés caractéristiques. Dans les tâches de vérification, un nom d'objet et des propriétés sont présentés, et il est demandé aux sujets de vérifier que chacune des propriétés s'applique à l'objet. Les objets utilisés sont typiquement des objets de niveau de base. Ces tâches nécessitent d'activer une représentation de l'objet. Solomon & Barsalou (2001) ont utilisé deux conditions pour vérifier l'hypothèse que les représentations sont sensori-motrices : d'une part une condition neutre, où il est simplement demandé aux sujets de lister ou de vérifier la présence des propriétés, et d'autre part une condition d'imagerie mentale, où il est explicitement demandé aux sujets de former une image mentale, c'est-à-dire de faire appel à leur système perceptif pour effectuer les tâches. Leurs résultats montrent que les performances sont identiques dans les deux conditions, suggérant que dans la condition neutre les sujets procèdent aussi par imagerie mentale sans que cela leur ait été explicitement demandé. Wu & Barsalou (2003) ont demandé à un groupe de sujets de lister des propriétés d'objets désignés par leur nom, et à un autre groupe de lister les propriétés des mêmes objets, mais présentés avec un qualificatif

modifiant leur apparence (ils ont par exemple présenté *pastèque* au premier groupe et *demi-pastèque* au second). L'hypothèse est que si la représentation mentale activée pour accomplir la tâche est de nature sensori-motrice, les propriétés cachées révélées par le qualificatif (comme les pépins des pastèques qui ne sont pas apparents, sauf si elle est coupée en deux) devraient être plus fréquemment citées par le groupe auquel l'objet est proposé avec un qualificatif. Leurs résultats confirment cette hypothèse.

Les expériences précédentes mettent l'accent sur la composante sensorielle des représentations mentales. Il a été montré que l'ancrage corporel possède aussi une composante motrice. Ainsi, Klatzky, Pellegrino, McCloskey, & Doherty (1989) ont montré que la compréhension d'actions manuelles décrites verbalement est facilitée si les sujets adoptent une position de la main congruente avec l'action décrite. De manière similaire, Tucker & Ellis (2001) ont fait effectuer à des sujets une tâche de catégorisation entre objets naturels (comme une pomme ou une fleur) et objets manufacturés (comme une clé ou un marteau). Pour fournir leurs réponses, les sujets utilisaient un dispositif constitué d'un cylindre qu'ils tenaient entre le majeur, l'annulaire et l'auriculaire, et la paume de main. Ce cylindre était surmonté d'un petit interrupteur qu'ils tenaient entre le pouce et l'index. Les réponses pouvaient être données soit par une pression franche du cylindre, soit par une pression fine de l'interrupteur. Le résultat important de cette étude est que les sujets catégorisaient plus vite l'objet si la manière dont il se manipule est congruente avec le type de pression à effectuer (une fleur et une clé se saisissent entre le pouce et le majeur et étaient donc catégorisées plus rapidement si leur catégorie était assignée à l'interrupteur, tandis que le marteau et la pomme se saisissent avec l'ensemble de la main et étaient donc catégorisés plus rapidement si leur catégorie était assignée au

cylindre).

Glenberg & Kaschak (2002) ont montré que les mouvements du bras sont aussi activés lors de la conceptualisation d'action. Lors de la vérification qu'une phrase telle que *Ouvre le tiroir* est sémantiquement correcte, la réponse est donnée plus rapidement si elle nécessite de rapprocher le bras du corps (dans la même direction que l'action de la phrase) que si elle nécessite de l'en éloigner.

Des programmes oculomoteurs sont aussi associés à la conceptualisation : Spivey & Geng (2001) ont enregistré les saccades oculaires de sujets en train d'écouter des descriptions de scènes. Les scènes étaient décrites en suivant une direction donnée, vers le haut, le bas, la gauche ou la droite. Par exemple, la description vers le haut relatait les activités des habitants d'un immeuble, étage par étage, et en partant du bas. Leurs résultats montrent un nombre significativement plus élevé de saccades dans la direction de la description de la scène, suggérant que la conceptualisation de la scène à une base oculomotrice.

Pulvermuller, Harle, & Hummel (2001) en électroencéphalographie (EEG), Hauk, Johnsrude, & Pulvermuller (2004) en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRFm) et Pulvermuller, Hauk, Nikulin, & Ilmoniemi (2005) en stimulation magnétique transcranienne (TMS) ont proposé des tâches de décision lexicale (où il est demandé aux sujets si une suite de lettres correspond à un mot de leur langue) sur des verbes engageant différentes parties du corps (*marcher, parler, saisir, ...*). Ils ont montré que chaque verbe activait la partie du cortex pré-moteur associée à la partie du corps qu'il engageait.

Métaphore conceptuelle

Nous avons vu que nous comprenons toute une partie de nos concepts par leur ancrage corporel. Mais il demeure toute une autre partie de nos concepts qui correspondent à des entités qui ne sont pas appréhendables par notre système sensorimoteur et dont nous n'avons donc pas de compréhension directe. Notre compréhension de ces concepts provient alors du mécanisme de métaphore conceptuelle. Reprenons l'exemple du temps déjà évoqué et dont la structuration métaphorique a été étudiée en détail (Lakoff & Johnson, 1980 ; Lakoff, 1993 ; Yu, 1998 ; Lakoff & Johnson, 1999 ; Boroditsky, 2000, 2001 ; Gentner, Imai, & Boroditsky, 2002 ; Boroditsky & Ramscar, 2002 ; Radden, 2004 ; Núñez & Sweetser, à paraître). Nous avons dit du domaine temporel qu'il structurait passé, présent et futur le long d'un axe orienté. Cette structuration est une projection métaphorique du domaine spatial. Nous ne percevons pas le temps directement mais nous le conceptualisons à partir de notre perception de l'espace : nous pouvons avoir du temps *devant* nous ou regarder *en arrière* pour contempler celui qui s'est déjà écoulé. Notre conceptualisation du temps est structurée à partir du schéma spatial DEVANT/DERRIÈRE. Le derrière est métaphoriquement projeté sur le passé, tandis que le devant est métaphoriquement projeté sur le futur. Les projections métaphoriques ne sont pas nécessairement universelles, et différentes cultures peuvent opter pour différentes métaphores conceptuelles (Radden, 2004). Le temps étant unidimensionnel et asymétrique, deux des trois schémas spatiaux sont disponibles : le schéma GAUCHE/DROIT étant, de par la nature de notre corps, symétrique, aucune culture ne conceptualise le temps selon cet axe (Clark, 1973 ; Traugott, 1978). En revanche, à la différence, entre autres, des langues occidentales, le Mandarin lexicalise le temps au travers d'une projec-

tion métaphorique du schéma HAUT/BAS (Yu, 1998) : le haut est métaphoriquement projeté sur le passé, tandis que le bas est métaphoriquement projeté sur le futur. Les variations culturelles de conceptualisation d'un domaine ne proviennent pas uniquement du domaine source. Elles peuvent aussi provenir de la manière dont le domaine source est projeté sur le domaine cible. Ainsi, en aymara, parlée en Bolivie (Miracle & Dios Yapita Moya, 1981 ; Núñez & Sweetser, à paraître), en toba, parlée en Argentine (Klein, 1987), et en malgache (Dahl, 1995), le domaine temporel est conceptualisé, comme dans les cultures occidentales, selon l'axe spatial DEVANT/DERRIÈRE, mais la projection métaphorique est différente : le devant est projeté sur le passé et le derrière sur le futur. Cette projection est motivée par le fait que le passé est connu, donc visible et devant nous, alors que le futur est inconnu, donc invisible et derrière nous.

Un domaine peut être conceptualisé par plusieurs métaphores, soit concurrentes, soit complémentaires. Par exemple, en mandarin, la structuration selon le schéma DEVANT/DERRIÈRE existe aussi, et est en compétition avec le schéma HAUT/BAS. Les schémas unidimensionnels DEVANT/DERRIÈRE ou HAUT/BAS ne sont pas suffisants pour une conceptualisation complète du temps, car ils sont statiques. Or, lorsque nous souhaitons conceptualiser la succession temporelle des événements, il est nécessaire d'introduire une notion de mouvement au domaine temporel. Cela se fait par la projection du schéma SOURCE-CHEMIN-DESTINATION sur le domaine temporel. Cette projection peut se faire de deux façons différentes : soit ce schéma s'applique aux événements qui jonchent le temps (les événements viennent du futur, passent par le présent pour aller dans le passé – par exemple *la fin de la semaine approche*) et nous parlerons alors de conceptualisation *événement-centrée*, soit il s'applique à nous (nous venons du passé et passons par le présent pour aller

dans le futur – par exemple *nous approchons de la fin de la semaine*) et nous parlerons d'une conceptualisation *égo-centrée*. Des variations interculturelles peuvent aussi provenir des rapports de forces entre des conceptualisations concurrentes. Les exemples ci-dessus montrent que les conceptualisations *égo-centrée* et *événement-centrée* coexistent en français. Néanmoins un locuteur français interprétera toujours la phrase *le rendez-vous de mercredi a été avancé de deux jours* selon la conception *événement-centrée* : le mouvement est celui des événements, donc en provenance du futur et en direction du passé, et le rendez-vous a donc lieu le lundi. En revanche, en anglais, où les deux conceptualisations coexistent aussi, les rapports de forces ne sont pas les mêmes. Ainsi, la phrase *The meeting has been moved forward two days* est ambiguë car elle peut être interprétée selon les deux conceptualisations : le meeting peut avoir lieu le lundi comme le vendredi.

Soutiens empiriques de la métaphore conceptuelle

L'idée que nous conceptualisons les domaines abstraits, non directement accessibles par notre système sensori-moteur, par le biais de métaphores conceptuelles est soutenue par des résultats empiriques. Par exemple, notre conceptualisation du temps a été expérimentalement étudiée (Boroditsky, 2000, 2001 ; Gentner et al., 2002). Une des expériences effectuées par Boroditsky (2000) consistait à présenter à chaque sujet un questionnaire de deux pages. Sur la première étaient présentés quatre dessins. Les quatre dessins représentaient des situations spatiales soit *égo-centrées* (un personnage qui se déplace parmi des objets) soit *objet-centrées* (l'équivalent spatial de conceptualisation temporelle *événement-centrée*). Pour chaque sujet, les quatre dessins étaient du même type. Chaque dessin était assorti d'une phrase descriptive, et les sujets devaient répondre si oui ou non la phrase décrivait le dessin.

Les dessins de la première page servaient d'amorce à la question temporelle posée aux sujets sur la seconde page. Cette question était ambiguë, pouvant amener deux réponses différentes selon la conceptualisation temporelle utilisée, égo-centrée ou événement-centrée. Les résultats montrent que 70% des sujets répondaient de manière congruente avec l'amorce, montrant ainsi que les métaphores conceptuelles façonnent notre appréhension des champs de la réalité pour lesquels notre corps ne nous offre pas de saisie directe.

Nous avons décrit au cours des dernières sections la structuration de notre système conceptuel telle que la linguistique cognitive la conçoit. Nous allons à présent nous pencher sur la manière dont cette structuration peut rendre compte des changements sémantiques.

3.3.2 Changements sémantiques et métaphore conceptuelle

Sweetser (1990) a démontré que le mécanisme de métaphore conceptuelle était aussi à l'œuvre dans les changements sémantiques. Sweetser a, entre autre, analysé l'extension du sens des verbes de perception vers d'autres domaines dans les langues indo-européennes. Sa conclusion est que "*the internal self is pervasively understood in terms of the bodily external self, and hence described by means of vocabulary drawn (either synchronocally or diachronically from the physical domain*" (*ibid.* p. 45) : lorsque le sens d'un verbe de perception est étendu vers un autre domaine, il l'est vers le domaine mental, et toutes ces extensions sont guidées de manière systématique par une même métaphore conceptuelle. Cette métaphore est structurée, chaque modalité perceptuelle se projetant sur un des aspects de la vie mentale :

- La vue se projette métaphoriquement sur le versant objectif et intellectuel de

la vie mentale, sur l'intellect, le savoir. Par exemple :

proto indo-européen **weid-* "voir"

> grec ancien *ειδου* "voir", parfait *οιδα* "savoir" > ang. *idea* "idée"

> ang. *wise* "sage, avisé" ; ang. *wit* "intelligence, bon sens"

> irlandais *fios* "savoir, connaissance"

- L'ouïe se projette métaphoriquement sur le versant social de la vie mentale, sur la communication et ses conséquences ainsi que sur l'obéissance. Par exemple :

proto indo-européen **k'leu-s-* "entendre"

> gr. anc. *κλυω* "entendre, écouter, être réceptif, prêter attention"

> ang. *listen* "écouter, prêter attention"

> danois *lystre* "obéir"

- Le goût se projette métaphoriquement sur le versant des préférences personnelles. Par exemple, synchroniquement, fr. *goût* "saveur, penchant" ; ang. *taste* "saveur, penchant".

- Le toucher se projette métaphoriquement sur le versant émotionnel de la vie mentale. Par exemple :

gr. anc. *πασχω* "souffrir physiquement" > "éprouver une sensation"

lat. *pati* "souffrir physiquement"

> lat. tardif *passio* "souffrance, passion" > fr. *passion* (Buck, 1949)

- L'odorat ne semble pas être source d'extension sémantique, comme l'avait déjà noté Williams (1976) et Viberg (1983).

Sweetser (1990) justifie ces différentes projections en argumentant que nous avons des expériences similaires entre les domaines perceptuels sources et les domaines mentaux cibles correspondants. De ce fait, ces derniers, abstraits, sont conceptualisés via les premiers dont nous avons une compréhension directe. Ainsi, de tous

nos sens, la vue est celui pour lequel notre contrôle attentionnel est le plus précis, et "*la capacité d'identifier à volonté un stimulus parmi d'autres est une caractéristique saillante de la vue et de la pensée, mais certainement pas une caractéristique d'aucun autre sens, à l'exception de l'ouïe. Mais même l'ouïe est dirigée moins consciemment et moins facilement que la vue – Je peux littéralement déplacer mes yeux d'un objet à l'autre, alors qu'il demande un sérieux effort de prêter attention à un stimulus auditif parmi d'autres*" (ibid. p. 38). Par ailleurs, ce parallèle entre vue et objectivité transparaît aussi dans le fait que la vue est identique pour des personnes différentes. Deux individus ayant la même position partagent le même point de vue, que ce soit physiquement ou intellectuellement. Enfin, la vue est un sens permettant de percevoir à distance, et l'objectivité est conceptualisée comme une prise de distance par rapport aux faits. À l'inverse, le goût et le toucher sont des sens de contact et sont donc liés aux aspects subjectifs de notre vie mentale. La saillance des propriétés hédoniques des stimuli gustatifs ainsi que la variété inter-individuelle dans les préférences alimentaires lient le goût à nos penchants personnels. Enfin, la projection du toucher vers le domaine émotionnel émane directement des manifestations physiques des émotions.

L'ouïe est le sens principal par lequel nous établissons la communication et par conséquent nos interactions sociales. Aussi, "*il est naturel que la réception auditive physique soit liée à notre capacité à prêter attention, à notre 'réceptivité' interne, et par conséquent à l'obéissance*" (ibid., p. 41). L'ouïe partage néanmoins un certain nombre de points communs avec la vue : si le contrôle attentionnel sur l'ouïe est moins puissant que celui sur la vue, il n'en est pas moins réel et, comme la vue,

¹Notre traduction

²Notre traduction.

l'ouïe permet de percevoir à distance. Les résultats de Evans & Wilkins (2000) qui ont pratiqué une analyse similaire à celle de Sweetser (1990), mais basée sur les langues australiennes, ne sont donc pas surprenants. Il ressort de leur analyse que dans les langues australiennes, si les verbes de perception auditive peuvent développer des sens tels que "prêter attention" ou "obéir (par exemple : lardil *merri* "entendre, écouter, obéir, prêter attention"), ils développent aussi fréquemment des sens dans le domaine de l'intellect (par exemple : warluwarra *rlari-* "entendre, écouter, comprendre, penser" ; avec réflexivisation : mayali *bekkan* "écouter, entendre", *bekkrren* "considérer, réfléchir avant de prendre une décision"). À l'inverse, les verbes de perception visuelle développent rarement des sens vers l'intellect, mais fréquemment vers le domaine social (par exemple : kayardild *kurrija* "désirer sexuellement, regarder avec désir, choisir une épouse" ; tyemeri *nginnyinggin* "voir" , *tisit nginnyinggin* "être jaloux de quelqu'un – *tisit* ne se trouve que dans cette construction). Evans & Wilkins (2000) justifient ces divergences par des différences culturelles dans l'utilisation des modalités perceptives. En particulier, le mode de conversation dans les communautés aborigènes est caractérisé par le fait que le locuteur ne s'adresse généralement pas à une personne en particulier, mais à l'ensemble de la communauté, chaque membre étant libre de s'engager ou de se désengager la conversation à tout moment, exerçant ainsi un contrôle attentionnel actif de sa perception auditive. Par ailleurs, les normes européennes de contact visuel sont perçues négativement, et fixer quelqu'un du regard peut être interprété comme une offense ou un désir sexuel. Enfin, Evans & Wilkins (2000) mettent en avant la tradition orale de la culture aborigène. Le savoir est transmis par des contes et des chansons, et, par exemple, "*connaître un lieu et sa localisation*" signifie "*avoir entendu les chansons*

et les histoires relatives à ce lieu¹" (*ibid.* p. 550). En contrastant le modes de transmission du savoir des cultures à tradition orale avec celui des cultures à tradition écrite, il est possible de penser que "les extensions de 'voir' vers 'penser' et 'savoir' sont donc plus probables dans les cultures à tradition écrite, et, inversement, que les développements à partir de 'entendre' seraient caractéristiques des cultures privilégiant une tradition orale, reflétant le rôle indiscutable de la transmission orale dans l'acquisition du savoir²" (*ibid.* p. 585). Les aspects les plus fondamentaux des différentes cultures façonnent l'appréhension du monde de leurs membres au travers de conceptualisations métaphoriques différentes et influent de cette façon sur les trajectoires suivies par les changements sémantiques.

3.3.3 Métonymie

Si la notion de domaine, structure conceptuelle emmagasinant notre savoir encyclopédique, fournit un cadre permettant de rendre compte des métaphores, elle permet aussi d'appréhender les processus cognitifs qui sous-tendent de l'autre procédé majeur exerçant dans les changements sémantique : la métonymie. Radden & Kövecses (1999) définissent la métonymie comme "*un processus cognitif par lequel une entité conceptuelle, le véhicule, fournit un accès mental à une autre entité conceptuelle, la cible, au sein du même modèle cognitif idéalisé*³". Si les métaphores conceptuelles reposent sur la mise en correspondance des éléments de deux domaines, les métonymies conceptuelles impliquent deux éléments d'un même domaine, l'un d'eux pouvant être le domaine lui même :

¹Notre traduction.

²Notre traduction.

³Notre traduction. Les *modèles cognitifs idéalisés* sont les constructions théoriques de Lakoff (1987) correspondant ce que nous appelons ici *domaine*.

(1.1) Le jambon-beurre attend l'addition

(1.2) Le vélo de Pierre est crevé

Dans l'exemple 1.1, la cible de la métonymie, le client, comme le véhicule, la commande du client, sont deux éléments du même domaine RESTAURANT. Dans l'exemple 1.2 la cible, le pneu, est une partie du domaine VÉLO, qui constitue aussi le véhicule de la métonymie.

La métonymie procède en attirant l'attention de l'interlocuteur qui réceptionne le message sur un aspect saillant du domaine (un point de référence Langacker, 1993), le véhicule, et en lui laissant le soin d'inférer la cible de la métonymie. De fait, *"une expression métonymique bien choisie nous permet de mentionner une entité qui est saillante et aisément encodable, qui par conséquent évoque – essentiellement automatiquement – une cible qui est soit de moindre intérêt ou plus difficile à nommer"*¹(Langacker, 1993, p. 30). Il y a de fait une dimension pragmatique (Grice, 1975 ; D. Sperber & Wilson, 1986) inhérente à la métonymie – comme à tous les tropes, métaphore incluse – qui est un outil conceptuel et linguistique dédié à rendre la communication plus efficace. La plus part des métonymies sont donc des créations *ad hoc* et éphémères, sans conséquences diachroniques. Un premier pas vers un changement sémantique intervient lorsque les implicatures portées par une métonymie deviennent conventionnelles sans pour autant être lexicalisées (Koch, 2004). Les exemples 1.1 et 1.2 sont de ce type : ces métonymies ne sont pas nouvelles et éphémères mais au contraire répandues dans la population (du moins dans la population des serveurs et serveuses pour l'exemple 1.1), mais il est néanmoins difficile de soutenir que jambon-beurre et vélo sont polysémiques et ont respectivement comme sens "client ayant commandé un sandwich jambon-beurre" et "pneu". Néanmoins ce

¹Notre traduction.

premier pas ouvre la voie un second par lequel le nouveau sens créé par métonymie est lexicalisé : on peut alors de parler de changement sémantique. L'exemple 1.1 illustre aussi ce dernier stade : *addition* "somme ; note".

4 Conclusion

Ce chapitre a dressé un historique des recherches sur les changements sémantiques. Non exhaustif, il a illustré trois traditions que nous avons dégagées dans l'étude des changements sémantiques. La tradition taxonomiste, historiquement la première, a été essentiellement foisonnante entre la fin de 19^e siècle et le milieu du 20^e. Elle rassemble des travaux dont l'objectif était de dégager des mécanismes récurrents dans les changements sémantiques. Cette tradition culmine avec la synthèse d'Ullmann (1951/1957, 1952/1965, 1962/1967), qui identifie quatre mécanismes, l'étymologie populaire, l'ellipse, la métaphore et la métonymie, tout en soulignant la prime importance des deux derniers, depuis retenus comme les deux mécanismes majeurs de changements sémantiques (Sweetser, 1990 ; Nerlich, 1992 ; McMahan, 1994 ; Wilkins, 1996 ; Bartsch, 2002 ; Györi, 2002 ; Traugott & Dasher, 2002 ; Haser, 2003).

Le structuralisme qui met en avant la synchronie par rapport à la diachronie, le behaviorisme qui exclut du champ scientifique toute entité mentale, et le générativisme qui met la syntaxe au cœur du langage et relègue la sémantique à un rôle mineur, sont trois courants ayant contribué à un déclin des recherches sur les changements sémantiques pendant plusieurs décennies. Un renouveau s'est opéré dans les années 1970, que nous avons identifié sous le nom de tradition typologique. En sus des métaphores et des métonymies, les recherches appartenant à cette tradition ont mis en lumière de nouvelles régularités dans les changements sémantiques : ces

recherches ont mis en évidence des changements parallèles au sein des langues, en étudiant des champs sémantiques plutôt que des mots pris isolément, mais aussi des changements parallèles entre les langues, en menant des études trans-linguistiques (Williams, 1976 ; Viberg, 1983).

La troisième tradition regroupe des recherches effectuées dans le cadre de la linguistique cognitive. Alors que les deux précédentes ont produit des résultats descriptifs, la linguistique cognitive a permis d'avancer des processus cognitifs sous-tendant les changements sémantiques (Lakoff & Johnson, 1980 ; Sweetser, 1990).

Bien que les quelques 150 années de recherche sur les changements sémantiques aient conduit à des avancées théoriques importantes, les procédés méthodologiques paraissent immuables : observation des manifestations synchroniques des changements sémantiques à l'intérieur d'une langue (les patterns de polysémie ; par exemple, Evans & Wilkins, 2000) ou d'une famille de langue (ensemble de cognats ; par exemple, Sweetser, 1990, chapitre 2), et, le cas échéant, recherche dans des corpus des développements sémantiques (Geeraerts, 1997). Les prochains chapitres de cette thèse vont s'attacher à montrer que d'autres approches sont possibles pour étudier les changements sémantiques, en présentant trois approches très différentes les unes des autres, s'appliquant à des profondeurs historiques différentes.

CHAPITRE II

Changements sémantiques et sociolinguistique variationniste

NOUS AVONS exposé à la section 2.1.2 les travaux de Trier (1931) sur l'évolution de la structuration du champ sémantique de la connaissance en allemand entre 1200 et 1300. Trier a montré qu'entre ces deux dates la manière dont l'allemand lexicalise la connaissance a été profondément modifiée. Mais les travaux de Trier ne détaillent pas le décours temporel de cette restructuration : ils présentent l'état initial et l'état final, sans spécifier les étapes intermédiaires. Ce chapitre présente une étude que nous avons réalisée afin d'observer les restructurations en cours de réalisation en français dans le champ sémantique autour du mot *maison*.

La sociolinguistique variationniste, initiée par les recherches de Labov (1963,

1966), a apporté un arsenal conceptuel et méthodologique, basé sur la variabilité inter-individuelle, permettant l'observation des changements linguistiques en cours de réalisation. La première partie de ce chapitre sera un bref exposé de ce champ de la linguistique visant à introduire les notions utilisées dans notre étude. La sociolinguistique variationniste a débuté par l'étude de changements phonologiques (Labov, 1963, 1966), mais s'est aussi ouverte aux changements syntaxiques (Cornips & Corrigan, 2005) et morphologiques (King, Nadasdi, & Butler, 2004). En revanche, à notre connaissance, les changements sémantiques n'ont encore jamais été étudiés sous l'angle de la sociolinguistique variationniste. Une des raisons en est peut-être la difficulté d'objectiver la variabilité inter-individuelle des représentations sémantiques. L'étude que nous présentons dans ce chapitre réalise cette étape d'objectivisation en employant une méthode mise au point par Romney et ses collaborateurs (Romney, Boyd, Moore, Batchelder, & Brazill, 1996 ; Romney, Moore, & Rusch, 1997 ; Moore, Romney, & Hsia, 2000 ; Romney, Moore, Batchelder, & Hsia, 2000), qui sera décrite dans la seconde partie. La troisième partie de ce chapitre présentera notre étude proprement dite.

1 Variabilité linguistique et changement linguistique

1.1 Martha's Vineyard

Martha's Vineyard est une île des États-Unis, située à cinq kilomètres au large du sud-ouest de la Nouvelle-Angleterre. Sept fois plus peuplée l'été que l'hiver, Martha's Vineyard est une destination appréciée des touristes, mais où se perpétue aussi un mode de vie rural basé sur l'industrie traditionnelle de la pêche. Ces deux activités sont distinctement réparties : tandis que l'est de l'île, nommé *down-island*, est la région où se concentre l'essentiel du tourisme, les pêcheurs ruraux en peuplent l'ouest, *up-island*. Telle était du moins la situation sur Martha's Vineyard en 1961, quand Willam Labov y fût l'un des visiteurs estivaux et y étudia la variabilité phonétique présente au sein du dialecte de l'île.

Un des aspects qui différencie le dialecte de Martha's Vineyard du dialecte continental voisin est l'élévation du premier élément des diphtongues /aj/ et /aw/. Alors que ces diphtongues sont prononcées respectivement [aI] et [aʊ] dans le sud-est de la Nouvelle-Angleterre, sur l'île de Martha's Vineyard elles ont tendance à être centralisées, c'est-à-dire prononcées [ɐI] et [ɐʊ], voire [əI] et [əʊ]. Labov a enregistré les interviews de 69 résidents permanents de l'île, soit un peu plus de 1% de la population d'alors. À partir de ces enregistrements, Labov a déterminé pour chacune

des personnes qu'il avait interrogées un indice de centralisation, représentant la propension à élever le premier élément des diphtongues /aj/ et /aw/. Puis il a cherché à établir des relations entre les indices de centralisation et différents facteurs tels que l'âge, le lieu d'habitation, le métier des locuteurs, etc. Le tableau 2.1 donne l'indice de centralisation en fonction de l'âge.

Age	/aj/	/aw/
75-	25	22
61-75	35	37
46-60	62	44
31-45	81	88
14-30	37	46

Tableau 2.1 – Indices de centralisation des diphtongues /aj/ et /aw/ par les habitants de Martha's Vineyard en fonction de leur âge. L'indice est compris entre 0 (aucune centralisation) et 300 (centralisation maximale et systématique). D'après Labov, 1972.

Si on laisse pour le moment de côté les locuteurs âgés entre 14 et 30 ans, les résultats de Labov indiquent que plus les locuteurs sont jeunes, plus ils ont tendance à centraliser les diphtongues. Deux explications sont possibles : soit les habitants de Martha's Vineyard modifient leur manière de parler en vieillissant, cessant de centraliser les diphtongues, soit ils ne modifient pas leur manière de parler, et ces résultats reflètent la diffusion d'un changement en cours.

D'autres variables que l'âge sont liées à la centralisation des diphtongues par les habitants de Martha's Vineyard : la centralisation est plus élevée chez les pêcheurs que chez les habitants travaillant dans l'industrie du tourisme. Elle est aussi plus élevée chez les habitants de *up-island* que chez ceux de *down-island*. Enfin, plus crucialement, Labov a dégagé de ses interviews l'attitude des locuteurs vis-à-vis du développement du tourisme, et de la disparition progressive concomitante du mode

de vie traditionnel basé sur la pêche, entraînant un appauvrissement des familles des pêcheurs. La centralisation est plus élevée chez ceux des habitants regrettant cette situation et revendiquant un mode de vie traditionnel que chez ceux acceptant la modification du fonctionnement économique de l'île et prêts à abandonner sans regret les dures conditions de vie des pêcheurs. Labov a par ailleurs complété ses observations avec les données fournies par *the Linguistic Atlas of New England* (LANE) (Kurath, 1939-1943). Le LANE décrit le dialecte de Martha's Vineyard à partir d'interviews réalisées en 1933 de quatre locuteurs âgés de 56 à 82. À partir des informations fournies par le LANE, Labov a déterminé pour ces locuteurs des indices de centralisation moyens de 0.86 pour /aj/ et de 0.06 pour /aw/. En rassemblant toutes ces informations, Labov a proposé un panorama complet du processus linguistique en cours sur l'île de Martha's Vineyard. La centralisation de /aj/ était une caractéristique du dialecte de Martha's Vineyard sur le déclin. Lorsque s'est développée dans les années 40 l'industrie du tourisme sur l'île, la population rurale des pêcheurs a entrepris un repli identitaire qui s'est manifesté linguistiquement par la volonté – inconsciente – de préserver les spécificités dialectales de l'île. Le déclin de la centralisation de la diphtongue /aj/ a alors été enrayé et la tendance inversée. La diphtongue /aw/ a suivie une évolution parallèle sous l'influence du zèle des populations rurales à marquer leur identité.

Toutes les observations de Labov soutiennent ce scénario : il rend compte du fait que la centralisation est plus élevée chez les pêcheurs et dans les zones rurales. Il rend aussi compte des variations de la centralisation en fonction de l'âge, sauf, *a priori*, pour les locuteurs âgés entre 14 et 30 ans. Mais Labov a interrogé ces locuteurs sur leurs perspectives d'avenir, et a montré que ceux qui envisageaient de quitter l'île pour fuir la ruralité avaient un faible indice de centralisation, tandis

que ceux qui revendiquaient leur appartenance à cette communauté avaient un fort indice de centralisation. À la différence de leurs aînés, les jeunes locuteurs désirant quitter l'île n'avaient pas encore eu l'occasion de le faire, et, ayant peu tendance à centraliser les diphtongues, abaissaient l'indice de centralisation moyen de cette tranche d'âge.

1.2 Hypothèse du temps apparent

Pour conclure à un changement dans une langue, il faut être en mesure de comparer deux états de la langue correspondant à deux époques différentes, et constater une différence entre ces deux états. La méthode la plus naturelle, la seule employée avant les travaux de Labov, et encore largement utilisée aujourd'hui, consiste à comparer deux descriptions d'une langue réalisées à deux époques différentes. Les études suivant cette méthode sont dites en *temps réel*. La richesse des travaux de Labov est d'avoir proposé une méthode alternative, basée sur l'hypothèse que des locuteurs d'âges différents représentent la langue à différentes époques : comparer deux locuteurs d'une même langue ayant trente ans d'écart équivaut à comparer deux descriptions de cette même langue réalisées à trente ans d'écart. Autrement dit, la diachronie est observable dans les variations synchroniques. La justification de cette hypothèse est que la langue est principalement acquise durant l'enfance, et qu'un locuteur change peu sa manière de parler par la suite. Cette hypothèse est forte, mais sa validité est confortée par des études en temps réel qui confirment des résultats auparavant obtenus en temps apparent (Labov, 1994 ; Milroy & Gordon, 2003).

Les changements observables en temps apparent sont, du fait des échelles tempo-

relles, plus subtils que les changements observables en temps réel sur de longues périodes de temps. Les changements observés par Labov sur l'île de Martha's Vineyard sont des changements de fréquences allophoniques plus que des changements phonologiques. À notre connaissance, aucune étude des changements sémantiques en temps apparent n'a jamais été réalisée. Une raison possible de cette absence pourrait être la difficulté de mesurer la faible variabilité sémantique que l'on s'attend à observer. Nous proposons de mesurer cette variabilité, et pour cela nous utilisons des méthodes importées de l'anthropologie.

2 Variabilité inter-générationnelle du champ sémantique autour de *maison*

2.1 Inférence de structures sémantiques

Une des questions posées par l'anthropologie rejoint les préoccupations de la typologie linguistique et concerne l'existence, ou non, d'universaux dans les représentations culturelles des sociétés. Pour aborder cette question, Romney et al. (2000) ont développé une méthode permettant de quantifier les similarités et les différences de représentation d'un champ sémantique donné entre deux cultures. Cette méthode a été appliquée avec succès pour exhiber le consensus culturel de la représentation des liens de parenté en anglais américain (Romney et al., 1996), les différences entre les cultures américaine et japonaise quant aux représentations sémantiques des émotions (Romney et al., 1997) et la similarité culturelle de la représentation des couleurs entre les américains et les taiwannais (Moore et al., 2000).

Leur méthode est la suivante : la première étape consiste à recueillir auprès de membres des cultures étudiées des jugements de similarité sémantique entre les N_t termes du champ sémantique étudié. Pour chacun des N_s sujets est construite une matrice (symétrique) de taille $N_t \times N_t$ consignant leurs jugements de simi-

larité. Ces N_s matrices sont empilées de manière à construire une matrice de taille $(N_s \cdot N_t) \times N_t$ à laquelle est appliquée une analyse en composante principale (ACP). Cette ACP permet d'obtenir, pour chaque sujet, les coordonnées pour chaque mot dans un espace euclidien dont les dimensions portent une quantité d'information décroissante. La structure sémantique de chaque sujet est donc caractérisée par les emplacements des N_t termes dans cet espace. Empiler les matrices avant d'effectuer une seule ACP, plutôt que d'effectuer N_s ACP sur chacune des matrices représentant les réponses des sujets, permet que les structures sémantiques des N_s sujets soient définies dans le même espace, plutôt que dans N_s espaces différents. Il est donc possible de comparer statistiquement les structures sémantiques des sujets afin de déceler les similarités et les différences qui existent entre les cultures.

Plutôt que d'appliquer cette méthode à des sujets provenant de deux cultures différentes, nous l'avons appliquée à des sujets provenant de deux générations différentes sur le champ sémantique autour du mot *maison*, afin d'en étudier l'évolution en temps apparent.

2.2 Matériel et méthode

2.2.1 Sujets

Les sujets sont répartis en deux groupes, G_1 et G_2 . Le groupe G_1 se compose de 47 sujets (dont 36 femmes, soit 76.6%) âgés en moyenne de 21 ans (± 1.4 , min=17, max=26) et le groupe G_2 de 16 sujets (dont 11 femmes, soit 68.8%) âgés en moyenne de 56 ans (± 3.1 , min=49, max=63). Les deux groupes diffèrent donc par l'âge des sujets ($p < 0.0001$). Pour s'assurer que les résultats sont attribuables

à cette différence d'âge et non à une différence de connaissance de la langue, il leur était aussi demandé d'indiquer le nombre de pages en français qu'ils lisaient quotidiennement. Les moyennes sont de 39.1 pour le groupe G_1 et de 25.2 pour le groupe G_2 . Cette différence n'est pas significative ($p > 0.3$).

2.2.2 Synonymes

Quatre-vingt-dix-sept synonymes de *maison* ont été obtenus à partir du dictionnaire électronique des synonymes du laboratoire CRISCO¹. Nous avons conservé les vingt synonymes dont les fréquences données par le *Trésor de Langue Française* ont le plus évolué entre les première et seconde moitiés du 20^e siècle. Ces fréquences sont données au Tableau 2.2. Un prétest a montré que les synonymes de *maison* correspondant aux sens identifiés par le *Trésor de Langue Française* comme un "ensemble des personnes chargées du service domestique d'une maison" et un "ensemble des personnes formant une lignée, une dynastie" n'étaient pas identifiés comme synonymes par les sujets, ces sens étant trop désuets. Les synonymes correspondant à ces sens ont donc été exclus de l'étude. Les vingt synonymes sélectionnés ont été : *case, chalet, château, chaumière, clinique, construction, entreprise, établissement, firme, habitation, hôpital, immeuble, intérieur, logement, logis, manoir, masure, propriété, réduit* et *résidence*.

Les vingt et un mots (*maison* et ses vingt synonymes) étaient présentés par paire aux sujets qui devaient évaluer leur similarité sémantique en plaçant une encoche sur un axe de 10 cm non gradué. L'encoche devait être placée tout à gauche pour des mots jugés complètement différents ou tout à droite pour des mots jugés identiques

¹www.crisco.unicaen.fr. Ce dictionnaire électronique résulte de la fusion des synonymes donnés par sept dictionnaires : Bailly, Benac, Chazeaud, Guizot, Lafaye, Larousse et Robert

Synonyme	Fréquence 1900-1950 (par million)	Fréquence 1950- (par million)	Variation (%)
firme	56	3441	+6045
chalet	353	1106	+213
clinique	417	1038	+149
entreprise	3032	6104	+101
chaumière	1236	314	-75
intérieur	15514	24662	+59
établissement	1930	2999	+55
domestique	6283	2901	-54
ménage	7916	3782	-52
logis	3279	1582	-52
masure	749	399	-47
château	10743	5802	-46
hôpital	2707	3922	+45
immeuble	784	1135	+45
propriété	8326	4764	-43
race	12616	7359	-42
construction	3442	4811	+40
réduit	381	531	+39
habitation	1081	659	-39
manoir	459	285	-38
case	982	1352	+38
naissance	4636	6317	+36
résidence	424	574	+35
campagne	15747	10572	-33
couronne	4219	2833	-33
trône	2226	1497	-33
serviteur	3357	2293	-32
logement	1456	995	-32

Tableau 2.2 – Les 28 synonymes de *maison* dont la fréquence a le plus évolué entre les première et seconde moitiés du 20^e siècle. En gras : les synonymes sélectionnés pour cette étude.

(un exemplaire des questionnaires comportant les consignes remis aux sujets est donné en Annexe 1). Chaque sujet devait évaluer les 210 paires. L'ordre des mots dans chaque paire était contrebalancé entre les sujets et l'ordre de présentation des paires était randomisé.

L'emplacement des encoches placées par les sujets a été mesuré avec une précision d'un millimètre, puis divisé par 100. La mesure de similarité entre les mots d'une paire fournie par les sujets était donc ramenée à une valeur comprise entre 0 (pour des mots jugés sémantiquement très différents) et 1 (pour des mots jugés sémantiquement identiques). Par défaut, la similarité entre un mot et lui même était fixée à 1. Les réponses fournies par chaque sujet étaient représentées par une matrice carrée symétrique. L'expérience était relativement fastidieuse pour les sujets¹, et un tiers d'entre eux, sans doute par manque d'attention, n'ont pas jugé au moins une des paires du questionnaire, alors que la consigne précisait que toutes les paires devaient être jugées. Pour résoudre ce problème de données manquantes, et plus généralement, pour obtenir un meilleur rapport signal sur bruit, l'ensemble des analyses subséquentes ont été effectuées sur les matrices de corrélation des matrices de réponse de chaque sujet. Ainsi, pour chaque sujet et pour chaque paire, la similarité utilisée n'était pas directement le jugement du sujet, mais le reflet de la tendance du sujet à juger de manière similaire les deux mots de la paire avec tous les autres mots. La matrice de corrélation du sujet i est désignée par M_i .

¹D'après leurs propos en fin d'expérience.

2.3 Résultats

2.3.1 Analyse des matrices M_i

Lorsque l'on regarde directement les matrices M_i , il y a des différences significatives pour 20 paires de mots (Tableau 2.3). Excepté pour 3 d'entre elles, les paires pour lesquelles les jugements sont différents entre les deux groupes sont jugées plus similaires par le groupe G_2 que par le groupe G_1 . Le mot apparaissant le plus souvent dans des paires jugées différemment est *château*, les 2 groupes exprimant des désaccords pour 1/3 des paires contenant ce mot.

2.3.2 Structure sémantique commune

L'ACP fournit pour chacun des sujets les coordonnées des 21 mots. La figure 2.1 donne les pourcentages de variance expliqués par les 10 premières composantes. Les deux premières expliquent respectivement 60.2% et 14.4% de la variance, soit près de ses trois quarts. Il est donc légitime de ne considérer que ces deux premières dimensions. Dans cette section, nous ferons abstraction des différences d'âge, afin de décrire la structure sémantique commune.

La figure 2.2 représente le barycentre de chacun des 21 mots. La répartition des mots permet de proposer une interprétation des deux axes. Le long de l'axe des abscisses, les mots s'organisent selon une dimension de fonctionnalité avec, à gauche, des lieux qui ne sont pas des habitations (*clinique, entreprise*), et une augmentation de l'habitabilité en allant vers la droite, jusqu'à atteindre *maison, habitation, logement*. Sur l'axe des ordonnées, les mots se distribuent selon la qualité de l'habitat, de *résidence et château*, jusqu'à *maison, case et réduit*.

	case	chalet	château	chaumière	clinique	construction	entreprise	établissement	habitation	hôpital	immeuble	intérieur	logement	logis	maison	manoir	masure	propriété	réduit	résidence
case												*	*							
chalet				***										*						
château					**	**	**	*	**	*	††									
chaumière		***												*						
clinique			**												*					
construction																				
entreprise			**					†			*				*					
établissement			**													*				
firme			*				†													
habitation																				
hôpital			**																	
immeuble			*				*									*		*	††	
intérieur	*		††																	
logement	*																			
logis		*		*																
maison					*		*													
manoir								*			*									
masure																				*
propriété											*									
réduit											††						*			
résidence																				

Tableau 2.3 – Différences significatives entre les jugements des deux groupes. † : plus similaire pour G_1 que pour G_2 ; * : plus similaire pour G_2 que pour G_1 . * ou † : $p < 0.05$; ** ou †† : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$

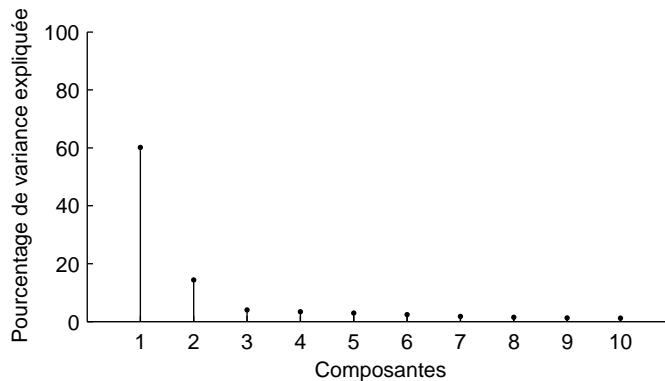


Figure 2.1 – Pourcentages de variance expliqués par les 10 premières composantes après l’ACP des réponses des sujets.

En sus des axes d’habitabilité et de qualité, la structure sémantique est organisée le long d’une ellipse, représentée en bleu sur la figure 2.3. Chaque mot est de plus associé à une ellipse à l’intérieur de laquelle se trouve 50% des sujets. Ces ellipses indiquent donc la variabilité des réponses des sujets. L’étirement de ces ellipses est colinéaire à l’ellipse qui organise la structure sémantique, ce qui indique que la variabilité inter-individuelle se concentre aussi le long de cette ellipse. Le placement des mots le long de l’ellipse suit l’ordre suivant : *entreprise, firme, clinique, hôpital, établissement, construction, immeuble, propriété, château, manoir, résidence, maison, chalet, habitation, logement, logis, chaumière, intérieur, mesure, case, réduit*.

2.3.3 Différences inter-générationnelles

Lorsque l’on compare les emplacements des mots des deux groupes de sujets, les différences sont significatives (test de Hotelling) pour *château* ($p < 0.0005$), *clinique* ($p < 0.05$), *entreprise* ($p < 0.05$) et *immeuble* ($p < 0.05$). La figure 2.4

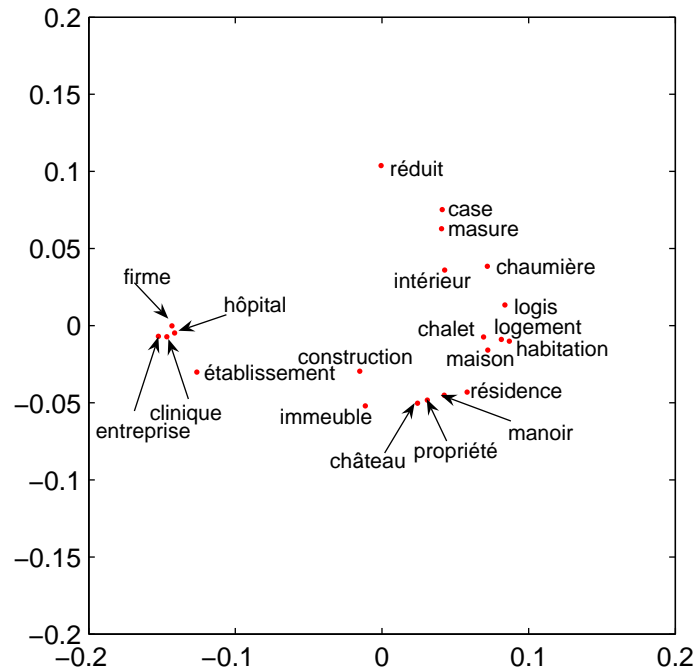


Figure 2.2 – Structure sémantique commune. Chaque point correspond au barycentre de la position des mots des tous les sujets dans les 2 premières dimension de l'ACP.

présente la superposition des structures de chacun des groupes.

La position des 21 mots dans l'espace définit une forme spécifique à chacun des sujets. Une telle représentation permet d'appliquer les méthodes morphométriques d'analyse statistique des formes (Dryden & Mardia, 1998). En morphométrie, lorsque l'on souhaite étudier les différences de forme entre deux groupes d'objets (comme par exemple des crânes de macaque mâles et femelles), chacune des formes (chacun des crânes, pour prolonger notre exemple) est caractérisée par les coordonnées dans l'espace de points de repère caractéristiques (le point le plus an-

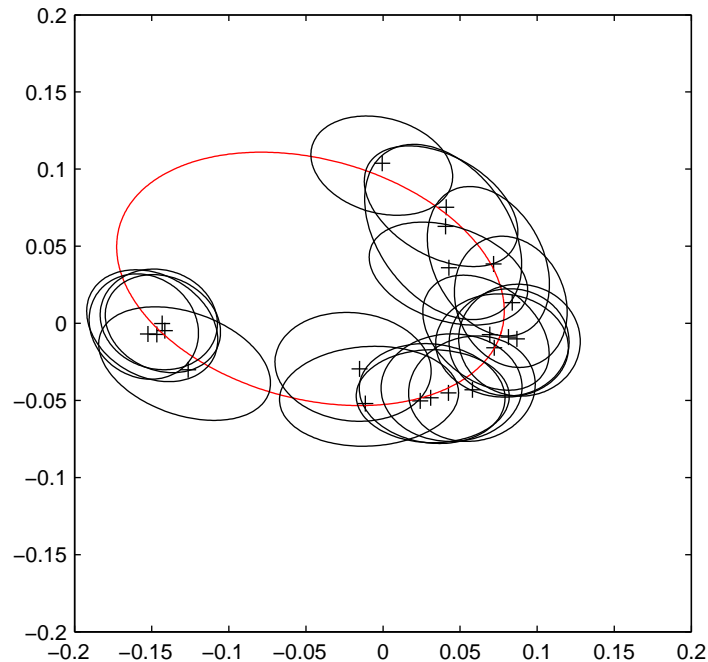


Figure 2.3 – Ellipse ajustant le mieux la position des mots dans l’espace sémantique commun.

térieur de la mandibule, les points les plus externes des orbites oculaires, ...). En utilisant les techniques de morphométrie¹, il nous est possible de conclure qu’il y a une différence significative ($p < 0.005$) entre les formes des structures sémantiques des deux groupes.

Dans leurs études, Romney et ses collaborateurs suivent une méthode proposée par Rao & Suryawanshi (1996) qui consiste à représenter chaque forme par un vecteur contenant les logarithmes des $k(k-1)/2$ distances entre les k points de repères

¹Nous avons utilisé le logiciel R (www.r-project.org), et en particulier le package *shape*, qui implémente les méthodologies décrites dans Dryden & Mardia (1998)

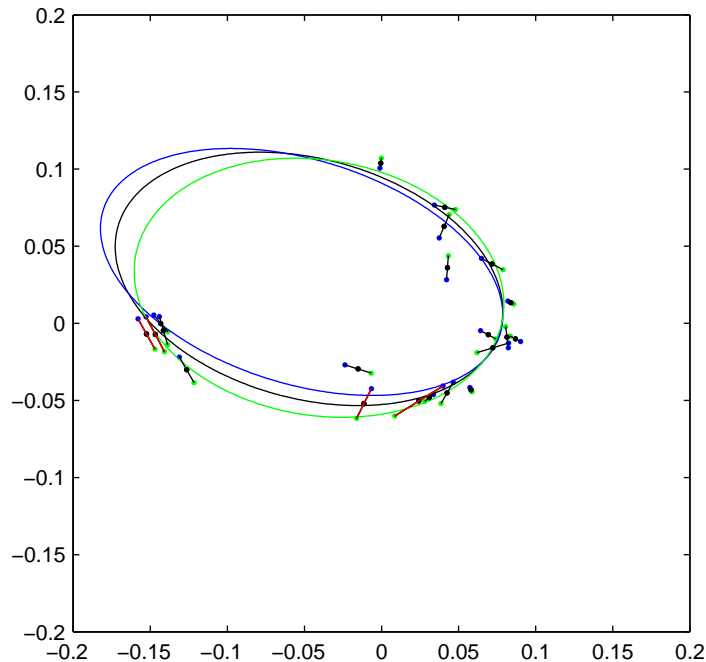


Figure 2.4 – Superposition des structures sémantiques des deux groupes. Les points bleus et l'ellipse bleue correspondent à la structure sémantique du groupe G_1 , les points verts et l'ellipse verte à la structure sémantique du groupe G_2 et les points noirs et l'ellipse noire à la structure sémantique commune. Les mots identiques des structures sémantiques des groupes G_1 et G_2 sont reliés par un segment noir si leurs positions ne sont pas significativement différentes, et par un segment rouge si elles le sont.

qui caractérisent la forme. En suivant cette approche, nous pouvons donc représenter chacun des sujets de notre étude par un vecteur de taille 210, et l'ensemble des sujets par une matrice de taille 63×210 . Nous avons effectué une nouvelle ACP sur cette matrice. Les coordonnées obtenues sont cette fois celles des sujets. La figure 2.5 donne les pourcentages de variance expliquée par les 50 premières composantes.

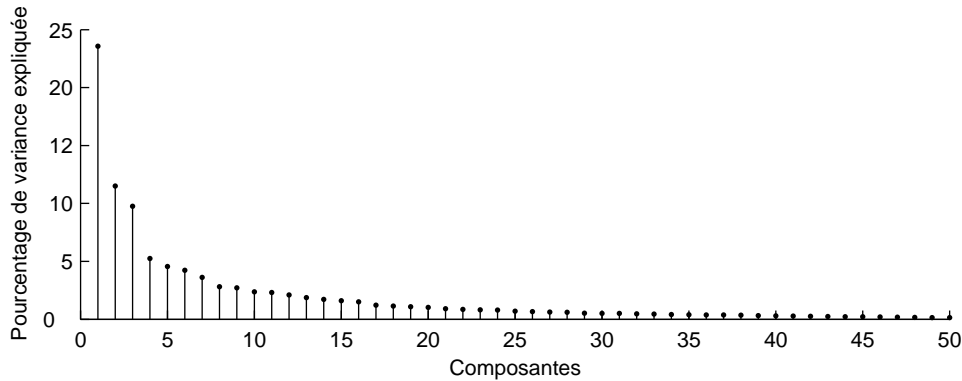


Figure 2.5 – Pourcentages de variance expliquée par les 50 premières composantes après ACP des formes des structures sémantiques

Les composantes se prêtent peu à l'interprétation. Aucun paramètre n'est corrélié à la première composante. La seconde tend à discriminer les deux groupes, mais de manière non significative ($p = 0.057$). La 14^e composante discrimine significativement les deux groupes ($p < 0.0005$), mais n'exprime que peu de variance (1.72%). Les deux groupes sont aussi discriminés par les composantes 17 et 18, mais avec une significativité statistique moindre ($p < 0.05$) et ces composantes expriment encore moins de variance (1.22% et 1.14%). À part leur âge, nous avons relevé le sexe des sujets et leur nombre de pages lues quotidiennement. Les coordonnées selon les composantes 35, 49 et 58 sont significativement différentes selon le sexe du sujet ($p < 0.05$) et de manière encore plus marquée pour la composante 59 ($p < 0.005$). Mais toutes ces composantes n'expriment que très peu de variance (de 0.40% pour la 35^e à 0.06% pour la 59^e). Enfin le nombre de pages lues quotidiennement est légèrement, mais significativement, corrélié aux coordonnées selon les 45^e ($r = 0.40, p < 0.001$) et la 56^e ($r = -0.30, p < 0.05$) composantes,

qui expriment respectivement 0.22% et 0.09% de la variance. Il convient de noter que lorsqu'une dimension discrimine les deux groupes avec une significativité de p , cela signifie qu'il y a une probabilité p que des valeurs le long de cette dimension soient complètement aléatoires. Lorsque que l'on recherche, pour un facteur donné, des différences significative dans les 63 dimensions, on s'attend donc a trouver en moyenne 3.15 dimensions avec une significativité de $= 0.05$, 0.63 dimension avec une significativité de $p = 0.001$, ...

2.4 Conclusion

Les différents travaux sur les changements sémantiques que nous avons discutés dans le premier chapitre se caractérisaient tous par le fait qu'ils étudiaient des changements accomplis et, dans leur majorité, par le fait qu'ils considéraient des changements qualitatifs, c'est-à-dire l'association de nouveaux sens à un mot (les travaux de Stern (1931, section 2.2) et les changements initiés par ce qu'Ullmann a appelé causes historiques (1.2.1) ne vérifient pas cette seconde caractéristique). Le type de changement que nous avons mis en lumière dans l'étude présentée dans ce chapitre se démarque de ces deux caractéristiques : nous avons présenté un changement en cours de réalisation, et qui se manifeste non pas par l'établissement de nouvelles relations sens-forme, mais par une modification de la structure conceptuelle associée aux formes étudiées.

Cette étude est une étude en temps apparent des changements sémantiques. C'est, à notre connaissance, la première fois qu'une telle approche est employée dans l'étude des changements sémantiques. Nous avons ainsi pu observer l'évolution du champ sémantique autour du mot *maison* au cours de la trentaine d'années

qui sépare les deux générations que nous avons étudiées. Les méthodes de la sociolinguistique variationniste permettent d'observer un changement linguistique en cours de réalisation à partir de l'étude de la variation inter-individuelle dans une population. Appliquer ces méthodes aux changements sémantiques nécessitait donc de mesurer la variabilité inter-individuelle des représentations sémantiques. L'absence d'autres travaux comparables à notre étude pourrait provenir de la difficulté à mesurer avec une précision nécessaire cette variabilité inter-individuelle.

Nos résultats montrent que les structures sémantiques associées au champ sémantique autour du mot *maison* des deux générations que nous avons étudiées diffèrent de manière statistiquement significative. Aucune étude en temps réel ne permet de justifier l'hypothèse du temps apparent pour le type de changement que nous avons étudié. Néanmoins, l'hypothèse alternative pour expliquer nos résultats, selon laquelle la structure sémantique des locuteurs change au fur et à mesure de leur vieillissement, nous apparaît nettement moins vraisemblable que celle d'un changement en cours de réalisation, d'autant plus que les changements de fréquence des mots de notre étude entre les première et seconde moitiés du 20^e siècle sont aussi des éléments en faveur de changements de leurs emplois.

Proposer des explications sur les causes des changements que nous observons nécessiterait une étude historique de l'habitat au 20^e siècle. Une telle étude est hors de notre présent propos et est laissée à la charge des historiens. En revanche, notre étude gagnerait à être complétée par des données culturelles, géographiques et socio-économiques plus précises sur les sujets. Si nous avons pu montrer que le sexe et la quantité de pages lues quotidiennement n'étaient pas des facteurs explicatifs de la variabilité, d'autres facteurs permettraient sans doute d'avoir une vision plus précise du changement que nous observons, en nous renseignant sur ses origines et sa

diffusion géographiques et sociales.

Notre étude valide l'utilisation des méthodes provenant de l'anthropologie quantitative que nous avons employées : elles permettent de mesurer avec une précision suffisante la variabilité sémantique pour observer des changements sémantiques en cours de réalisation. La sociolinguistique variationniste a révolutionné la compréhension des changements phonologiques au cours des quarante dernières années. Notre étude ouvre la voie à l'application de ces concepts et de ces méthodes aux changements sémantiques.

CHAPITRE III

Changements sémantiques et linguistique évolutionnaire

LE CHAPITRE précédent présentait une étude en temps apparent permettant d'observer les changements sémantiques, ou plus précisément la réorganisation des structures conceptuelles, sur une échelle de temps de l'ordre de la génération. Celui-ci propose d'observer les changements sur plusieurs générations. L'espérance de vie humaine ne permettant pas d'étendre à un nombre indéfini de générations la méthode employée dans le chapitre précédent, il est nécessaire de trouver des alternatives. Une possibilité est d'utiliser des écrits, et fera l'objet du dernier chapitre. Nous allons présenter ici une autre voie, reposant sur les méthodes de la *linguistique évolutionnaire*. La linguistique évolutionnaire est l'application à la linguistique du paradigme de la vie artificielle et repose sur la simulation de po-

pulations de locuteurs capables de communiquer entre eux. Ici, nous simulerons de telles populations afin d'étudier l'évolution de leur lexique.

La suite du chapitre est constituée de deux parties. Dans la première, nous établissons une typologie des modèles proposés dans la littérature de la linguistique évolutionnaire, en nous axant sur la manière dont ces modèles prennent en compte la sémantique. Cette revue nous permettra de situer notre modèle parmi ceux déjà proposés. Dans la seconde partie, nous donnerons alors une description de ce modèle et présenterons des expériences que nous avons conduites avec celui-ci.

1 Linguistique évolutionnaire

Depuis une quinzaine d'années, l'utilisation des méthodes de la vie artificielle dans les recherches sur l'évolution du langage et des langues connaît un développement foisonnant sous le nom de *linguistique évolutionnaire*. Steels (2000) résume ainsi la démarche qui sous-tend ce courant de recherche :

L'idée de base est qu'une communauté de locuteurs (dorénavant appelés agents) peut-être vue comme un système complexe adaptatif qui résout collectivement le problème de développer un système de communication partagé. Pour ce faire, la communauté doit aboutir à un consensus sur un répertoire de formes (un système de sons dans le cas d'un langage parlé), un répertoire de sens (une conceptualisation de la réalité), et un répertoire d'associations forme-sens (un lexique et une grammaire)¹.

(Steels, 2000, p. 17)

Plusieurs revues de la littérature sur la linguistique évolutionnaire existent (Steels, 1997c ; Parisi, 1997 ; Steels, 2000 ; Kirby, 2002b ; K. Wagner, Reggia, Uriagereka, & Wilkinson, 2003), et notre ambition dans cette section n'est pas de produire une nouvelle revue exhaustive des travaux effectués dans ce domaine. Le but de cette section est au contraire de détailler les différentes approches employées pour traiter la sémantique dans ces modèles, afin de pouvoir mettre en perspective notre modèle, détaillé dans la section 2. Nous proposons de classer les différents modèles proposés jusqu'à présent de la manière suivante : nous distinguons tout d'abord les modèles à sémantique publique des modèles à sémantique privée, selon que les sens sont des entités partagées par tous les agents ou au contraire propres à chacun d'eux. En

¹Notre traduction.

outre, parmi les modèles à sémantique privée, nous distinguons ceux qui reposent sur une conception classique des catégories, de ceux qui reposent sur une conception prototypique (chapitre I, section 3.1).

1.1 Modèles à sémantique publique

Dans les modèles à sémantique publique, un ensemble de formes et un ensemble de sens (généralement de cardinalités différentes) sont mis à disposition des agents qui établissent, via leurs interactions, un consensus sur les correspondances sens-forme. La sémantique est publique dans la mesure où les sens à associer aux formes sont accessibles et partagés par tous les agents. Des modèles ayant adopté une telle stratégie sont par exemple Batali (2002), Brighton (2002), Hurford (2000), Kirby (2000, 2002a), Oliphant & Batali (1997) (ces modèles étant néanmoins plutôt dévolus à l'étude de la compositionnalité du langage), Steels (1997b), Steels & Kaplan (1998) (des modèles axés sur le lexique à proprement parler).

Afin d'illustrer les caractéristiques des modèles à sémantique publique nous allons présenter l'un d'entre eux, proposé par Kaplan (2000, chapitre 3), qui, par sa simplicité, permet de saisir clairement les éléments essentiels de ces modèles. Dans le modèle de Kaplan (2000), les agents doivent établir une convention pour nommer S sens. Chaque agent a est représenté par une matrice d'association Σ_a de taille $S \times M_a$, où M_a est le nombre de mots au répertoire de l'agent a . Chaque élément $\sigma_{i,j}$ de la matrice représente la force de l'association entre le sens i et le mot j correspondant. La tableau 3.1 représente une telle matrice. Au début d'une simulation, les matrices d'association des agents sont nulles.

À chaque itération, deux agents sont choisis aléatoirement au sein la population

	mot 1	mot 2	mot 3
sens 1	$\sigma_{1,1}$	$\sigma_{1,2}$	$\sigma_{1,3}$
sens 2	$\sigma_{2,1}$	$\sigma_{2,2}$	$\sigma_{2,3}$
sens 3	$\sigma_{3,1}$	$\sigma_{3,2}$	$\sigma_{3,3}$

Tableau 3.1 – Matrice d’association entre 3 mots et 3 formes. La force de l’association entre le sens i et le mot j est $\sigma_{i,j}$. D’après Kaplan, 2000.

pour une interaction linguistique. L’un de ces deux agents se voit attribuer le rôle de locuteur, l’autre celui d’interlocuteur. Le locuteur choisit aléatoirement l’un des sens possibles et le code avec le mot qui lui est le plus fortement associé dans sa matrice d’association. Si aucun mot n’est associé au sens choisi, il en crée un. Le locuteur transmet alors le mot à l’interlocuteur qui le décode en sélectionnant le sens le plus fortement associé au mot transmis. L’interlocuteur indique alors le sens qu’il a décodé au locuteur, et ce dernier indique s’il s’agit bien le sens qu’il avait choisi au début de l’interaction. Si tel est le cas, l’interaction est couronnée de succès, dans le cas contraire elle se conclue par un échec.

Selon l’issue de l’interaction, l’interlocuteur modifie sa matrice d’association. En cas de succès, il incrémente de 1 le score de l’association entre le sens et le mot utilisés lors de l’interaction, et décrémente de 1 les scores des associations concurrentes, c’est-à-dire celles entre le sens utilisé lors de l’interaction et les autres mots de son répertoire (les synonymes potentiels), et celles entre le mot employé pendant l’interaction et les autres sens (les homonymes potentiels). En cas d’échec, l’interlocuteur décrémente de 1 l’association entre le mot qui lui a été transmis et le sens qu’il a décodé. Le locuteur indique alors le sens correct et l’interlocuteur incrémente de 1 le score de l’association entre ce sens et le mot utilisé lors de l’interaction. Kaplan

(2000) a montré qu'avec N agents devant nommer S sens, un consensus au sein de la population sur les correspondances sens-mot est établi après T interactions, avec $T \propto SN \log N$.

Dans ce modèle, comme dans tous les modèles à sémantique publique, les sens auxquels les agents doivent associer des formes sont communs et partagés par tous les agents. Or, nous avons vu au chapitre I que le sens est une entité mentale, donc privée, propre à chacun, et inaccessible aux autres locuteurs sans postuler une quelconque forme de télépathie. Il résulte de cette approche ce que Smith (2003a) a appelé le paradoxe de la redondance de la forme¹ : si forme et sens sont tous deux transmis lors d'une interaction linguistique, alors la première est redondante ; elle est donc inutile, entraîne un coût superflu, et il est donc possible, voire préférable, de s'en passer. Le mode de communication alors obtenu, basé sur la transmission d'un sens sans transmission de forme est alors fondamentalement différent de la communication humaine qui repose au contraire sur la transmission de forme sans transmission de sens. Pour se prémunir de ce paradoxe, Smith (2003b) recommande donc pour éviter le transfert de sens et de ses conséquences de recourir à "*trois niveaux séparés de représentation dans le modèle : un monde publique et externe, une représentation sémantique interne et privée aux agents, et un ensemble de formes, de nouveau publiquement observables. Les correspondances entre les sections publiques et privées du modèle doivent être propres aux agents et inobservables par les autres ; sans cela, les représentations privées deviennent publiques, et rendent les formes superflues*" (p. 177). Nous désignons par *modèles à sémantique privée* ceux qui vérifient les recommandations de Smith (2003b)

¹*signal redundancy paradox*

²Notre traduction.

1.2 Modèles à sémantique privée

Dans les modèles à sémantique privée les trois pôles du triangle sémiotique sont représentées : les agents communiquent en échangeant des formes dont les sens sont des entités internes, propres à chaque agent, et qui réfèrent à des entités d'un environnement extérieur aux agents. Cet environnement peut être soit le monde réel lorsque les modèles engagent des agents robotiques, soit un monde virtuel lorsque les agents sont logiciellement simulés. Les sens sont une conceptualisation par les agents de leur environnement. À la différence des modèles à sémantique publique où les sens sont donnés d'emblée, dans les modèles à sémantique privée les agents ont comme tâche non seulement d'aboutir à un consensus sur le lexique, mais aussi de développer leur conceptualisation, c'est-à-dire de créer les sens qu'ils doivent associer aux formes.

Dans tous les modèles à sémantique privée, la conceptualisation se fait au moyen de ce que Gärdenfors (2000) a appelé *espace conceptuel*. Un espace conceptuel est un espace multidimensionnel où chaque dimension correspond à une propriété perçue des objets de l'environnement des agents. Ainsi les objets y sont reflétés par des points, et les concepts, qui représentent des catégories d'objets, y sont définis comme des régions. Les agents sont dotés d'un espace conceptuel au sein duquel ils délimitent des concepts, qui procurent la base sémantique des formes qu'ils échangent. Les espaces conceptuels sont propres à chaque agent et inobservables par les autres.

Deux tendances se dégagent dans les modèles à sémantique privée, selon la théorie des catégories qu'ils adoptent. Tous rejettent la conception classique des catégories au sens où les catégories qu'ils traitent sont bien des entités mentales

(des régions d'un espace conceptuel) et non des entités du monde antérieures aux catégorisations. Mais pour une partie de ces modèles, les concepts tracés dans les espaces conceptuels sont des régions aux frontières clairement tracées, réduisant la catégorisation à la vérification de conditions nécessaires et suffisantes, tandis que pour une autre partie des modèles à sémantique privée, les régions construites dans les espaces conceptuels le sont autour d'un prototype et l'appartenance à ces régions est graduelle.

1.2.1 Sémantique à catégories classiques

Peu d'auteurs se réfèrent à la notion d'espace conceptuel, et tous ne présentent pas leurs travaux en explicitant l'espace multidimensionnel au sein duquel les agents construisent leur conceptualisation. Ainsi, Steels (1996, 1997a, 1998) ; Steels & Kaplan (1999, 2002) ; Steels & Vogt (1997) ; De Jong (1998, 2000) ; Smith (2003a, 2003b) ont décrit la représentation du sens dans leurs modèles en termes d'arbres de discrimination.

Les agents de ces modèles sont dotés de plusieurs canaux sensoriels, chacun dédié à une propriété des objets de leur environnement. Les agents peuvent donc percevoir les objets en obtenant une valeur pour chacune de leurs propriétés. Ces valeurs sont normalisées pour être comprises entre 0 et 1. Chaque agent associe à chaque canal un arbre binaire de discrimination tel que celui présenté à la figure 3.1. Les arbres découpent la gamme de valeurs de chaque canal sensoriel en plages qui représentent autant de catégories.

Lors des interactions entre agents, un sous-ensemble des objets de l'environnement est choisi pour être le contexte de l'interaction. Un des objets du contexte est

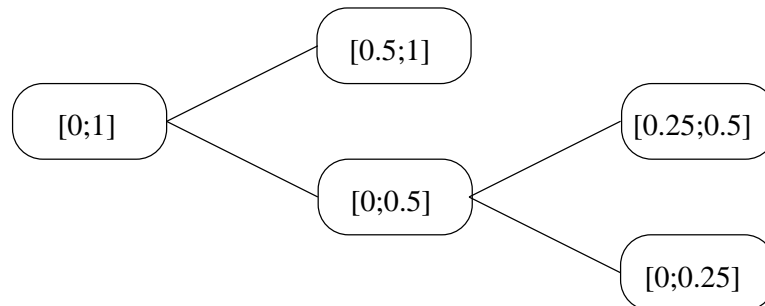


Figure 3.1 – Exemple d’arbre de discrimination. Chaque nœud représente un intervalle de la gamme de valeurs, et donc une catégorie.

choisi pour être le sujet de l’interaction. Un agent conceptualise le sujet de l’interaction en déterminant une catégorie distinctive, qui identifie de manière non-ambiguë le sujet parmi les autres objets du contexte. Par exemple, imaginons un agent doté d’un seul canal dont l’arbre de discrimination est celui présenté à la figure 3.1. Dans un contexte constitué de trois objets pour lesquels le canal renvoie respectivement les valeurs 0.32, 0.48 et 0.57, l’agent pourra discriminer le troisième objet des deux premiers avec la catégorie $[0.5; 1]$. En revanche, il ne dispose d’aucune catégorie discriminative si l’un des deux premiers objets est le sujet de l’interaction. Si cet agent avait disposé d’autres canaux, la discrimination aurait peut-être été rendue possible par l’arbre de l’un d’entre eux. Si aucun canal ne permet de discriminer le sujet parmi le contexte, la phase de conceptualisation échoue et l’agent développe son système conceptuel en choisissant un des canaux et en créant dans l’arbre de discrimination deux nouveaux nœuds qui subdivisent la plage à laquelle appartient la valeur du sujet de l’interaction.

Les systèmes de conceptualisation à base d’arbres de discrimination tels que dé-

crit ci-dessus peuvent être exposés en termes d'espaces conceptuels. Chaque agent est doté d'un espace conceptuel de même dimensionalité que le nombre de canaux sensoriels qu'il possède. A chaque dimension de l'espace conceptuel est associé un ensemble d'hyperrectangles disjoints dont l'union égale l'espace conceptuel en entier (figure 3.2). Lors de la conceptualisation, tous les objets constituant le contexte sont représentés par des points dans l'espace conceptuel. Pour discriminer le sujet de l'interaction des autres objets, l'agent doit trouver une dimension dont l'ensemble d'hyperrectangles est tel que le sujet se trouve seul dans l'hyperrectangle. Si aucune dimension ne convient, l'une d'entre elle est aléatoirement choisie, et l'hyperrectangle auquel appartient le sujet est découpé orthogonalement à la dimension choisie en deux nouveaux hyperrectangles de même volume.

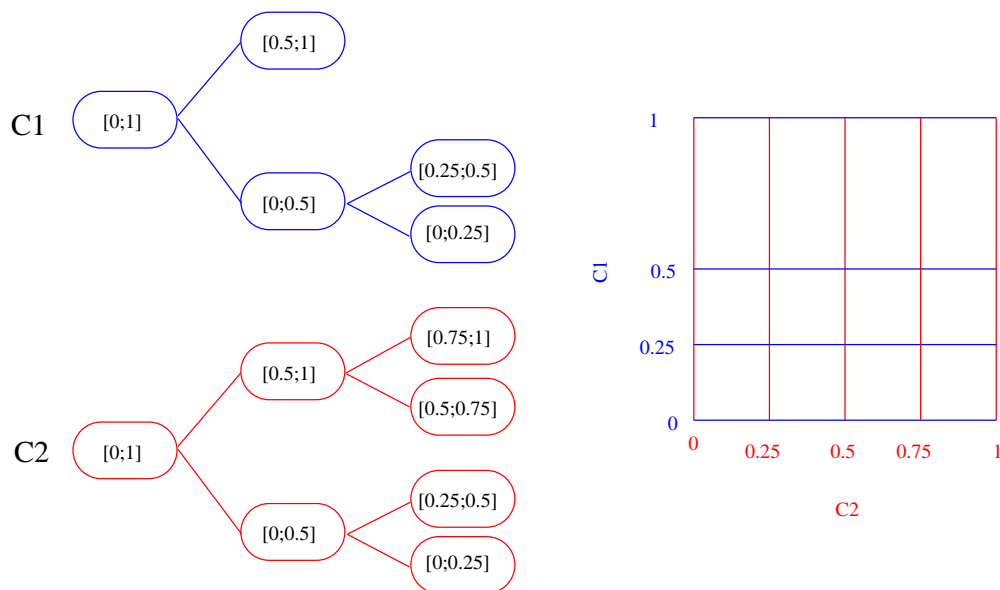


Figure 3.2 – Espace conceptuel bidimensionnel associé aux arbres de discrimination de deux canaux.

1.2.2 Sémantique à catégories prototypiques

Nous incluons le modèle de Vogt (2000) dans les modèles basés sur une sémantique à catégories prototypiques, bien qu'il ne remplisse pas tous les critères que nous avons établis : si les catégories sont construites autour de prototypes, l'appartenance d'un objet à une catégorie n'est pas graduelle – l'objet lui appartient ou non. Les agents de Vogt (2000), des robots, sont dotés de quatre canaux sensoriels et effectuent leur conceptualisation dans des espaces conceptuels à quatre dimensions. Les catégories sont représentées par des prototypes, qui sont des points de l'espace conceptuel. La catégorisation s'effectue en déterminant quel est le prototype le plus proche du point représentant l'objet à catégoriser dans l'espace conceptuel. À l'instar des modèles présentés dans la section précédente (1.2.1), un objet n'est pas considéré isolément, mais au sein d'un contexte constitué d'autres objets. Si l'opération de catégorisation ne permet pas de distinguer le sujet de l'interaction des autres objets du contexte, une des dimensions est choisie et de nouveaux prototypes sont construits en prenant tous les prototypes existants et en remplaçant leur valeur selon la dimension choisie par celle du sujet de l'interaction (figure 3.3). Si une catégorie distinctive est trouvée et que la communication qui s'ensuit réussit, le prototype de la catégorie utilisée est légèrement déplacé vers le point correspondant au sujet de l'interaction.

Le modèle développé par Belpaeme (2001, 2002, Steels & Belpaeme, 2005) est, à notre connaissance, le seul modèle, avec le nôtre, décrit dans la partie suivante, basé sur une sémantique à catégories prototypiques exhibant un gradient d'appartenance. Le modèle de Belpaeme est un modèle sur le développement de catégories de couleurs et d'un lexique associé. Les agents perçoivent les couleurs comme des

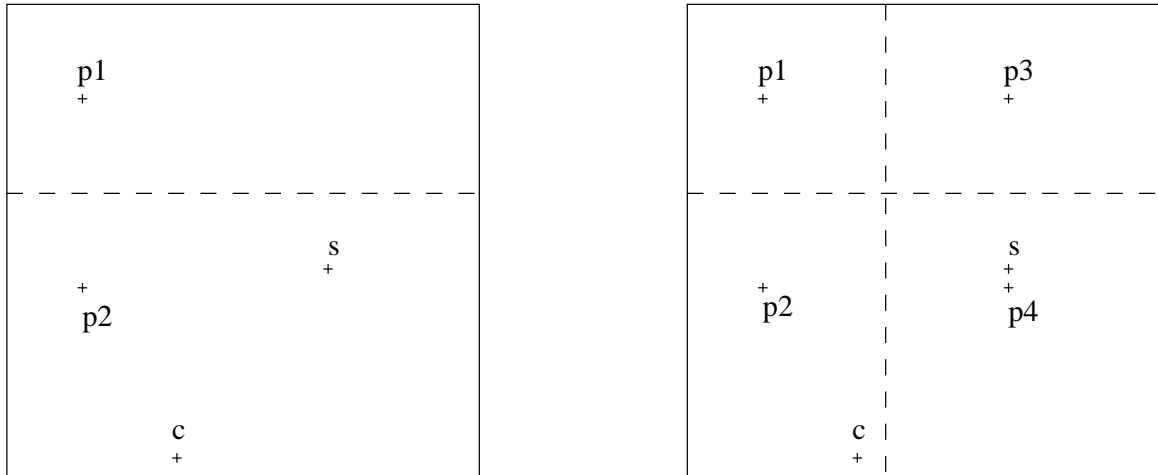


Figure 3.3 – Un espace conceptuel bidimensionnel avant la création de nouveaux prototypes (à gauche) et après (à droite). Initialement, l'espace comporte deux prototypes, $p1$ et $p2$ de coordonnées respectives $(0.16, 0.8)$ et $(0.16, 0.4)$. Le sujet de l'interaction s a pour coordonnées $(0.68, 0.44)$ et le contexte est composé d'un seul autre objet c de coordonnées $(0.35, 0.04)$. La catégorie définie par $p2$ catégorise à la fois s et c . Elle n'est donc pas distinctive. La première dimension est choisie pour créer de nouveaux prototypes à partir de $p1$ et $p2$: $p3$, de coordonnées $(0.68, 0.8)$, et $p4$, de coordonnées $(0.68, 0.4)$. D'après Vogt (2000)

points dans un espace à trois dimensions. Les catégories sont représentées par des réseaux de neurones à fonction de base radiale. Au sein de chaque réseau, chacun des neurones répond de manière préférentielle pour un point de l'espace et de manière décroissante en s'éloignant de ce point. La réponse à un stimulus d'un réseau représentant une catégorie est la somme pondérée des neurones qui le composent, et correspond au degré d'appartenance du stimulus à la catégorie. La figure 3.4 représente la réponse d'un réseau composé de trois neurones. Chaque catégorie est donc composée d'autant de prototypes que possède de neurones le réseau la représentant. Les réponses des neurones sont décroissantes en s'éloignant de leur point

focal, et restent toujours positives. En conséquence, tout point de l'espace appartient à toutes les catégories d'un agent, même si en pratique le degré d'appartenance décroît exponentiellement en s'éloignant des prototypes. L'opération de catégorisation d'un stimulus par un agent se conclue néanmoins toujours de manière univoque, en choisissant la catégorie dont la réponse du réseau est la plus élevée.

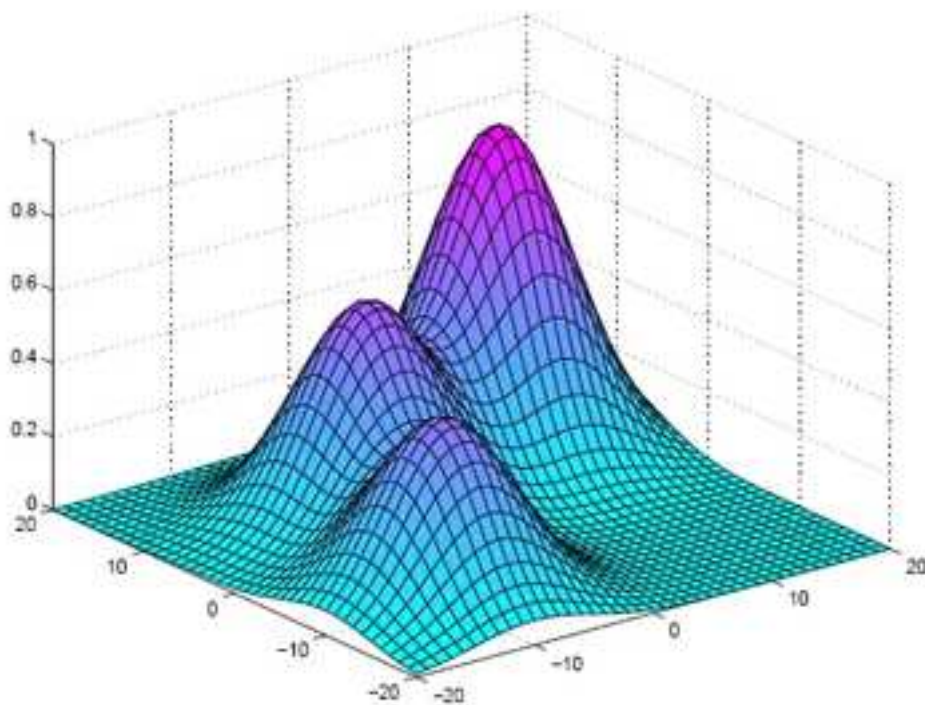


Figure 3.4 – Réponse d'un réseau à trois neurones à trois fonctions de base radiale définissant une catégorie dans un espace bidimensionnel. Chaque neurone répond préférentiellement en un point de l'espace et ce de manière décroissante en s'en éloignant. La réponse du réseau est obtenue par une somme pondérée des réponses de chacun des neurones. D'après Belpaeme (2002)

Comme dans les modèles précédents, les interactions entre agents s'effectuent à propos d'un sujet, et au sein d'un contexte. La catégorisation doit donc permettre de discriminer le sujet de l'interaction des autres stimuli du contexte. Si ce n'est pas

le cas, c'est-à-dire si un autre stimulus est catégorisé de la même manière que le sujet, l'agent modifie sa structure conceptuelle : cela s'effectue soit en créant une nouvelle catégorie (en créant un nouveau réseau, composé d'un seul neurone centré sur le sujet de l'interaction), soit en modifiant la catégorie du sujet de l'interaction (en ajoutant un nouveau neurone au réseau représentant la catégorie, centré sur le sujet).

1.3 Remarques conclusives

Nous avons exposé dans cette partie différents modèles issus de la vie artificielle étudiant la communication dans une population d'agent. Nous nous sommes particulièrement intéressés à la manière dont est traitée la sémantique dans ces modèles. Nous avons dégagé trois tendances : les modèles à sémantique publique et les modèles à sémantique privée, ces derniers se différenciant entre ceux optant pour une conception classique des catégories et ceux optant pour une conception roschienne. Les modèles à sémantique publique présupposent que les sens associés aux formes échangées par les agents sont des entités externes à ces derniers et partagées par tous. Cela entraîne que la communication consiste en le transfert de la forme *et* du sens qui lui est associé. En sus de l'irréalisme de ce mode de communication, il conduit à ce que Smith (2003a) a appelé le paradoxe de la redondance de la forme : si le rôle de la forme est de convoier le sens mais que le sens est lui aussi explicitement convoyé lors de la communication, la forme devient superflue. Pour éviter ce travers, Smith (2003b) recommande de concevoir des modèles intégrant l'ensemble du triangle sémiotique, avec un environnement extérieur et publique contenant les référents, un niveau interne et privé de représentation des sens, et un espace des

formes public. Nous avons appelé *modèles à sémantique privée* ceux se tenant à ces recommandations. Nous avons distingué deux types de modèles à sémantique privée, ceux adoptant une conception classique des catégories, basée sur une vérification de conditions nécessaires et suffisantes, de ceux adoptant une approche prototypique. Parmi ces derniers, celui de Belpaeme (2001, 2002, Steels & Belpaeme, 2005) est, à notre connaissance, le seul à proposer des catégories à prototype(s) et exhibant un gradient d'appartenance. Il nous semble que ces modèles sont les plus réalistes, capturant des propriétés essentielles des représentations sémantiques.

2 Description du modèle

Dans cette partie, nous présentons le modèle que nous avons développé. Le principe général est identique à celui des modèles que nous avons exposés dans la partie précédente : les agents d'une population engagent des interactions linguistiques deux à deux, au cours desquelles ils ont l'occasion de vérifier s'ils s'entendent sur la manière à employer les mots de leur lexique, et à l'issue desquelles ils modifient éventuellement leur état interne. Nous allons successivement détailler les différentes composantes de notre modèle : l'architecture cognitive des agents, la structuration de la population, la structuration de l'environnement et le protocole des interactions entre les agents.

2.1 Architecture cognitive des agents

Au cours de leurs interactions, les agents vont avoir à nommer des objets de leur environnement. Les noms utilisés par les agents ont pour sens les concepts qu'ils auront développés lors des interactions précédentes. Ces concepts sont des sous-ensembles de l'espace conceptuel dont est doté chacun des agents. Afin de construire des catégories avec prototype et gradient d'appartenance, les sous-ensembles représentant les concepts sont des ensembles flous.

2.1.1 Théorie des ensembles flous

Si la théorie des ensembles (classiques) est la branche des mathématiques correspondant à la conception classique des catégories, la théorie des ensembles flous (Zadeh, 1965) correspond à la conception roschienne. L'appartenance à un ensemble mathématique classique est une question de tout ou rien, vérifiée sur la base de conditions nécessaires et suffisantes. L'appartenance à un ensemble flou est graduelle. Cette appartenance graduelle est formalisée par la notion de fonction caractéristique.

La fonction caractéristique μ_E d'un sous-ensemble E (classique) de l'ensemble \mathbb{R} des réels est définie de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \mu_E : \mathbb{R} &\mapsto \{0, 1\} \\ x &\rightarrow = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in E \\ 0 & \text{si } x \notin E \end{cases} \end{aligned} \quad (3.1)$$

La fonction caractéristique μ_F d'un sous-ensemble flou F de \mathbb{R} rend compte de l'appartenance graduelle en prenant ses valeurs entre 0 et 1 : $\mu_F : \mathbb{R} \mapsto [0, 1]$; $\mu_F(x) = 1$ si x appartient pleinement à F et $\mu_F(x) = 0$ si x n'appartient pas du tout à F . Les valeurs intermédiaires indiquent des degrés d'appartenance variés.

2.1.2 Modélisation de concepts par nombres flous

Parmi les divers types d'ensembles flous, ceux qui vont nous intéresser sont les nombres flous (Dubois & Prade, 1978 ; Kaufmann & Gupta, 1985 ; Mareš, 1994). Les nombres flous ont été introduits pour modéliser des expressions comme *environ 50* : 50 est *environ 50*, 49 et 51 sont vraisemblablement *environ 50*, mais 0.26

et 12957 ne sont certainement pas *environ 50*. À quoi correspond exactement *environ 50* dépend certainement de quoi l'on parle, mais la fonction caractéristique μ_F de l'ensemble flou F qui représente *environ 50* se doit de vérifier les propriétés suivantes qui définissent un nombre flou (figure 3.5) :

- (1) $\exists x_0 \in \mathbb{R}, \mu_F(x_0) = 1$;
- (2) $\forall x_1, x_2 \in \mathbb{R}, x_2 > x_1, \forall x \in [x_1, x_2], \mu_F(x) \geq \min(\mu_F(x_1), \mu_F(x_2))$;
- (3) $\{x \in \mathbb{R}, \mu_F(x) \neq 0\}$ est borné.

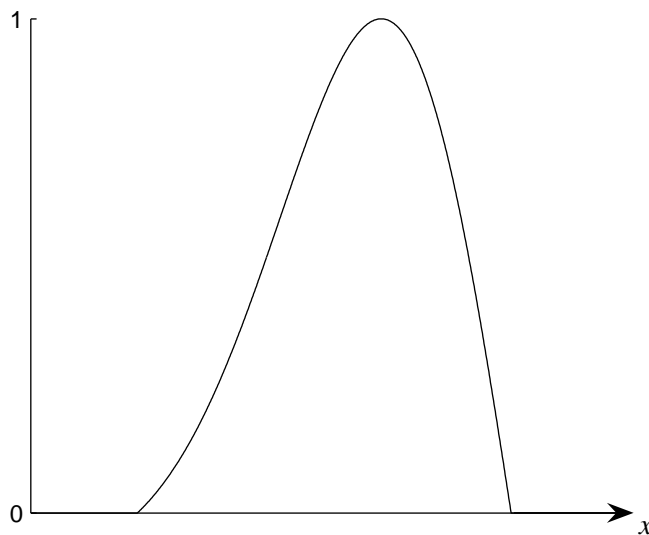


Figure 3.5 – Exemple de fonction caractéristique d'un nombre flou

Les concepts que les agents développent sont des généralisations dans \mathbb{R}^n des nombres flous dans \mathbb{R} , avec n le nombre de dimensions de leur espace conceptuel. Chacune des trois propriétés énoncées ci-dessus se généralise facilement à \mathbb{R}^n , et se traduit en terme de caractéristiques des catégories :

- (1') $\exists x_0 \in \mathbb{R}^n, \mu_F(x_0) = 1$:

Cette propriété exprime qu'il existe au moins un point de l'espace conceptuel dont l'appartenance à la catégorie est totale : le prototype de la catégorie.

$$(2') \forall x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n, \forall \lambda \in [0, 1], \mu_F(\lambda \cdot x_2 + (1 - \lambda) \cdot x_1) \geq \min(\mu_F(x_1), \mu_F(x_2)) :$$

Cette propriété exprime que les catégories sont convexes : si un objet o_1 est perceptuellement plus similaire au prototype de la catégorie que ne l'est un autre objet o_2 , alors o_1 est plus typique de la catégorie que o_2 . Belpaeme (2002, p. 61) met en avant que sa représentation des catégories par des réseaux à fonctions de base radiale a l'avantage de pouvoir représenter des catégories non-convexes (comme par exemple la catégorie de la figure 3.4). Dans la lignée de Gärdenfors (2000), nous pensons au contraire que les catégories sont des régions convexes dans un espace conceptuel.

$$(3') \{x \in \mathbb{R}^n, \mu_F(x) \neq 0\} \text{ est borné :}$$

Cette propriété exprime qu'il existe des objets qui n'appartiennent pas à la catégorie.

Les propriétés énoncées ci-dessus sont vérifiées par une vaste classe de fonctions. Le développement de catégories pertinentes par les agents nécessite de les modifier en fonction de leurs interactions. Il est alors souhaitable que la forme des fonctions caractéristiques permette une manipulation simple. Nous avons opté pour une représentation des nombres flous proposée par Kaufmann & Gupta (1985), largement répandue, basée sur les α -coupes.

Étant donné un sous-ensemble flou $F \subset \mathbb{R}$, l' α -coupe F_α est définie par :

$$F_\alpha = \{x \in \mathbb{R}, \mu_F(x) \geq \alpha\} \quad (3.2)$$

D'après la propriété (2), une α -coupe d'un nombre flou est un segment de \mathbb{R} . Un ensemble de N paires

$$\{([x_i, x'_i], \alpha_i), 0 \leq i < N, [x_i, x'_i] \supset [x_{i+1}, x'_{i+1}], 0 < \alpha_i < \alpha_{i+1} \leq 1, \alpha_{N-1} = 1\}$$

définit donc un nombre flou F dont la fonction caractéristique est (figure 3.6) :

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin [x_0, x'_0] \\ \alpha_i & \text{si } x \in [x_i, x'_i] \text{ et } x \notin [x_{i+1}, x'_{i+1}] \\ 1 & \text{si } x \in [x_{N-1}, x'_{N-1}] \end{cases}$$

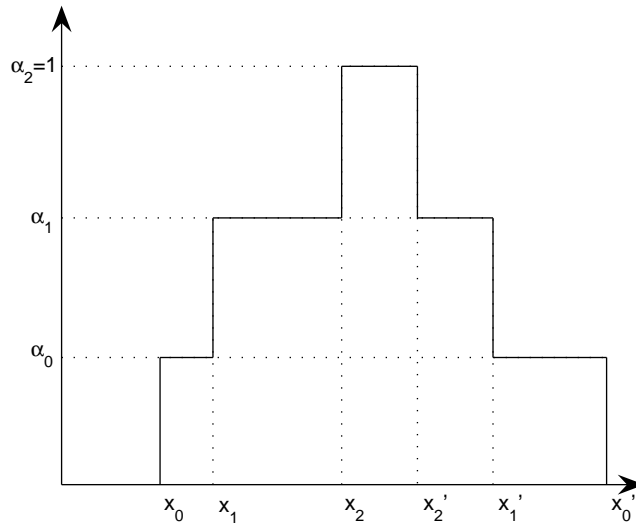


Figure 3.6 – Fonction caractéristique μ_F d'un nombre flou F définie par $\{([x_0; x'_0], \alpha_0), ([x_1; x'_1], \alpha_1), ([x_2; x'_2], \alpha_2)\}$

Les nombres flous définis par des α -coupes sont généralisés dans \mathbb{R}^n en remplaçant les segments $[x_i, x'_i]$ par des hypersphères de centre c_i et de rayon r_i . La figure 3.7 représente la fonction caractéristique d'un nombre flou dans \mathbb{R}^2 .

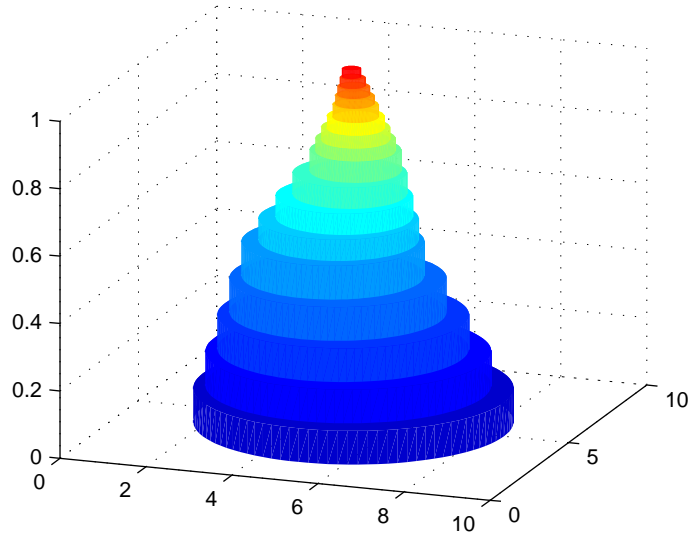


Figure 3.7 – Fonction caractéristique d’un nombre flou dans \mathbb{R}^2 définie par un ensemble d’ α -coupes

Les concepts des agents sont des nombres flous dans \mathbb{R}^n définis par des α -coupes. De plus, à chaque concept C est associé un score de confiance $U_C \in [0, 1]$ qui reflète la confiance de l’agent en l’utilité du concept. Enfin, à chaque concept est associé un mot. Dans toutes les simulations que nous présenterons dans ce chapitre, les agents seront dotés d’un espace conceptuel bidimensionnel, dans lequel ils développeront des concepts définis à partir de 10 α -coupes. La i^e α -coupe, $0 \leq i < 10$, correspond à la valeur $\alpha_i = \frac{1}{10-i}$.

2.2 Structure de l'environnement

Les agents sont situés dans un environnement composé d'objets qu'ils sont en mesure de percevoir. Percevoir un objet signifie dans notre modèle : extraire les caractéristiques de l'objet afin de le représenter par un point de l'espace conceptuel. Nous considérons que tous les agents perçoivent les objets de la même manière : un objet donné a les mêmes coordonnées dans l'espace conceptuel de chacun des agents. Aussi, les objets sont définis par leurs coordonnées dans les espaces conceptuels des agents.

Les objets du monde qui nous entourent ont des similarités perceptuelles. Les catégories de niveau de base que nous possédons sont basées sur la ressemblance perceptuelle des objets qui les composent. Nous suivons Rosch (1978) sur le fait qu'"une hypothèse de travail sur les objets de niveau de base est que, (1) dans le monde tel qu'il est perçu, se trouvent des amas, riches en information, d'attributs perceptuels et fonctionnels qui forment des discontinuités naturelles et que (2), les découpages de base effectués par la catégorisation s'effectuent au niveau de ces discontinuités". Nous verrons à la section 2.5.2 comment se traduit dans notre modèle le second point. Le premier, quant à lui, est directement reflété par le fait que les objets se regroupent en amas dans les espaces conceptuels des agents. La figure 3.8 montre l'environnement des agents tel qu'il apparaît dans leur espace conceptuel : il est composé de 9 amas comprenant chacun 10 objets. Smith (2003b) a par ailleurs montré que la communication est plus efficace dans environnement structuré que dans un environnement aléatoire.

Bien que structuré, l'environnement des agents n'est pas statique. Au sein de chaque amas, les objets sont renouvelés toutes les 500 interactions. Les simulations

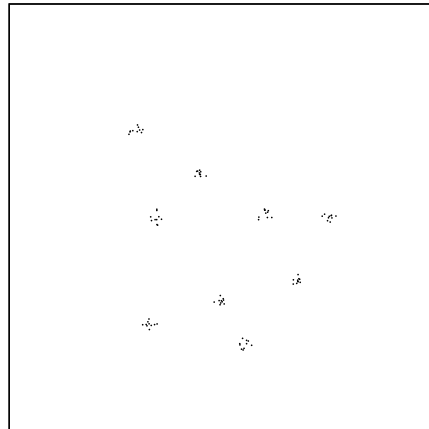


Figure 3.8 – Environnement des agents

que nous présenterons dans la troisième partie de ce chapitre auront comme objectif d'étudier le comportement du lexique lorsque l'évolution du monde est plus drastique, c'est-à-dire lorsque la position des amas change au cours du temps.

2.3 Structure de la population

La population est constituée de deux générations de 10 agents. Toutes les 10000 interactions, la plus ancienne de ces deux générations est retirée de la simulation et est remplacée par une nouvelle. Ces nouveaux agents n'ont encore aucun concept et aucun mot pour discourir avec les autres membres de la population. Ils ont 10000 interactions pour acquérir le savoir culturel accumulé par les générations antérieures auprès des agents de la génération qui les précède. Après quoi, ce sera leur tour de transmettre ce savoir à la génération suivante.

2.4 Protocole des interactions

Ce transfert de savoir s'effectue par le biais des interactions linguistiques qui ont lieu entre les agents. Ces interactions prennent place entre deux agents : l'un d'entre eux tient le rôle de *professeur*, l'autre celui d'*élève*. Le professeur est choisi aléatoirement dans l'ensemble de la population, tandis que l'élève ne peut appartenir qu'à la plus jeune des deux générations. Au tout début des simulations, cette dernière règle est enfreinte. Les simulations débutent avec une seule génération, à laquelle appartiennent le professeur et l'élève. À la 10000^e interaction, une nouvelle génération est introduite et les principes de sélection du professeur et de l'élève peuvent être appliqués.

Une fois le professeur et l'élève sélectionnés dans la population, le professeur choisit un objet de l'environnement et le désigne à l'élève afin de lui indiquer non linguistiquement son choix. Le but de l'élève est alors de catégoriser et de nommer l'objet. Il est possible que l'élève ait plusieurs concepts qui se recouvrent et lui permettent de catégoriser l'objet désigné. Le concept effectivement utilisé pour catégoriser l'objet est alors choisi aléatoirement parmi les concepts en compétition C_k en fonction de leur score de confiance U_{C_k} et du degré d'appartenance $\mu_{C_k}(o)$ de l'objet aux catégories définies par les concepts. La probabilité p_{C_k} de choisir le concept C_k pour catégoriser l'objet o est :

$$p(C_k) = \frac{\mu_{C_k}(o) \cdot U_{C_k}}{\sum_i \mu_{C_i}(o) \cdot U_{C_i}} \quad (3.3)$$

L'élève utilise alors le mot associé au concept pour nommer l'objet. Le professeur vérifie que le mot employé par l'élève est associé à un de ses propres concepts

permettant de catégoriser l'objet choisi. Si c'est effectivement le cas, le professeur confirme à l'élève qu'il a employé le mot à bon escient. Ce dernier augmente alors le score de confiance du concept qu'il a utilisé pour catégoriser l'objet et affine le concept utilisé pour catégoriser l'objet afin que celui devienne plus typique de la catégorie. Ces deux opérations sont respectivement détaillées dans les sections 2.5.1 et 2.5.3.

L'interaction peut échouer pour différentes raisons. Tout d'abord, il se peut que l'élève ne parvienne pas à catégoriser l'objet car le point de l'espace conceptuel le représentant n'est couvert par aucun concept. Dans ce cas, le professeur tente de catégoriser et nommer l'objet. S'il y parvient, l'élève modifie sa structure conceptuelle de manière à apprendre à associer le mot du professeur avec l'objet. Cet apprentissage prend des formes différentes selon que l'élève connaît déjà ou pas le mot du professeur ; les détails en sont exposés dans les sections 2.5.2 et 2.5.3. Le professeur peut néanmoins être dans la même situation que l'élève, et n'avoir aucun concept adapté pour catégoriser et nommer l'objet. Il invente alors un nouveau mot et les deux agents créent un nouveau concept associé à ce mot et centré sur l'objet.

Il se peut aussi que le professeur ne soit pas d'accord avec le mot employé par l'élève. L'élève diminue alors le score de confiance du concept qu'il a utilisé. Si le professeur a un autre mot à proposer à l'élève, celui-ci apprend à associer ce mot à l'objet.

2.5 Modification de la structure conceptuelle

En réponse au déroulement des interactions, les agents sont amenés à modifier leur structure conceptuelle, c'est-à-dire à modifier les scores de confiance associés

à leurs concepts, créer de nouveaux concepts ou modifier des concepts existants. Cette section détaille ces opérations.

2.5.1 Modification des scores de confiance

Lorsque l'élève utilise un mot à bon escient, il augmente le score de confiance du concept associé au mot selon l'équation 3.4. Parallèlement, il abaisse le score de confiance de tous les autres concepts qui étaient en compétition selon l'équation 3.5.

$$U' = U + \min(U, 1 - U) \cdot \mu(o) \cdot \delta \quad (3.4)$$

$$U' = U - \min(U, 1 - U) \cdot \mu(o) \cdot \delta \quad (3.5)$$

Le paramètre δ est fixé à 0.2 et o est le point de l'espace conceptuel correspondant à l'objet qu'il fallait nommer. Lorsque le score de confiance d'un concept devient inférieur à 0.1, le concept est oublié par l'agent et supprimé de son espace conceptuel.

2.5.2 Création de concepts

L'élève est amené à créer un nouveau concept lorsque le professeur lui propose de nommer l'objet par un mot qu'il ne connaît pas encore. Le professeur crée parfois aussi un nouveau concept, lorsque ni l'élève ni lui ne disposent de mot pour désigner l'objet.

Lorsqu'un agent crée un nouveau concept, la seule information dont il dispose, outre le mot qui lui est associé, est que ce concept doit être utilisé pour catégoriser l'objet de l'interaction. Ce concept est donc créé de la manière suivante : toutes les α -coupes sont centrées sur l'objet, et la n^{e} α -coupe a pour diamètre $\frac{R_{new}}{n+1}$, où

R_{new} est un paramètre fixé à un $1/30^{\circ}$ de la taille des espaces conceptuels. Le score de confiance d'un concept nouvellement créé est fixé à 0.5. Le second point de l'hypothèse de travail de Rosch (1978) citée section 2.2 se traduit dans notre modèle par le fait que le rayon R_{new} est le même que celui des amas d'objets tels qu'ils sont perçus par les agents dans leur espace conceptuel.

2.5.3 Modification des concepts

Lorsqu'un élève doit modifier l'un de ces concepts, deux cas de figure peuvent se présenter : soit l'objet ne tombait pas dans le champ du concept et le concept doit alors être étendu de manière à pouvoir inclure l'objet, soit l'objet pouvait déjà être catégorisé par le concept et ce dernier doit alors être affiné.

Extension de concept

Un agent étend un concept lorsqu'il est informé que le mot qui lui est associé peut-être utilisé pour nommer un objet jusqu'alors hors de la catégorie définie par le concept. L'extension se manifeste par la modification des centres et des diamètres des α -coupes du concept. Il semble raisonnable de penser qu'en pareille circonstance l'agent a intérêt à ne pas remettre en cause l'ensemble de son savoir sur cette catégorie et à considérer qu'il s'agit d'un objet à la périphérie de celle-ci. Les α -coupes sont donc d'autant moins modifiées que la valeur α qui leur est associée est proche de 1. De même, plus le score de confiance U du concept est proche de 1, moins le concept est modifié. L' α -coupe α_0 est modifiée de manière à inclure l'objet. Le rayon r des autres α -coupes est modifié selon l'équation 3.6 :

$$r' = r + \frac{d-r}{2} \cdot (1-U) \cdot (1-\alpha) \quad (3.6)$$

où d est la distance entre l'objet et le centre de l' α -coupe.

Le centre P des α -coupes $\alpha_i, i > 0$ est modifié de manière à ne pas généraliser dans la direction opposée à l'objet selon l'équation 3.7 (figure 3.9) :

$$P' = \frac{\beta_1 \cdot P + \beta_2 \cdot O}{\beta_1 + \beta_2} \quad (3.7)$$

où O est le point représentant l'objet, $\beta_1 = r' - r = \frac{d-r}{2} \cdot (1-U) \cdot (1-\alpha)$ et $\beta_2 = d - \beta_1$.

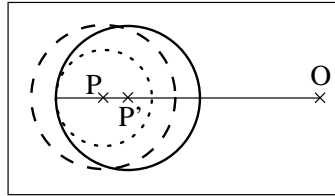


Figure 3.9 – α -coupe de centre P avant son extension vers l'objet O (pointillés), après modification de son rayon (tirets) et après modification de son centre (ligne pleine).

Affinement de concept

L'affinement d'un concept C est une opération similaire à l'extension, à la différence que l'objet O fait déjà partie de la catégorie définie par le concept. A moins que $\mu_C(O) = 1$, l'objet n'appartient pas à toutes les α -coupes du concept. Celles auxquelles n'appartient pas l'objet sont modifiées de la même manière que lors de l'extension de concept, selon les équations 3.6 et 3.7. Les α -coupes auxquelles appartient l'objet sont modifiées en les recentrant et en les resserrant autour de l'objet.

Leur centre est modifié selon l'équation 3.8 :

$$P' = \gamma \cdot O + (1 - \gamma) \cdot P \quad (3.8)$$

où O est le point représentant l'objet, $\gamma = \alpha \cdot (1 - U)$.

Le rayon des α -coupes est modifié de manière à ce qu'elles soient incluses dans ce qu'elles étaient avant la modification du centre selon l'équation 3.9 (figure 3.10) :

$$r' = r - d_{PP'} \quad (3.9)$$

où $d_{PP'}$ est la distance entre l'ancienne position du centre et la nouvelle.

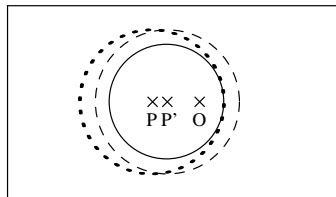


Figure 3.10 – α -coupe de centre P avant son affinement autour de l'objet O (poin-tillés), après modification de son centre (tirets) et après modification de son rayon (ligne pleine).

3 Simulations

3.1 Mesures

Avant de présenter les simulations conduites avec notre modèle, il est nécessaire d'introduire plusieurs mesures qui permettront d'en décrire le comportement : le *succès* et la *stabilité*.

Succès Le succès est une mesure calculée toutes les 1000 interactions et qui est définie comme la proportion d'interactions réussies au cours des 1000 dernières interactions.

Stabilité La stabilité est une mesure calculée à chaque renouvellement de génération. Son calcul repose sur la similarité entre les structures conceptuelles développées par les agents. La similarité entre deux agents A_1 et A_2 est calculée de la manière suivante : pour chaque mot, on calcule le volume $V_{A_1 \cap A_2}$ de l'intersection des nombres flous associés aux deux agents. L'intersection de deux nombres flous est la somme des volumes des intersections des hypersphères des α -coupes. Si l'un des deux agents ne connaît pas le mot, le volume de l'intersection est nul. On calcule les volumes V_{A_1} et V_{A_2} des espaces conceptuels des agents, définis comme la somme des volumes des hypersphères de leurs concepts. $\frac{V_{A_1 \cap A_2}}{V_{A_1}}$ (resp. $\frac{V_{A_1 \cap A_2}}{V_{A_2}}$) représente la part de savoir de A_1 (resp. A_2) partagé avec A_2 (resp. A_1). La similarité S_{A_1, A_2} entre les agents A_1 et A_2 est définie par :

$$S_{A_1, A_2} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{V_{A_1 \cap A_2}}{V_{A_1}} + \frac{V_{A_1 \cap A_2}}{V_{A_2}} \right) \quad (3.10)$$

Lorsque la génération G_i est retirée de la simulation, la similarité intra-générationnelle S_{G_i} est calculée en effectuant la moyenne des similarités entre tous les agents de cette génération. La similarité inter-générationnelle $S_{G_i \cap G_{i-1}}$ est calculée en effectuant la moyenne des similarités entre chaque agent de G_i et ceux de la génération G_{i-1} retirée au renouvellement précédent. La stabilité Stb_i est alors définie par :

$$Stb_i = \frac{2 \cdot S_{G_i \cap G_{i-1}}}{S_{G_i} + S_{G_{i-1}}} \quad (3.11)$$

3.2 Expérience 1

Cette première expérience effectuée avec notre modèle a pour objectif de montrer que sa dynamique conduit à un état dans lequel les agents sont en mesure de communiquer efficacement entre eux. Nous étudierons en particulier comment le lexique se maintient de génération en génération. Dans cette première expérience, les agents sont dans un environnement dont les amas d'objets sont statiques, dans la configuration illustrée par la figure 3.8. Nous avons effectué 10 simulations de 150000 interactions.

3.2.1 Succès et stabilité

La figure 3.11 représente l'évolution du succès et de la stabilité au cours des 150000 interactions. Le succès atteint rapidement une valeur proche de 1 pour s'y maintenir, à l'exception de brefs épisodes de moindre succès apparaissant réguliè-

rement, toutes les 10000 interactions. Ces épisodes sont dus au renouvellement des générations : à leur introduction, les agents des générations nouvelles n'ont aucun concept et aucun lexique, et leurs premières interactions se concluent nécessairement pas des échecs. Ils acquièrent néanmoins rapidement le savoir nécessaire auprès de leur aînés, en quelques centaines d'interactions. La toute première génération, dont les agents doivent, en l'absence d'aînés, créer un lexique de toute pièce, atteint un taux de succès supérieur à 90% en moins de 2500 interactions.

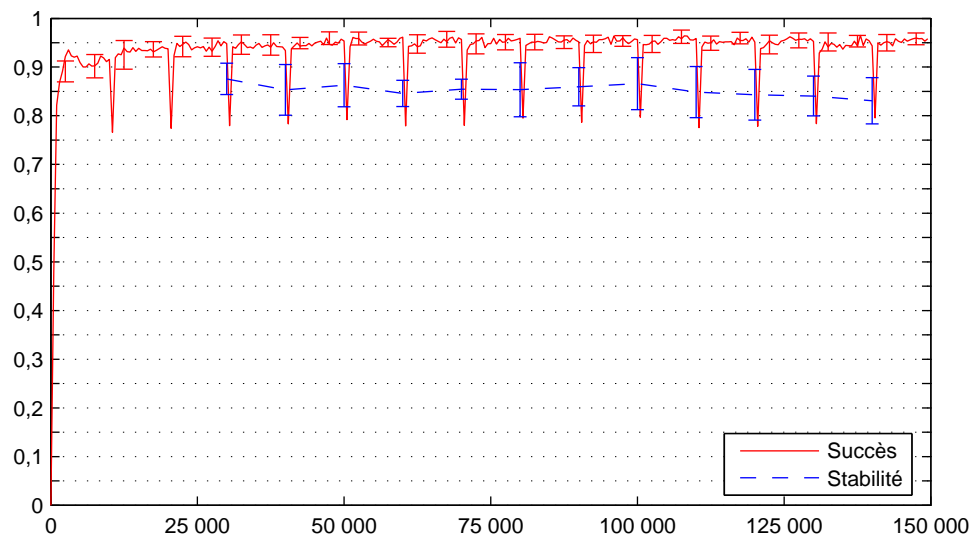


Figure 3.11 – Évolution des moyennes sur les 10 simulations du succès et de la stabilité au cours des 150000 interactions.

La stabilité est relativement stable tout au long des 150000 interactions, et avoisine la valeur de 0.85 : la similarité intra-générationnelle est toujours supérieure à la similarité inter-générationnelle. Pour comprendre pourquoi, il nous faut examiner le lexique des populations.

3.2.2 Composition du lexique

La figure 3.12 indique le nombre de mots dans la population et le nombre moyen de mots connus par les agents d'une population lorsqu'elle est ôtée de la simulation. Le nombre de mots dans la population est globalement constant, à l'exception du début des simulations, pendant la période d'établissement du lexique. Le nombre moyen de mots connus par les agents d'une génération au moment où celle-ci est retirée de la simulation est aussi globalement constant, mais moindre que le nombre total de mots présents dans la population : chaque agent ne connaît qu'à peine plus de la moitié des mots de la population.

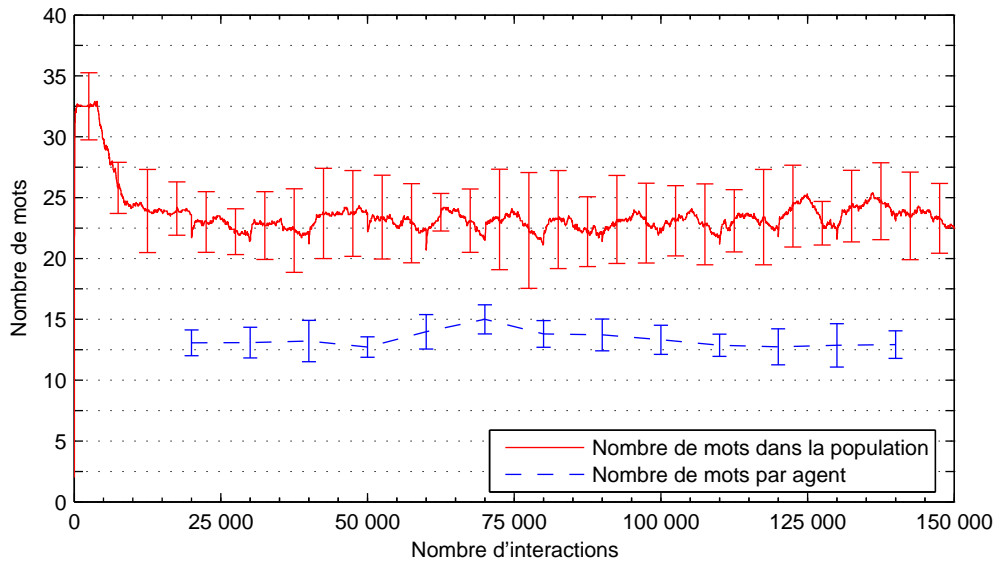


Figure 3.12 – Nombre de mots dans la population et nombre moyen de mots connus par chaque agent.

Chaque mot est utilisé en moyenne pour désigner 9.62 objets : les catégories définies par les concepts associés aux mots recourent les amas d'objets de l'environ-

nement. L'histogramme de la figure 3.13 donne le nombre de générations pendant lesquelles persistent les mots. Dans les 10 simulations que nous avons effectuées, 9 mots perdurent pendant 13 générations, c'est-à-dire pendant toute la durée des simulations. Ces 9 mots constituent le vocabulaire de base, établi par la première génération, puis transmis de génération en génération. Ils sont partagés par tous les agents.

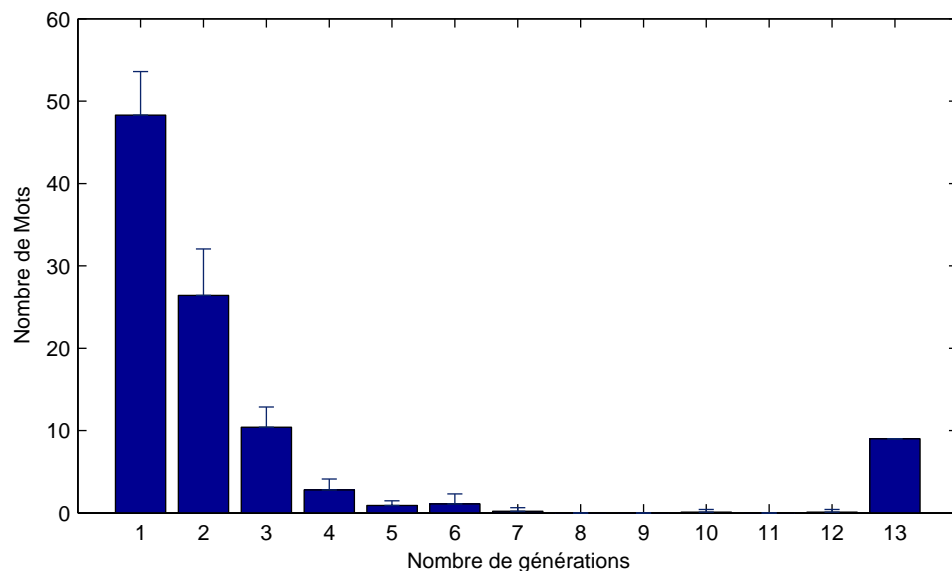


Figure 3.13 – Durée de vie des mots dans la population.

Les autres mots sont créés par les générations successives. Ils ne sont connus que par une partie de la population, et ont de fait moins de chance d'être transmis d'une génération à l'autre que les mots partagés par tous les agents. Leur durée de vie est donc plus limitée. La figure 3.14 donne l'historique des mots utilisés pour désigner un des amas au cours de l'une des 10 simulations (cette figure est typique de tous les amas de toutes les simulations). On y constate que la confiance en ce vocabulaire plus volatile est inférieure à celle en du vocabulaire de base. La

juxtaposition du vocabulaire de base et du vocabulaire volatile entraîne des patterns de synonymie spécifiques à chaque génération qui expliquent la différence entre la similarité intra-générationnelle et la similarité inter-générationnelle. Les prochaines expériences vont montrer que ce vocabulaire volatile constitue un réservoir lexical utilisé lorsque le lexique de la population a besoin de s'adapter à un environnement en évolution.

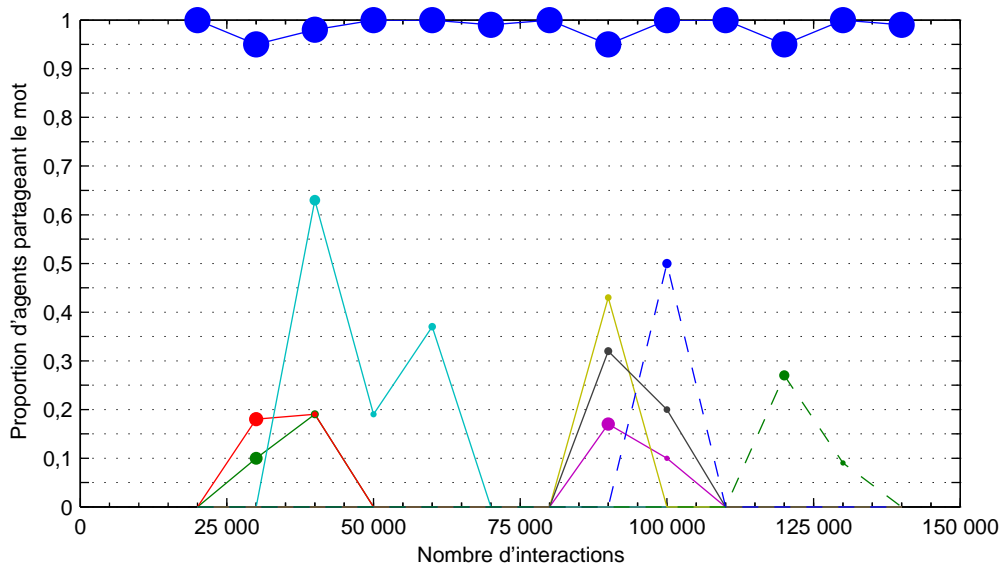


Figure 3.14 – Mots en compétition pendant une des 10 simulations pour désigner un des amas d'objets. Chaque courbe représente la diffusion d'un mot dans la population. Le diamètre des points est proportionnel au score de confiance moyen. La courbe du haut est celle du mot du vocabulaire de base, les autres celles du vocabulaire volatile.

La figure 3.18-a généralise la figure 3.14 en donnant une représentation graphique de la dynamique du lexique pour un des amas au cours des 10 simulations de l'expérience 1. Le diamètre d'un point correspond au nombre moyen de mots, au cours des 10 simulations, connus par toutes les générations comprises entre celle

retirée à l'interaction indiquée par la ligne à laquelle appartient le point, et celle retirée à l'interaction indiquée par sa colonne. La couleur donne la moyenne du nombre maximum d'agents ayant connu les mots représentés par le point. Ainsi, le point en haut à droite correspond au terme du lexique de base : sa taille nous apprend qu'il correspond à une moyenne de 1 mot par simulation ; sa ligne nous apprend que ce mot est connu dès la première génération, et sa colonne qu'il l'est jusqu'à la dernière ; enfin, sa couleur indique que ce mot est connu par 10 agents. Le vocabulaire volatile est observable sur la diagonale : la densité de points proches de la diagonale, ainsi que leur taille, nous apprend que des mots sont régulièrement créés, mais sans persister dans la population. Leur couleur nous confirme que ces mots restent confinés à un petit groupe d'agents seulement.

3.3 Expérience 2 à 8

La première expérience utilisait des simulations se déroulant dans un environnement statique. Les sept expériences suivantes vont étudier la réponse du lexique à une évolution de l'environnement. Ullmann avait donné comme causes possibles de changements sémantiques les *causes historiques*, selon lesquelles un changement sémantique intervient lorsque une unité lexicale est conservée alors que son référent, et de fait son sens, change au cours du temps (voir chapitre I, section 1.2.1. Nous allons étudier les conditions de conservation d'une unité lexicale en fonction de la vitesse de changement de son référent.

Les expériences 2 à 8 consistent chacune en 10 simulations lors desquelles l'environnement des populations va passer de l'état présenté à la figure 3.8 à celui présenté à la figure 3.15. Ces sept expériences ne diffèrent que par la rapidité à laquelle

ce changement va s'effectuer. Le tableau 3.2 détaille ces différences.

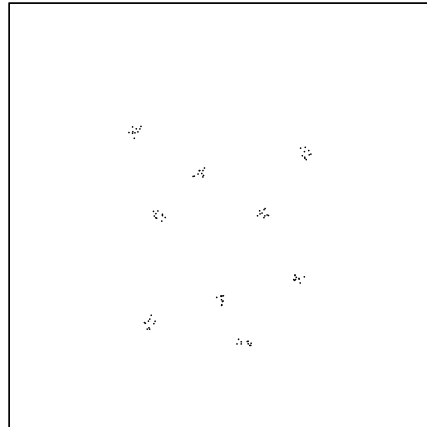


Figure 3.15 – État final de l'environnement des agents lors des expériences 2 à 8. L'amas en haut à droite s'est déplacé par rapport l'état initial (figure 3.8)

	Nombre d'interactions	Interaction à laquelle débute le changement	Interaction à laquelle se termine le changement
Expérience 2	150000	50000	70000
Expérience 3	150000	50000	100000
Expérience 4	200000	50000	150000
Expérience 5	300000	50000	250000
Expérience 6	400000	50000	350000
Expérience 7	500000	50000	450000
Expérience 8	600000	50000	550000

Tableau 3.2 – Nombre d'interactions et début et fin de l'évolution de l'environnement dans les expériences 2 à 8.

3.3.1 Succès et stabilité

La figure 3.16 représente l'évolution du succès lors des expériences 2 à 8. Un seul des 9 amas de l'environnement est modifié lors de ces expériences, et si ce

changement rendait complètement impossible toute communication à propos des objets composant l'amas, le taux de succès serait de l'ordre de 0.84. C'est dans l'expérience 2 que le succès est le plus affecté par le changement d'environnement. Au cours de cette expérience, en dehors des périodes de renouvellement de génération, le taux de succès n'est jamais inférieur à 0.91. Les agents sont donc en mesure de réagir afin de maintenir un taux de succès communicatif élevé, et ce d'autant plus efficacement que le changement est lent.

La figure 3.17 présente l'évolution de la stabilité au cours des expériences 2 à 8. Comme pour le succès, la rapidité avec laquelle intervient le changement de l'environnement influe sur l'évolution de la stabilité. Lorsque le changement intervient sur des durées très supérieures à la durée de vie d'une génération, la stabilité est peu, ou pas, affectée. Pour des temps plus courts, la similarité inter-générationnelle diminue, impliquant une baisse de la stabilité.

3.3.2 Composition du lexique

Les figures 3.18-b à h représentent la dynamique des mots utilisés pour l'amas subissant le changement lors des expériences 2 à 8. Dans l'expérience 2, le changement d'environnement, qui intervient entre les 50000^e et 70000^e interactions, a pour effet de bouleverser le lexique : le mot du vocabulaire de base, créé par la première génération, disparaît systématiquement avec la génération d'agents retirée des simulations à la 50000^e interaction, c'est-à-dire avec la dernière génération précédant le changement. Suit alors une vague de création lexicale produisant des mots éphémères, expliquant la baisse de stabilité observée (figure 3.17). L'observation de la dernière colonne (figure 3.18-b) nous renseigne sur les mots utilisés à la fin des

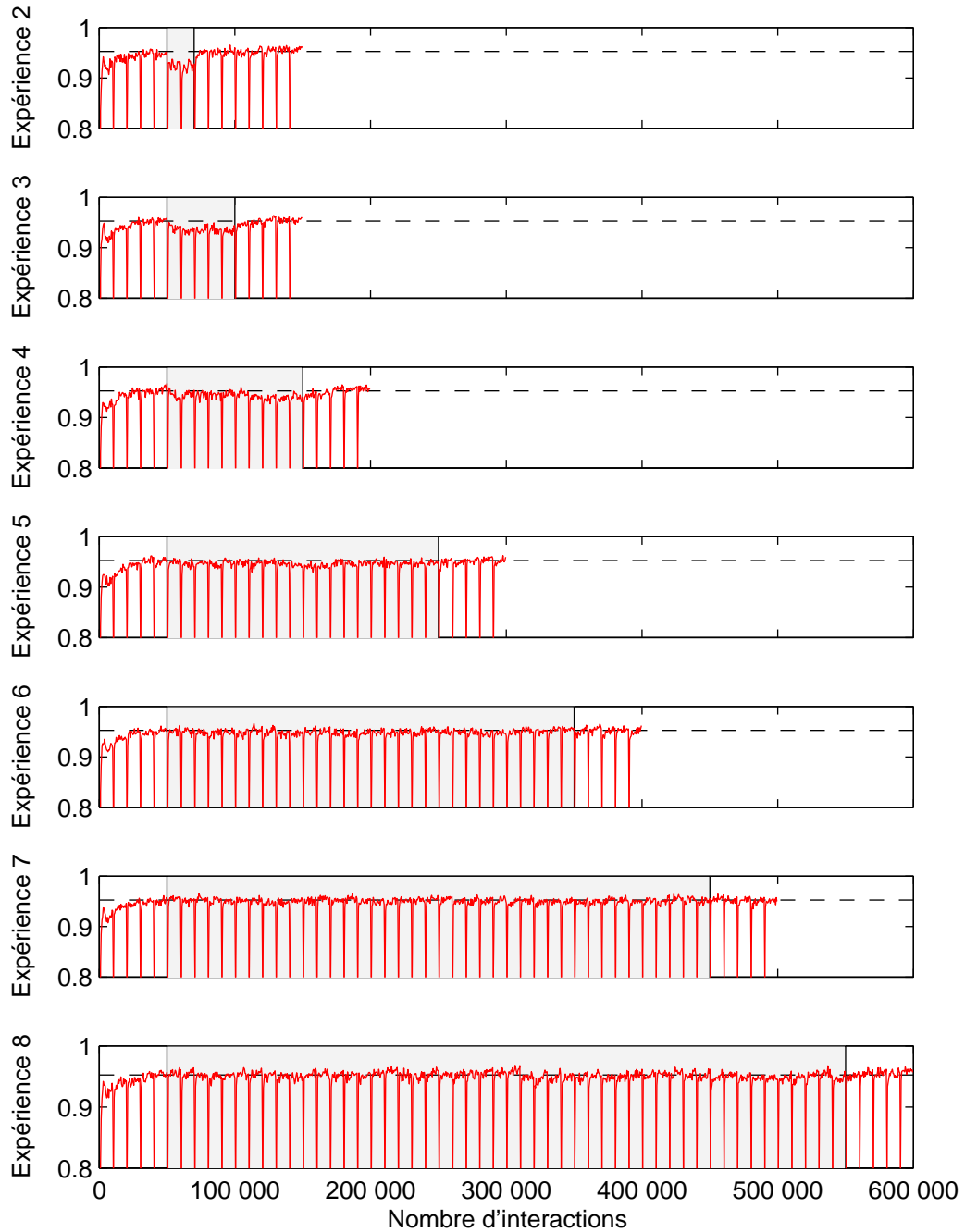


Figure 3.16 – Évolution du succès lors des expériences 2 à 8. La ligne en pointillé représente la valeur moyenne du succès (hors période de renouvellement) lors de l'expérience 1 : 0.952. Les changements dans l'environnement ont lieu dans les zones grisées. Les barres d'erreur ne sont pas indiquées pour des raisons de lisibilité.

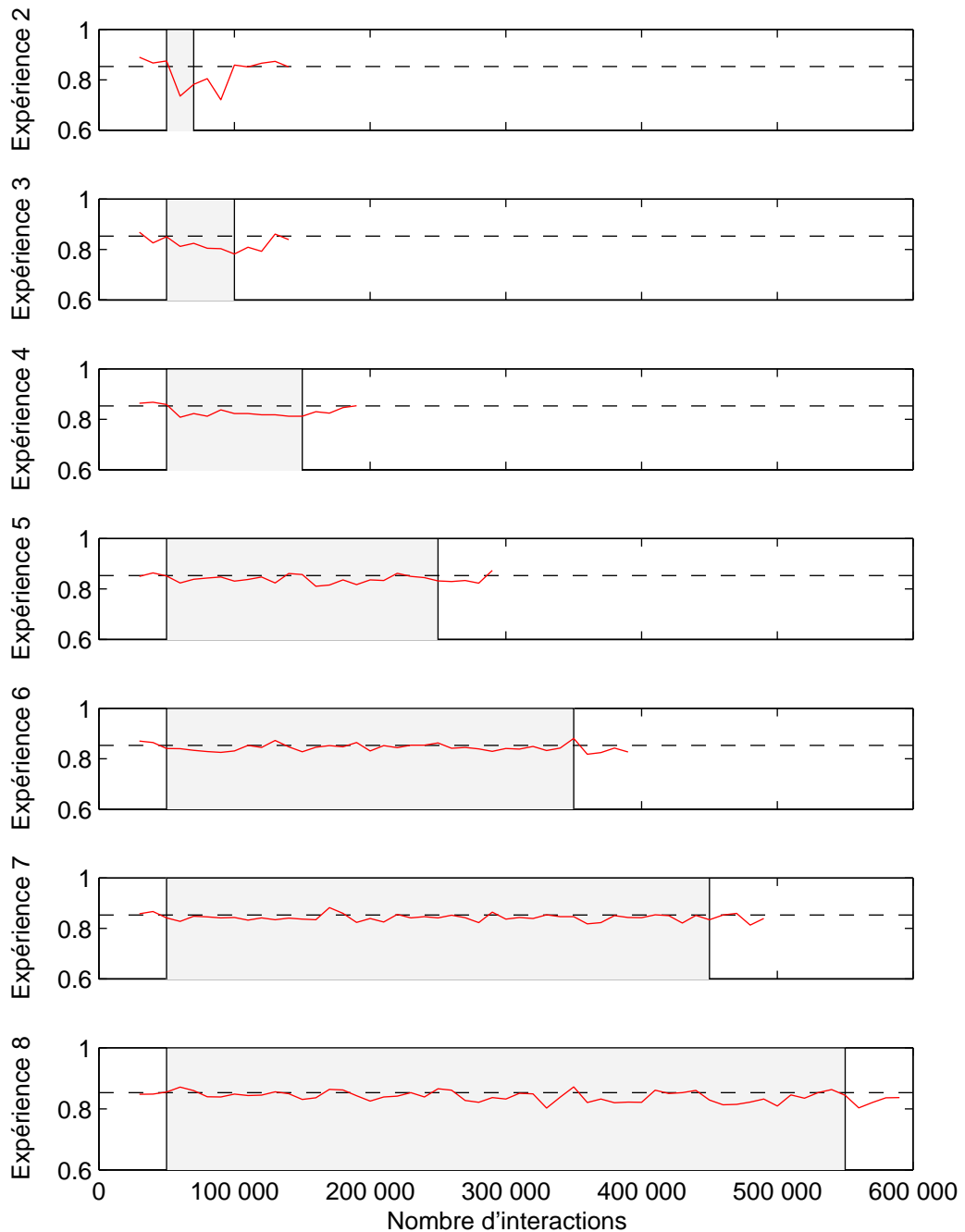


Figure 3.17 – Évolution de la stabilité lors des expériences 2 à 8. La ligne en pointillé représente la valeur moyenne de la stabilité lors de l'expérience 1 : 0.853. Les changements dans l'environnement ont lieu dans les zones grisées. Pour des raisons de lisibilité, les barres d'erreur ne sont pas indiquées.

simulations pour désigner l'amas ayant subi le changement. La situation est similaire à celle de la fin de l'expérience 1 : 1 mot appartenant au vocabulaire de base, partagé par tous les agents, et en moyenne 0.1 mot créé peu avant la fin des simulations, partagé par peu d'agents, appartenant au vocabulaire volatile. La différence avec l'expérience 1 est que le mot du vocabulaire de base est créé par la génération retirée à la 70000^e interactions. La ligne correspondant à cette génération témoigne de la compétition lexicale à la fin du changement pour renouveler le vocabulaire de base.

Les expériences 3 à 8 présentent des situations s'étalant graduellement entre celle produite lors de l'expérience 2 (un changement abrupt) et celle produite lors de l'expérience 1 (pas de changement). Le mot du vocabulaire de base créé par la première génération persiste d'autant plus longtemps que le changement est lent. Parallèlement, le mot du vocabulaire de base utilisé à la fin des simulations est créé d'autant plus tôt que le changement est lent. À partir de l'expérience 5, il arrive que le mot du vocabulaire de base créé par la première génération soit celui toujours utilisé après la fin du changement de l'environnement ; à l'expérience 8, c'est quasi systématique.

Sur la figure 3.18 la densité des points, ainsi que leur taille et leur couleur, sont directement fonction de la compétition lexicale, c'est-à-dire de la synonymie, pour désigner l'amas d'objet en évolution. Cette information est plus explicitement rapportée sur la figure 3.19. La synonymie est stimulée par les changements de l'environnement, et ce d'autant plus que ces changements sont rapides.

3.3 Expérience 2 à 8

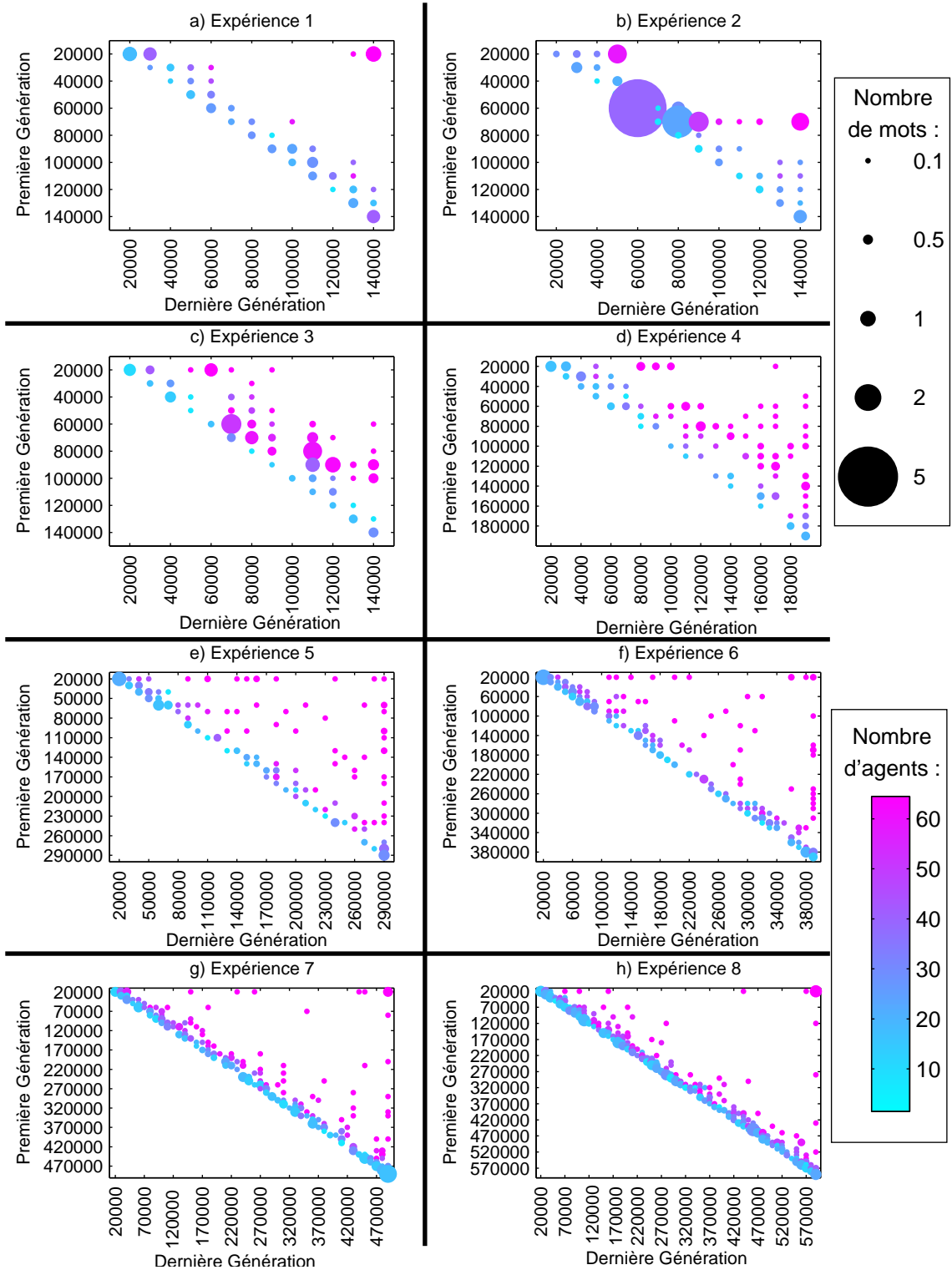


Figure 3.18 – Représentation de la dynamique des lexiques lors des expériences 1 à 8. Voir les explications section 3.2.2.

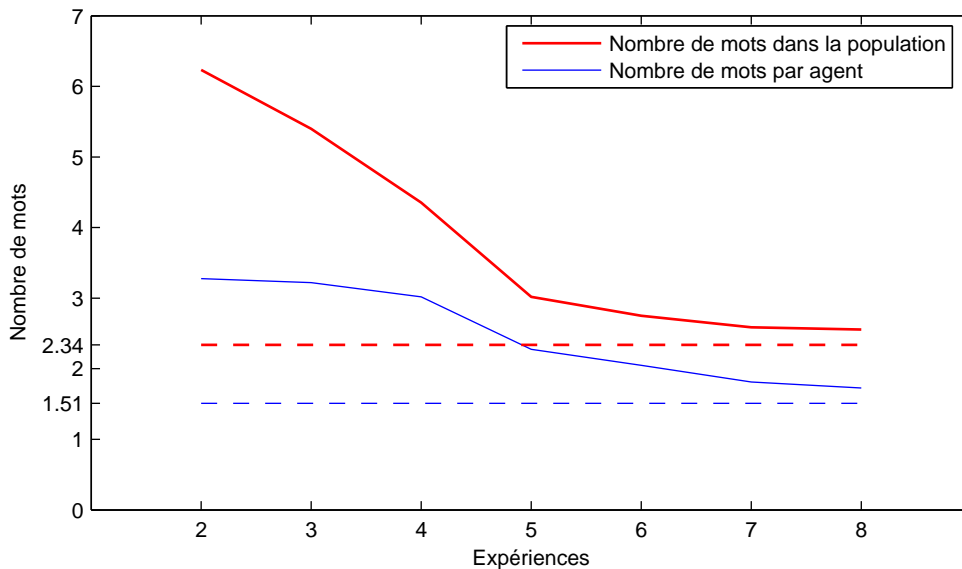


Figure 3.19 – Synonymie pour désigner l’amas d’objets en changement lors des expériences 2 à 8 pour les générations d’agents ayant vécu le changement. Les lignes en pointillé rouge et bleue représentent respectivement le nombre moyen de mots dans la population et le nombre moyen de mots par agent lors de l’expérience 1.

3.4 Discussion

Ce chapitre a présenté une série d’expériences conduites avec un modèle s’inscrivant dans la linguistique évolutionnaire. Alors que ce type de modèle est généralement utilisé pour étudier les conditions d’émergence de propriétés du langage et des langues, nous avons employé le nôtre pour l’étude de l’évolution du lexique en réponse à l’évolution de l’environnement des locuteurs.

Nous avons établi une typologie des modèles qui les distingue en trois classes selon leur traitement de la sémantique : les modèles à sémantique publique, les mo-

dèles à sémantique privée avec catégories classiques et les modèles à sémantique privée avec catégories prototypiques. Ces derniers sont les plus réalistes car, d'une part, ils évitent l'écueil du paradoxe de la redondance de la forme souligné par Smith (2003a) et caractéristique des modèles à sémantique publique et, d'autre part, car ils prennent en compte, à la différence des modèles à sémantique privée avec catégories classiques, l'effet de prototype lors de la catégorisation (section 3.1.3). Notre modèle, qui suit les recommandations de Smith (2003b) (en distinguant un environnement publique, des représentations sémantiques internes, et un ensemble de formes elles aussi publiques) et qui utilise des représentations sémantiques (basées sur des nombres flous) exhibant un effet de prototype, est l'un des seuls, avec celui de Belpaeme (2001, 2002), à appartenir à la classe des modèles à sémantique privée avec catégories prototypiques.

Parmi les différentes causes possibles aux changements sémantiques, Ullmann a identifié les *causes historiques*, selon lesquelles un mot change de sens suite à l'évolution de son référent (voir section 1.2.1). Nous avons utilisé notre modèle pour étudier l'impact sur le lexique de changements intervenant dans l'environnement. Une première expérience a montré que notre modèle permet l'apparition et le maintien d'un lexique dans une population placée dans un environnement sans changement et structuré en 9 amas d'objets perceptuellement similaires. D'une part, ce lexique est composé d'un ensemble de 9 mots partagés par tous les agents et maintenus au cours des générations successives d'agents ; chacun de ses mots réfère à un et un seul amas d'objet. D'autre part, un second ensemble de mots s'ajoute au premier. Les mots de ce second ensemble réfèrent aussi à l'un des 9 amas, mais sont confinés à une petite partie des agents d'une génération et sont difficilement transmis d'une génération à l'autre. La superposition de ces deux types de mots produit un lexique

exhibant une faible synonymie.

Les sept autres expériences réalisées avec notre modèle ont été conduites dans un environnement où l'un des amas d'objets subit un changement, plus ou moins rapide selon les expériences. Pour des changements suffisamment longs (expériences 5 à 8 et, dans une moindre mesure, expériences 3 et 4), des mots référant à l'amas endurent le changement subsistent durant tout ou partie du changement. Ces mots sont l'objet d'un changement sémantique pour cause historique. En revanche, lorsque le changement dans l'environnement est très rapide (expérience 2), le maintien du mot devient impossible. Tout se passe comme si le changement consistait en la disparition d'un type d'objet (et donc des mots y référant) et en l'apparition concomitante d'un nouveau type d'objets nécessitant un nouveau nom. L'expérience 2 va dans le sens de la critique de Blank (1999) adressée à la classification des causes de changements sémantiques d'Ullman et qui propose de considérer les *causes historiques* et le *besoin d'un nouveau nom* comme les 2 pôles d'un même phénomène (section 1.2.4).

Enfin, dans les expériences 2 à 8, la synonymie, quasi inexistante dans un environnement stable, est stimulée par les changements dans l'environnement, et ce d'autant plus que les changements sont rapides. Ces expériences permettent de formuler l'hypothèse que l'une des causes de la synonymie observée dans les langues sont les changements opérant dans l'environnement des locuteurs.

CHAPITRE IV

Petits mondes

EN 1967, le psychologue de l'université de Harvard Stanley Milgram publia dans la revue populaire *Psychology Today* (Milgram, 1967) les résultats d'une expérience pour le moins originale. Après avoir tiré au sort les sujets de son expérience dans les annuaires téléphoniques du Kansas et du Nebraska, Milgram leur fit parvenir ses instructions. Il leur était demandé de faire parvenir une lettre à un destinataire commun habitant à Boston (soit à plus de 2000 km de chez eux) avec la contrainte suivante : les sujets ne pouvaient transmettre la lettre qu'à une personne qu'ils connaissaient personnellement, recommandant à celle-ci de faire de même afin que, de proche en proche, la lettre atteigne son destinataire. La stratégie à suivre, tant pour les sujets choisis par Milgram que pour tous les autres passeurs, était donc d'identifier dans leur entourage quelqu'un plus proche qu'eux-mêmes (géographiquement ou socialement) du destinataire final de la lettre.

Un nombre assez restreint de lettres atteignirent le destinataire, et Milgram étudia les chaînes de personnes ainsi constituées. De manière fort surprenante, ces chaînes étaient très courtes, de l'ordre de 6 personnes.

Ce que fit Milgram lors de son expérience fut de sonder le *réseau d'accointances* des habitants des États-Unis, et en particulier d'en évaluer la *longueur caractéristique*. La notion de réseau est présente dans un grand nombre de disciplines scientifiques : en sociologie (nous venons d'en voir un exemple), mais aussi en biologie (nous en verrons de nombreux exemples dans ce chapitre), en informatique (internet est sans doute le premier exemple qui vient à l'esprit de beaucoup à l'évocation du mot réseau), et bien sûr en linguistique (le chapitre suivant y sera consacré).

Les réseaux ont été largement étudiés par les mathématiciens sous le nom de graphes¹. La première partie de ce chapitre aura pour objectif de définir formellement les graphes et d'introduire des notions clés. L'utilisation des graphes pour décrire des phénomènes réels est ancienne, et la seconde partie présentera le modèle de graphes aléatoires d'Erdős et Rényi longtemps considéré comme référence pour la modélisation de réseaux. Dans la troisième partie, nous verrons que ce modèle n'est pas adapté à la description des réseaux que nous sommes à même de rencontrer dans la nature. Ces réseaux ont en effet des propriétés très particulières qui font d'eux des *petits mondes*, souvent *sans échelle*, une classe de graphes très différents de ceux du modèle Erdős et Rényi. Après avoir explicité ces propriétés, nous présenterons quelques modèles plus appropriés pour construire des graphes proches des

¹Deux terminologies coexistent : une approche mathématique de ces objets aura tendance à les appeler *graphes*, alors qu'une approche plus appliquée aura tendance à les nommer *réseaux*. Certaines notions définies à partir de ces objets peuvent avoir des noms différents dans l'une ou l'autre de ces terminologies. Quand nous définirons une notion appelée différemment selon l'approche, nous expliciterons les deux termes. Nous utiliserons la terminologie autour de *réseau* lorsque nous considérerons des objets réels, et celle autour de *graphe* pour des considérations sur les objets mathématiques.

réseaux que l'on peut observer. Enfin, nous clorons ce chapitre par la présentation des résultats de notre étude du réseau fonctionnel cérébral. La raison d'être essentielle de ce chapitre est d'introduire les outils et les concepts qui nous permettront d'aborder au prochain chapitre l'étude de réseaux lexicaux.

1 Éléments de théorie des graphes

1.1 Les ponts de Königsberg

La ville de Königsberg (aujourd'hui Kaliningrad, dans l'enclave russe de même nom, coincée entre la Pologne et la Lituanie) est construite sur deux îles. La première est reliée au continent par quatre ponts, la seconde par deux. De plus, un septième pont relie les deux îles entre elles (Figure 4.1). Au 18^e siècle les habitants de la ville se posèrent la question suivante : est-il possible de partir d'un endroit quelconque de la ville, de traverser une et une seule fois chaque pont, et de revenir au point de départ. Ce problème était loin d'être trivial, puisqu'il a fallu l'intervention d'Euler lui-même pour y apporter une réponse (c'était impossible). Ce faisant, il avait jeté les fondations de la théorie des graphes (Euler, 1736). Sa solution reposait sur l'idée de représenter la ville par un objet mathématique constitué de sommets et d'arêtes, un graphe (Figure 4.2).

Dans cette section nous définissons tous les concepts que nous utiliserons dans la suite de ce chapitre et dans le suivant. Dans un premier temps nous nous concentrerons sur des définitions très générales sur les graphes, puis nous détaillerons différentes mesures utilisées pour les caractériser.

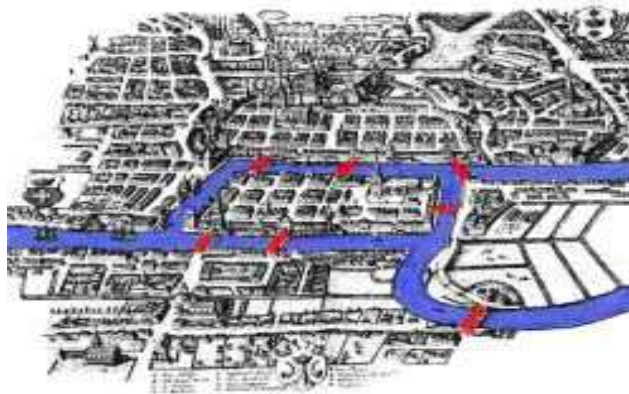


Figure 4.1 – Plan de la ville de Königsberg avec ses 7 ponts au 18^e siècle

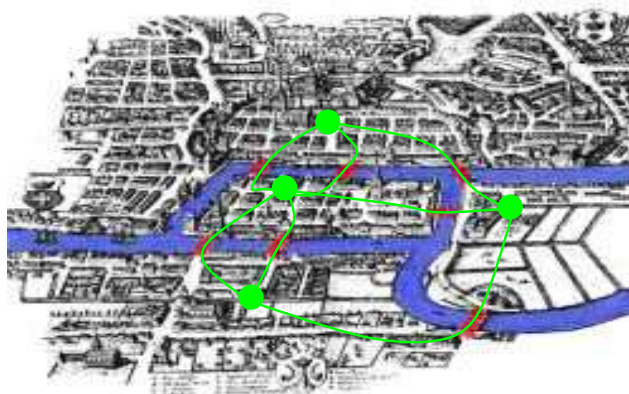


Figure 4.2 – Graphe construit à partir des ponts de Königsberg

1.2 Généralités sur les graphes

Définition 4.1 (Graphe, sommets et arêtes) Un graphe orienté G est constitué d'un ensemble S de sommets et d'un ensemble $A \subset S \times S$ de couples de sommets, les arcs.

Un arc (s_i, s_j) est constitué d'un sommet initial, s_i et d'un sommet final, s_j .

Si l'orientation des arcs n'est pas pertinente, on parlera alors de graphe non-orienté et de l'arête $\{s_i, s_j\}$

Un graphe est aussi appelé un réseau, et l'on parlera alors de nœud pour désigner les sommets et de liens pour les arcs ou les arêtes.

Pour plus de clarté, les graphes sont souvent représentés sous une forme graphique où les sommets sont des points et les arêtes des segments entre ces points (voir Figure 4.3).

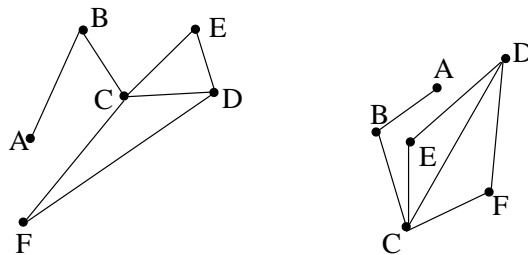


Figure 4.3 – Deux représentations graphiques du même graphe défini par $S = \{A, B, C, D, E, F\}$ et $A = \{\{A, B\}, \{B, C\}, \{C, E\}, \{C, D\}, \{C, F\}, \{D, E\}, \{D, F\}\}$

Définition 4.2 (Sous-graphe) Un sous-graphe de $G = (S, A)$ est un graphe $G' = (S', A')$ tel que $S' \subset S$ et $A' = A \cap S' \times S'$

Définition 4.3 (Voisins) L'ensemble des voisins d'un sommet s_i est l'ensemble des sommets s_j tels que (s_i, s_j) est une arête du graphe.

Définition 4.4 (Chemin) *On appelle chemin une suite de sommets $P = (s_0, \dots, s_n)$ telle que s_i et s_{i+1} sont voisins pour tout $i < n$.*

On appelle longueur du chemin P et on note $|P|$ le nombre de sommets de P .

On appelle plus court chemin entre s_i et s_j , le chemin entre les sommets s_i et s_j composé du plus petit nombre de sommets. Ce chemin n'est pas nécessairement unique.

Définition 4.5 (Graphe connexe, composante connexe) *Un graphe est dit connexe si pour tout couple de sommets s_i et s_j il existe un chemin entre s_i et s_j .*

Si G est un graphe non connexe, on nomme composantes connexes les sous-graphes G'_i de G tels que :

1. G'_i est connexe
2. Il n'existe pas de sous-graphe G' tel que G' est connexe et G'_i est un sous-graphe de G'

On appelle plus grande composante connexe d'un graphe G non connexe la composante connexe constituée du plus grand nombre de sommets. Elle n'est pas nécessairement unique.

1.3 Caractérisation des graphes

La définition d'un graphe est très générale et les objets y répondant peuvent être très différents les uns des autres. Les définitions que nous avons données nous permettent déjà de distinguer plusieurs classes de graphes : orientés ou non, connexes ou non. Ces distinctions sont intéressantes mais pas assez fines pour caractériser correctement les différents graphes auxquels nous allons être confrontés. Nous allons

présenter ici des mesures portant sur les graphes qui vont nous apporter la finesse nécessaire.

Définition 4.6 (Degré d'un sommet) *On appelle degré du sommet s_i , et on note k_i , le nombre de voisins du sommet s_i . On notera $\langle k \rangle_G$ la moyenne des degrés des sommets d'un graphe G .*

Nous nous intéresserons plutôt à la distribution des degrés d'un graphe G , c'est-à-dire la probabilité $P_G(k)$ qu'un de ses nœuds soit de degré k .

Définition 4.7 (Longueur caractéristique et diamètre) *Soit un graphe G . On nomme longueur caractéristique et on note ℓ_G la moyenne des plus courts chemins entre toutes les paires de sommets de G . On appelle diamètre et l'on note D_G le plus grand des plus courts chemins que l'on peut trouver dans G .*

Un graphe ayant un petite longueur caractéristique est un graphe dans lequel on peut rapidement passer de proche en proche d'un nœud à un autre.

Définition 4.8 (Densité) *On nomme densité du graphe $G = (S, A)$ la grandeur*

$$d_G = \frac{2 \cdot |A|}{|S| \cdot (|S| - 1)}$$

La densité d'un graphe est le rapport entre son nombre d'arêtes et le nombre d'arêtes qu'aurait un graphe complètement interconnecté ayant le même nombre de sommets.

Définition 4.9 (Coefficient de regroupement) *Soient s un sommet d'un graphe G , k_s son nombre de voisins et n le nombre d'arêtes entre les k_s voisins de s . La grandeur $C_s = \frac{2 \cdot n}{k_s \cdot (k_s - 1)}$ est nommée le coefficient de regroupement du sommet s .*

On note C_G , coefficient de regroupement du graphe G , la moyenne des coefficients de regroupement de tous les sommets de G

Alors que d est une mesure globale de la densité d'un graphe, le coefficient de regroupement est une mesure locale. Elle indique la tendance qu'ont les sommets d'un graphe à former des amas fortement interconnectés.

Les graphes sont des outils puissants de modélisation des réseaux. Encore faut-il pouvoir construire un graphe aux propriétés concordantes avec le phénomène observé. Euler a, sans aucun doute, un mérite immense à avoir su forger la notion de graphe pour représenter la ville de Königsberg et ses ponts. Cependant, il est trivial de construire ce graphe car il est de taille très modeste. Mais pour des réseaux plus complexes, tels que le réseau d'acointances des États-Unis étudié par Milgram, la construction d'un graphe exact relève de l'impossible : Milgram aurait par exemple eu à interroger les 200 millions d'individus qui peuplaient alors le pays sur l'identité des quelques dizaines de concitoyens qu'ils comptaient dans leurs relations. Pour contourner ce problème, la démarche adoptée est de construire un graphe non pas représentant exactement le réseau que l'on cherche à étudier, mais partageant avec lui suffisamment de propriétés. Le modèle longtemps cité en référence pour la construction de ces graphes est celui d'Erdős et Rényi que nous allons à présent examiner.

1.4 Le modèle de graphes aléatoire d'Erdős et Rényi

Lorsque l'on a à faire à un graphe particulièrement complexe dont la structure nous est inconnue, celui-ci semble aléatoire. Aussi, c'est par des graphes aléatoires que l'on a longtemps modélisé les réseaux complexes observables dans la nature. L'étude des graphes aléatoires est née avec les travaux de Erdős & Rényi (1959, 1960).

Dans le modèle d'Erdős et Rényi, partant d'un nombre N de sommets et d'une probabilité p , on construit un graphe en créant chacune des $\frac{N(N-1)}{2}$ arêtes possibles avec une probabilité p (Figure 4.4).

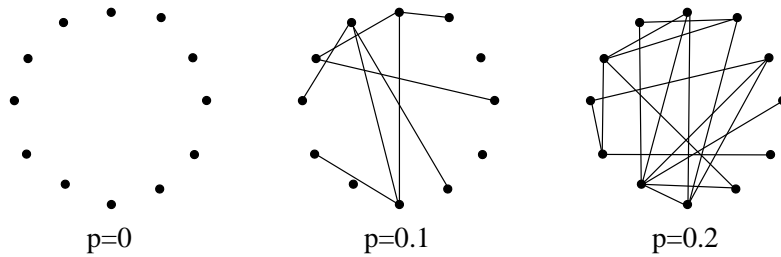


Figure 4.4 – Graphes aléatoires construits selon le modèle d'Erdős et Rényi avec $N = 12$ et $p \in \{0, 0.1; 0.2\}$

Un tel graphe aléatoire G a donc en moyenne $n = p \frac{N(N-1)}{2}$ arêtes, d'où :
 $d_G \simeq p$.

1.4.1 Distribution de degrés

Connaissant le nombre N de sommets et le nombre n d'arêtes d'un graphe, on peut déduire le degré moyen des sommets du graphe :

$$\langle k \rangle = \frac{2n}{N} = p(N-1) \simeq pN \quad (4.1)$$

D'après cette relation, un graphe aléatoire peut aussi bien être donné par les paramètres N et p que par les paramètres N et $\langle k \rangle$.

Calculons la probabilité qu'un sommet donné s_i ait comme degré k . Pour cela, considérons le mécanisme de construction du graphe du point de vue de s_i . Pour chacune des $N-1$ arêtes potentielles de s_i , cette arête sera créée avec la probabilité p . La création d'une arête étant indépendante de celle des autres, le nombre k_i de

voisins du sommet s_i est donné par une loi binomiale :

$$P(k_i = k) = \binom{N-1}{k} p^k (p-1)^{N-1-k} \quad (4.2)$$

La limite d'une distribution binomiale lorsque N tend vers l'infini et p vers 0 est une distribution de Poisson. Pour N suffisamment grand, on a donc (Figure 4.5) :

$$P(k_i = k) = \langle k \rangle^k \cdot \frac{e^{-\langle k \rangle}}{k!} \quad (4.3)$$

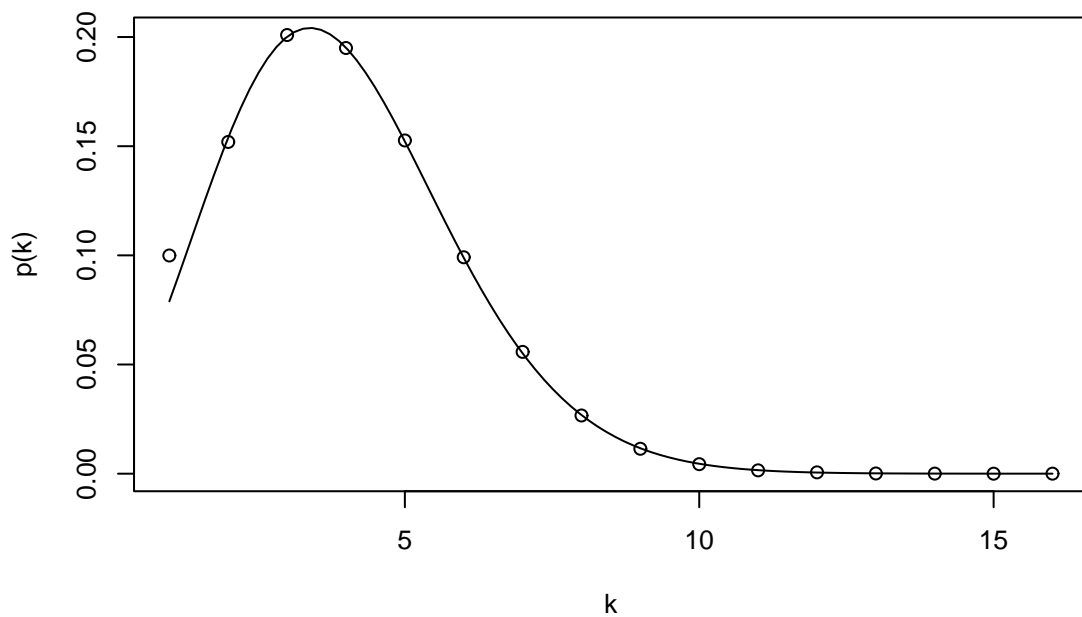


Figure 4.5 – Distribution de degrés d'un graphe aléatoire avec $N=70\,975$ et $\langle k \rangle = 3.9$ (ronds) et distribution théorique avec une loi de Poisson de paramètre 3.9 (ligne continue).

1.4.2 Coefficient de regroupement

Le coefficient de regroupement indique la tendance qu'ont les voisins d'un sommet à être voisins entre eux. Étant donné un sommet quelconque d'un graphe aléatoire, deux de ses voisins seront eux-mêmes voisins avec la même probabilité que n'importe quelle autre paire de sommets du graphe, c'est-à-dire p . On a donc :

$$C_{aléa} = p = \frac{\langle k \rangle}{N} \quad (4.4)$$

1.4.3 Longueur caractéristique

De nombreux auteurs ont étudié le diamètre des graphes aléatoires pour différentes valeurs de N et p . Chung & Lu (2001) reprennent les principaux résultats et les complètent. Ils montrent que si $\langle k \rangle \rightarrow +\infty$ quand $N \rightarrow +\infty$ alors le diamètre D est très probablement égal à $\ln(N)/\ln(\langle k \rangle)$. L'idée est que si le graphe est suffisamment peu dense, en partant d'un sommet donné, on a $\langle k \rangle^l$ sommets à une distance l . Pour atteindre tous les sommets du graphe en partant de ce sommet, il faut donc parcourir une distance l telle que $\langle k \rangle^l = N$, soit $l = \ln(N)/\ln(\langle k \rangle)$.

La longueur caractéristique est du même ordre de grandeur que le diamètre. On a donc :

$$\ell_{aléa} \sim \frac{\ln(N)}{\ln(\langle k \rangle)} \quad (4.5)$$

1.4.4 Les graphes aléatoires comme modèle des réseaux naturels

Le modèle d'Erdős et Rényi de graphes aléatoires a longtemps été utilisé comme modèle des réseaux naturels complexes. Néanmoins, à la fin des années 90, deux

articles (Watts & Strogatz, 1998 ; Barabási & Albert, 1999) ont montré, en étudiant les grandeurs définies ci-dessus, que ces réseaux naturels divergeaient grandement des graphes aléatoires. La section suivante expose quelques exemples de réseaux naturels complexes afin de mettre en lumière ces différences. La connaissance de ces exemples nous confèrera le recul nécessaire pour considérer correctement les réseaux lexicaux que nous étudierons au chapitre suivant.

2 Réseaux complexes naturels

2.1 Nombre d'Erdős

Erdős fut un des mathématiciens les plus surprenants mais aussi les plus prolifiques du 20^e siècle, avec quelques 1 500 articles écrits avec 507 collaborateurs différents. L'influence du personnage est telle que les mathématiciens s'attribuent ludiquement un *nombre d'Erdős*, défini de la façon suivante : Erdős lui-même a comme nombre d'Erdős 0. Les 507 mathématiciens ayant cosigné avec Erdős ont comme nombre d'Erdős 1. Tout mathématicien ayant cosigné un article avec l'un des 507 a comme nombre d'Erdős 2. D'une manière générale, le nombre d'Erdős d'un mathématicien est défini par récurrence comme étant le plus petit nombre d'Erdős parmi l'ensemble de ses collaborateurs passés, augmenté de 1.

On peut voir ce calcul d'une autre façon : les mathématiciens forment un réseau dont ils sont les nœuds. Dans ce réseau, il existe une arête entre deux mathématiciens s'ils ont cosigné ensemble. Ainsi le numéro d'Erdős d'un mathématicien est la longueur du plus court chemin qui le relie à Erdős dans ce graphe de collaboration. Existe-t-il des mathématiciens avec un grand numéro d'Erdős ? Quelles sont plus généralement les caractéristiques de ce réseau ? Est-il modélisable par un graphe aléatoire ? Dans les sections suivantes nous allons répondre à ces questions, pour ce réseau et un certain nombre d'autres : nous considérerons des réseaux sociaux, des réseaux technologiques ou encore biologiques. En particulier, nous détaillerons

nos propres résultats sur le réseau fonctionnel cérébral. Nous verrons que tous ces réseaux ont des caractéristiques communes, différentes de celles des graphes aléatoires.

2.2 Réseaux sociaux

Les réseaux sociaux sont des réseaux qui représentent des relations entre individus. Au début de ce chapitre, nous avons évoqué le graphe d'accointances des États-Unis dans lequel deux individus sont reliés entre eux s'ils se connaissent. Ce type de réseau social est ce que l'on peut imaginer de plus général. D'autres réseaux, représentant d'autres types de relations, ont été étudiés. Nous décrirons ici des réseaux de collaborations scientifiques, tels que celui qui conduit au calcul du nombre d'Erdős, et un réseau de collaborations cinématographiques.

2.2.1 Collaborations scientifiques

Il existe de nombreuses bases de données recensant les publications scientifiques, rendant facilement disponibles les données nécessaires à l'analyse des réseaux de collaborations. Aussi un certain nombre de champs scientifiques ont été étudiés de cette façon. Les collaborations mathématiques ont été étudiées par Barabási et al. (2002). Ces auteurs se sont concentrés sur des articles publiés entre 1991 et 1998. Le réseau qu'ils ont construit était constitué de 70 975 nœuds (mathématiciens). Le degré moyen des nœuds était $\langle k \rangle_{math} = 3.5$. La longueur caractéristique et le coefficient de regroupement mesurés étaient respectivement $\ell_{math} = 9.5$ et $C_{math} = 0.59$. Pour comparaison, la longueur caractéristique et le coefficient de regroupement d'un graphe aléatoire ayant le même nombre de nœuds et le même

degré moyen sont : $\ell_{aléa} = 8.2$ et $C_{aléa} = 5.5 \cdot 10^{-5}$. On a donc $\ell_{math} \simeq \ell_{aléa}$ et $C_{math} \gg C_{aléa}$. Par ailleurs, la distribution de degrés, c'est-à-dire du nombre de collaborateurs par auteur, diffère de celle d'un graphe aléatoire. Elle suit une loi de puissance (voir Figure 4.7) :

$$P(k) \sim k^{-\gamma} \quad (4.6)$$

L'observation d'une telle distribution nous indique qu'il y a beaucoup d'auteurs avec peu de collaborateurs, peu d'auteurs avec beaucoup de collaborateurs (Erdős est donc bien une exception) et surtout qu'il n'y a pas de nombre typique de collaborateurs. Ici, $\gamma_{math} = 2.5$.

Dans le même article, Barabási et al. (2002) étudient une autre base de données, concernant des publications en neurosciences. Le réseau construit était constitué de 209 293 nœuds et avait pour caractéristiques : $\langle k \rangle_{neuro} = 11.5$, $\ell_{neuro} = 6$ et $C_{neuro} = 0.76$. Si l'on compare ces valeurs avec celle d'un graphe aléatoire de même taille et de même densité, on obtient : $\ell_{neuro} \simeq \ell_{aléa} = 5.01$ et $C_{neuro} \gg C_{aléa} = 5.5 \cdot 10^{-5}$. De plus, la distribution de degrés de ce réseau suit elle aussi une loi de puissance avec $\gamma_{neuro} = 2.1$

Newman (2001b) a aussi étudié des réseaux de collaborations scientifiques, en utilisant 4 bases de données : MEDLINE qui a trait à la recherche biomédicale, Los Alamos e-Print Archive, qui contient des articles de physique théorique, SPIRES qui se concentre sur la physique des hautes énergies et NCSTRL, spécialisée en informatique. Les caractéristiques de ces réseaux sont données dans le Tableau 4.1. Ces 4 réseaux présentent eux aussi la particularité $\ell \simeq \ell_{aléa}$ et $C \gg C_{aléa}$. En revanche les distributions de degrés qu'observe Newman (2001b) diffèrent de celles obser-

vées par Barabási et al. (2002). Si elles suivent une loi de puissance pour les petites valeurs de k , pour les grandes la distribution décroît de manière exponentielle, soit plus rapidement qu’une loi de puissance (voir Figure 4.7). La forme générique de ces distributions en loi de puissance avec coupure exponentielle est :

$$P(k) \sim k^{-\gamma} e^{-\frac{k}{k_c}} \quad (4.7)$$

2.2.2 Collaborations cinématographiques

Si les mathématiciens s’attribuent des nombres d’Erdős, les acteurs hollywoodiens s’attribuent sur le même principe un nombre de Bacon. Le principe est identique, l’acteur Kevin Bacon jouant le rôle central (et ayant donc comme nombre de Bacon 0), et l’apparition de 2 acteurs dans un même film jouant le rôle de la

Réseaux	N	$\langle k \rangle$	ℓ	$\ell_{aléa}$	C	$C_{aléa}$	γ	k_c
MEDLINE	1 388 989	14.8	4.4	5.24	0.072	$1.06 \cdot 10^{-5}$	2.5	7300
Los Alamos	52 909	9.7	4.8	5.06	0.43	$1.8 \cdot 10^{-4}$	1.3	52.9
SPIRES	56 627	173	4.0	5.15	0.726	0.003	1.03	1200
NCSTRL	10 998	3.59	9.7	7.28	0.496	$3.26 \cdot 10^{-4}$	1.3	10.7

Tableau 4.1 – Nombres de nœuds (N), degrés moyens ($\langle k \rangle$), distances caractéristiques (ℓ), coefficients de regroupement (C) et exposants des lois de puissance (γ) suivies par les distributions de degrés des réseaux extraits par Newman (2001b) à partir des bases de données MEDLINE, Los Alamos e-Print Archive, SPIRES et NCSTRL. A titre de comparaison nous avons indiqué les distances caractéristiques ($\ell_{aléa}$) et coefficients de regroupement ($C_{aléa}$) de graphes aléatoires de taille et de degré moyen identiques.

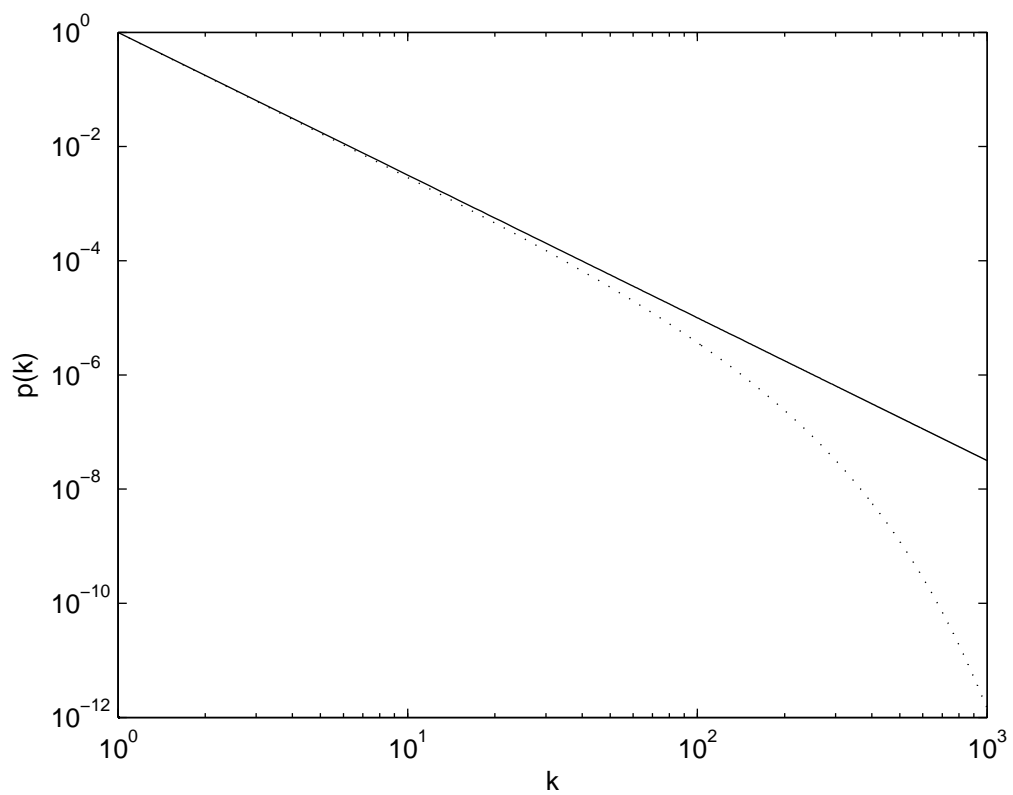


Figure 4.6 – Loi de puissance (ligne continue) avec $\gamma = 2.5$, et loi de puissance avec coupure exponentielle (ligne pointillée), avec $\gamma = 2.5$ et $k_c = 100$. Les axes du graphique ont des échelles logarithmiques. La loi de puissance apparaît comme une droite. La loi de puissance avec coupure exponentielle décroît plus rapidement.

collaboration scientifique ¹. Ce réseau a été étudié par Watts & Strogatz (1998) qui ont déterminé que ce réseau vérifiait $\ell \simeq \ell_{aléa}$ et $C \gg C_{aléa}$, et par Barabási & Albert (1999) qui ont montré que la distribution de degrés suivait une loi de Puissance. Amaral, Scala, Barthélémy, & Stanley (2000) ont néanmoins tempéré les affirmations de Barabási & Albert (1999) en montrant que cette distribution avait une coupure exponentielle.

2.3 Réseaux technologiques

Les réseaux sociaux ne sont pas les seuls réseaux que l'on peut observer. Cette section s'attache à décrire des réseaux de communication et de transport d'énergie.

2.3.1 Web

Le Web est constitué de pages hypertextes ayant la fabuleuse propriété de pouvoir être liées entre elles. Le Web est donc un réseau dans lequel les nœuds sont des pages et les arêtes les liens hypertextes entre ces pages. C'est même le plus grand réseau actuellement observable : le nombre de nœuds a dépassé le milliard à la fin de l'année 1999 et on évalue à 11.5 milliards le nombre de pages indexées par les moteurs de recherche début 2005 (Gulli & Signorini, 2005). De par sa taille, mais aussi et surtout de par son aspect très dynamique (de nouvelles pages apparaissent à chaque instant, tandis que d'autres disparaissent), il est quasi impossible de saisir ce réseau dans son ensemble. Les résultats portant sur le Web sont donc souvent des extrapolations à partir d'études portant sur une fraction de celui-ci.

¹Paul Erdős, apparaissant dans un documentaire sur sa vie, *N is a number*, dans lequel apparaissent également des acteurs de métier, a un nombre de Bacon : 4. En revanche, Kevin Bacon n'ayant jamais publié le moindre article mathématique, n'a pas nombre d'Erdős.

A la différence des réseaux que nous avons présentés jusqu'à présent, le graphe du Web est un graphe orienté : ce n'est pas parce qu'une page pointe vers une autre que la réciproque est vraie. Cette spécificité implique une redéfinition de la notion de degré. Dans un graphe orienté, le degré d'un sommet est constitué de 2 composantes qui doivent être considérées séparément : le degré entrant, k^{out} , qui correspond au nombre d'arcs dont le sommet est le sommet initial, et le degré sortant, k^{in} , qui correspond au nombre d'arcs dont le sommet est le sommet final. Les notions de degré moyen et de distribution de degrés sont étendues de la même façon.

Plusieurs études se sont penchées sur la distribution de degrés du Web, et toutes concluent que ses deux composantes suivent des lois de puissance : $P(k^{in}) \sim k^{-\gamma_{web}^{in}}$ et $P(k^{out}) \sim k^{-\gamma_{web}^{out}}$.

Albert, Barbasi, & Jeong (1999), en se basant sur un sous-graphe du Web de 325 729 pages ont mesuré $\gamma_{web}^{in} = 2.1$ et $\gamma_{web}^{out} = 2.45$. Kumar, Raghavan, Rajalopagan, & Tomkins (1999), à partir d'un échantillon de 40 millions de pages recueilli en 1997 ont obtenu $\gamma_{web}^{in} = 2.1$ et $\gamma_{web}^{out} = 2.38$. Broder et al. (2000) ont utilisé un sous-graphe de 200 millions de pages et ont déterminé $\gamma_{web}^{in} = 2.1$ et $\gamma_{web}^{out} = 2.72$.

Une vision alternative du Web a été adoptée par Adamic (1999) : plutôt que de considérer un graphe où chaque sommet représente une page, elle s'est placée au niveau des sites. Chaque sommet de ce graphe représente donc un site, et il existe un arc entre 2 sommets si l'une des pages du site correspondant au sommet initial pointe vers l'une des pages du site correspondant au sommet final de l'arc. Avec un graphe de 260 000 sommets, elle a obtenu $\gamma^{in} = 1.94$.

Le caractère orienté du graphe du Web ne permet pas de calculer le coefficient de regroupement tel que nous l'avons défini ci-dessus. Pour dépasser ce problème, Adamic (1999) a symétrisé un graphe de 153 127 sites et a calculé $C_{Web} = 0.1078$,

qui est très supérieur au coefficient de regroupement d'un graphe aléatoire de dimension et de densité similaires : $C_{aléa} = 2.3 \cdot 10^{-5}$.

La longueur caractéristique du Web, c'est-à-dire le nombre moyen de clics de souris nécessaires pour passer d'une page quelconque du Web à une autre, a été mesurée pour la première fois par Albert et al. (1999). Ils ont mesuré $\ell_{nd.edu} = 11.2$ pour leur sous-graphe de $N = 325\,729$ nœuds et ont extrapolé $\ell_{Web} \simeq 19$. Broder et al. (2000) ont mesuré $\ell_{Web} = 16$ sur leur échantillon de 200 millions de pages. Au niveau des sites, Adamic (1999) a mesuré $\ell_{sites} = 3.1$. Toutes ces mesures proposent des valeurs du même ordre de grandeur qu'un graphe aléatoire de dimension et de densité équivalentes.

2.3.2 Internet

Si le Web est un réseau de pages ou de sites, les ordinateurs sur lesquels reposent ce réseau forment eux aussi un réseau, le réseau Internet proprement dit. Il n'y a aucune raison de penser que ces deux réseaux, le Web et Internet, sont corrélés : ce n'est pas parce qu'une page pointe vers une autre que l'ordinateur sur lequel se trouve la première est relié directement à celui où se trouve la seconde. D'ailleurs, si le Web est un graphe orienté, il n'en est rien d'Internet : si un ordinateur peut communiquer avec un autre, alors la réciproque est vraie.

Comme son nom l'indique, Internet est en fait la mise en réunion de réseaux informatiques, nommés domaines. Donc, de la même manière que l'on peut observer le Web au niveau des pages ou au niveau des sites, il est possible de considérer Internet soit au niveau des ordinateurs qui le constituent, soit au niveau des domaines. Faloutsos, Faloutsos, & Faloutsos (1999) ont étudié Internet à ces deux niveaux. Dans

les deux cas, la distribution des degrés suit une loi de puissance avec $\gamma_{ordi} = 2.2$ et $\gamma_{domaines} = 2.48$.

Yook, Jeong, & Barabási (2002) ont étudié le coefficient de regroupement et la longueur caractéristique au niveau des domaines, et ont déterminé qu'en novembre 1999 on avait : $\ell_{domaines} = 3.77$ ($\ell_{aléa} = 6.18$) et $C_{domaines} = 0.3$ ($C_{aléa} = 0.001$).

2.3.3 Réseaux électriques

L'information n'est pas seule à voyager le long de fils électriques. C'est aussi le cas de l'énergie. Les réseaux que constituent les centrales électriques, les transformateurs et autres postes électriques reliés entre eux par les lignes électriques ont été étudiés. Watts & Strogatz (1998) se sont penchés sur le réseau électrique de l'ouest des États-Unis, constitué de $N = 4\,941$ nœuds, ayant en moyenne $\langle k \rangle_{elec} = 2.67$ voisins. Ils ont calculé que $\ell_{elec} = 18.7$ et $C_{elec} = 0.08$. Pour un graphe aléatoire avec le même nombre de nœuds et le même nombre d'arêtes, on a : $\ell_{aléa} = 12.4$ et $C_{aléa} = 0.005$. La distribution de degrés suit une loi de puissance selon Barabási & Albert (1999) ou une loi de puissance avec coupure exponentielle selon Amaral et al. (2000).

2.4 Réseaux biologiques

2.4.1 Réseaux métaboliques

Le métabolisme d'un organisme est l'ensemble des réactions chimiques qui s'effectuent en son sein afin de produire la matière et l'énergie qui lui sont nécessaires pour vivre. Chacune de ces réactions chimiques est coordonnée par une enzyme

qui transforme une ou plusieurs molécules dites *substrats* en nouvelles molécules dites *produits*. Le produit d'une réaction peut être le substrat d'une autre. Certaines réactions sont réversibles, d'autres non. Sur la base de ces considérations, il est naturel de concevoir le métabolisme d'un organisme comme un réseau dont les nœuds sont les composants qui participent aux réactions et dont les liens sont les réactions elles-mêmes (Barabási & Oltvai, 2004).

Jeong, Tombor, Albert, Oltvai, & Barabási (2000) ont étudié le réseau métabolique de 43 organismes de trois domaines de la vie différents (6 archaea, 32 bactéries et 5 eukaryotes). Ces réseaux étaient orientés et constitués $N = 430 (\pm 130)$ nœuds. Les distributions de degrés entrants et sortants de tous les réseaux suivent des lois de puissance semblable : $\gamma^{in} = 2.14 (\pm 0.07)$ et $\gamma^{in} = 2.22 (\pm 0.05)$.

A. Wagner & Fell (2001) ont considéré uniquement la bactérie *Escherichia coli*. Ils n'ont pas tenu compte de la possible réversibilité des réactions et ont donc obtenu un réseau non orienté. Celui-ci est constitué de $N = 275$ nœuds. La distribution de leur degré suit de nouveau une loi de puissance ($\gamma_{E. coli} = 1.77$). Ces auteurs ont aussi calculé le coefficient de regroupement ($C_{E. coli} = 0.48 \gg C_{aléa} = 0.017$) et la longueur caractéristique ($\ell_{E. coli} = 3.88 \simeq \ell_{aléa} = 3.78$).

2.4.2 Réseaux écologiques

Les espèces qui cohabitent au sein d'un écosystème se nourrissent les unes des autres, constituant ainsi un réseau alimentaire, propre à chaque écosystème, dans lequel les nœuds sont les espèces et où un lien entre 2 nœuds indique une relation proie / prédateur entre les espèces correspondantes.

Solé & Montoya (2002) ont étudié les réseaux alimentaires de trois des écosystèmes les mieux documentés : l'estuaire d'Ythan (en construisant 2 réseaux, à partir de 2 sources de données différentes ; $N_{Ythan_1} = 93$ et $N_{Ythan_2} = 134$), le parc de Silwood ($N_{Silwood} = 154$) et le lac de Little Rock ($N_{Little\ Rock} = 182$). Pour ce dernier écosystème, du fait des données, seulement 31% des nœuds du graphe construit par Solé & Montoya (2002) représentent des espèces. Les autres nœuds représentent des genres ou des niveaux encore plus élevés dans la hiérarchie taxonomique.

Tous ces réseaux présentent un coefficient de regroupement supérieur à celui d'un graphe aléatoire de même taille et de même densité :

- $C_{Ythan_1} = 0.21 > C_{aléa} = 0.09$;
- $C_{Ythan_2} = 0.22 > C_{aléa} = 0.06$;
- $C_{Silwood} = 0.15 > C_{aléa} = 0.03$;
- $C_{Little\ Rock} = 0.35 > C_{aléa} = 0.14$.

En revanche, leur longueur caractéristique est comparable à celle qu'aurait un graphe aléatoire de même taille et de même densité :

- $\ell_{Ythan_1} = 2.28 \simeq \ell_{aléa} = 2.09$;
- $\ell_{Ythan_2} = 2.43 \simeq \ell_{aléa} = 2.26$;
- $\ell_{Silwood} = 3.4 \simeq \ell_{aléa} = 3.23$;
- $\ell_{Little\ Rock} = 2.22 \simeq \ell_{aléa} = 1.6$.

Les réseaux alimentaires de l'estuaire d'Ythan et du parc de Silwood ont une distribution de degrés qui suit une loi de puissance :

- $\gamma_{Ythan_1} = 0.94$
- $\gamma_{Ythan_2} = 1.04$
- $\gamma_{silwood} = 1.13$

La distribution de degré du réseau alimentaire de lac de Little Rock ne ressemble

en revanche à aucune distribution particulière. Les auteurs interprètent ce fait par le grand nombre de nœuds de ce réseau ne correspondant pas à une espèce.

2.4.3 Réseaux neuronaux

Caenorhabditis elegans est un petit ver qui, entre autre du fait de sa totale transparence, a été activement étudié. *C. elegans* dispose d'un petit réseau de 302 neurones dont on connaît complètement la connectivité (Yamamoto & Achacoso, 1991). L'information neuronale étant, au niveau synaptique, transférée d'un neurone à l'autre de manière unidirectionnelle, ce réseau est orienté.

Watts & Strogatz (1998) en ont étudié la longueur caractéristique et le coefficient de regroupement. Ils ont déterminé $C_{C. elegans} = 0.8 \gg C_{aléa} = 0.05$ et $\ell_{C. elegans} = 2.65 \simeq \ell_{aléa} = 2.25$. Les distributions des degrés entrants et sortants ont été calculées par Amaral et al. (2000). Ces deux distributions sont presque identiques et suivent non pas une loi de puissance, mais une décroissance exponentielle :

$$P(k) \sim e^{-\beta k} \quad (4.8)$$

Lorsque l'on considère des espèces au système nerveux plus élaboré que *C. elegans*, il devient quasi impossible de recueillir des données sur la connectivité des neurones eux-mêmes, non seulement du fait de leur nombre ($6 \cdot 10^8$ chez le chat, $3 \cdot 10^9$ chez le macaque et $2 \cdot 10^9$ chez l'homme), mais surtout du fait du nombre de connexions entre ces neurones ($4.5 \cdot 12^8$ chez le chat, $2.2 \cdot 10^{13}$ chez le macaque et $1.5 \cdot 10^{14}$ chez l'homme ; Johansson & Lansner, 2004). Néanmoins, l'accroissement de la complexité des systèmes nerveux d'une espèce à l'autre ne se traduit pas uniquement en terme de nombre de neurones et de nombre de synapses. L'or-

ganisation structurelle reflète aussi cette complexité. La neuroanatomie décompose en effet les cerveaux en aires cérébrales et identifie des connexions entre ces aires cérébrales. Des réseaux anatomiques d'aires cérébrales ont ainsi été décrits, en particulier chez le chat (Scannell, Blakemore, & Young, 1995 ; Scannell, Burns, Hilgetag, O'Neil, & Young, 1999) et chez le macaque (Felleman & Van Essen, 1991 ; Young, 1993). Les propriétés de ces réseaux (orientés) ont été étudiées par Sporns & Zwi (2004 ; Sporns, Chialvo, Kaiser, & Hilgetag, 2004). Ces auteurs se sont plus particulièrement penchés sur le réseau du cortex visuel du macaque (CVM, 30 aires et 311 connexions), le réseau cortical du macaque (CM, 71 aires et 746 connexions) et le réseau cortical du chat (CC, 52 aires et 820 connexions). Ils ont déterminé $C_{CVM} = 0.5313$, $C_{CM} = 0.4614$, $C_{CC} = 0.5514$ (à chaque fois supérieur au coefficient de regroupement d'un graphe aléatoire comparable) et $\ell_{CVM} = 1.7256$, $\ell_{CM} = 2.3769$, $\ell_{CC} = 1.8114$ (à chaque fois comparable à la longueur caractéristique d'un graphe aléatoire comparable). Sporns & Zwi (2004) n'observent en revanche pas de loi de puissance dans les distributions de degrés de ces réseaux, sans toutefois fournir plus de détails sur ces distributions.

2.5 Caractéristiques des grands réseaux naturels

Dans la section précédente, nous avons passé en revue les propriétés de réseaux complexes provenant de domaines variés, de la biologie moléculaire à Internet, en passant par les collaborations scientifiques et artistiques et le transport d'énergie. De prime abord, on aurait pu s'attendre à ce que ces réseaux, d'origines aussi différentes, s'ils avaient eu quelque chose à partager, auraient partagé leur caractère quelconque, aléatoire. Au contraire, il se dégage, au regard de leurs propriétés, que

ce qui rend tous ces réseaux similaires est ce qui les démarque du modèle de graphe aléatoire d'Erdős et Rényi. Si leur longueur caractéristique est toujours du même ordre que celle d'un graphe aléatoire ayant le même nombre de nœuds et le même nombre d'arêtes, leur coefficient de regroupement est toujours supérieur (voire très largement supérieur), à celui d'un graphe aléatoire. De plus, dans la plupart des cas, les réseaux naturels ont une distribution de degrés suivant une loi de puissance, avec cependant, parfois, une coupure exponentielle. Il arrive aussi que ces distributions suivent des lois exponentielles (comme le réseau neuronal de *C. elegans*) ou encore d'autres types de distributions (Amaral et al., 2000). Mais jamais la distribution de leurs degrés ne répond à la loi de Poisson à laquelle obéissent les distributions de degrés des graphes aléatoires.

Ce sont Watts & Strogatz (1998) qui ont les premiers souligné que les réseaux complexes naturels ont comme particularité de posséder simultanément une petite longueur caractéristique et un grand coefficient de regroupement. Ils ont introduit le terme de *petit monde* (*small world*)¹ pour désigner les réseaux possédant ces deux propriétés. Quant à l'observation de la quasi-universalité de la loi de puissance dans la distribution de degrés des réseaux naturels, elle est due à Barabási & Albert (1999), qui ont introduit le terme de *réseaux sans échelle* pour les désigner.

Ces deux articles concluent à l'inadéquation du modèle de graphe aléatoire d'Erdős et Rényi pour modéliser les réseaux complexes naturels, et proposent des

¹Le terme de *petit monde* fait référence à l'article de Milgram (1967), et au fait que "le monde est petit", c'est-à-dire qu'il est relativement fréquent de rencontrer une personne avec laquelle, de manière inattendue, on partage une connaissance. Si "le monde est petit", c'est parce que, comme l'a mis en lumière Milgram, les chaînes d'acointances sont courtes. Ainsi, peu de connaissances nous séparent d'un individu quelconque, et lorsque que l'on rencontre quelqu'un, la probabilité d'avoir une connaissance en commun, c'est-à-dire la probabilité de n'être séparé que par une chaîne d'acointances de longueur 2, n'est pas négligeable.

Il est peut-être néanmoins malheureux d'avoir nommé ces réseaux du nom de la seule propriété qu'ils partagent avec les graphes aléatoires.

2.5 Caractéristiques des grands réseaux naturels

modèles alternatifs rendant compte pour le premier des hauts coefficients de regroupement, et pour le second de la distribution de degrés en loi de puissance. La section suivante présente ces deux modèles.

3 Graphes "petits mondes" et graphes "sans échelle"

3.1 Graphes petits mondes

Watts & Strogatz (1998) sont les premiers à avoir démontré que le modèle de graphe aléatoire d'Erdős et Rényi ne rend pas compte des propriétés observées dans les réseaux naturels. Leur argumentaire repose sur la notion de densité locale, qu'ils ont pu quantifier en introduisant la notion de coefficient de regroupement.

Les réseaux naturels sont peu denses : parmi tous les liens possibles (si chaque nœud était relié à tous les autres), peu existent réellement. Par contre, lorsque l'on considère un nœud d'un réseau naturel et l'ensemble de ses voisins, on obtient un sous-réseau dense, c'est-à-dire un sous-réseau dont les nœuds ont fortement tendance à être reliés, ce qui se traduit par un haut coefficient de regroupement. À l'inverse, comme nous l'avons vu à la section 1.4.2, la densité locale des graphes aléatoires est identique à leur densité globale. Les graphes aléatoires sont donc incapables de rendre compte des structures locales denses des réseaux naturels.

Il existe un autre type de graphes qui peuvent quant à eux présenter une forte densité locale : les graphes réguliers. On appelle *graphe régulier* un graphe construit par simple réplication d'un motif de base (figure 4.7). En revanche, ces graphes ont une grande longueur caractéristique.

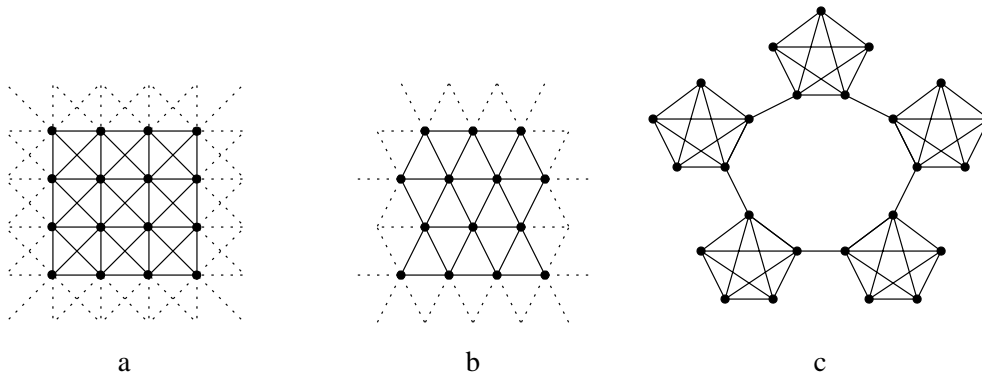


Figure 4.7 – Trois exemples de graphes réguliers. $C_a = 0.43$; $C_b = 0.6$; $C_c = 0.84$

Les réseaux naturels sont donc dotés de la petite longueur caractéristique des graphes aléatoires, et de la haute densité locale des graphes réguliers. L'idée du modèle de Watts & Strogatz (1998) est d'extrapoler entre l'ordre des réseaux réguliers et le désordre des réseaux aléatoires. Entre les deux, résident les petits mondes.

Le graphe régulier sur lequel s'appuie le modèle de Watts & Strogatz (1998) est un anneau de N sommets, où chaque sommet est connecté à ses k plus proches voisins. Ensuite, avec une probabilité p , l'une des extrémités de chaque arête est redirigée vers un sommet quelconque du graphe (figure 4.8).

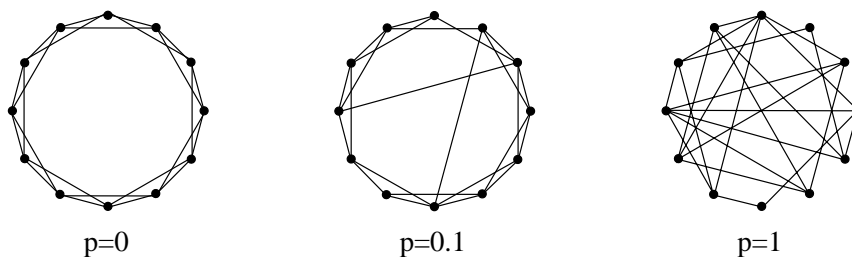


Figure 4.8 – Graphes construits selon le modèle de Watts et Strogatz avec $N = 12$, $k = 4$ et $p \in \{0, 0.1, 1\}$

Un graphe du modèle de Watts & Strogatz (1998) est donc défini par trois para-

mètres : son nombre de sommets N , son degré moyen k , et une probabilité de rebranchement p . Si $p = 0$, le graphe est un anneau régulier où chaque nœud a comme degré k . Son coefficient de regroupement est alors élevé, et sa longueur caractéristique est grande. Si $p = 1$, le graphe est un graphe aléatoire (au sens d'Erdős et Rényi) de degré moyen k . Son coefficient de regroupement est alors faible, et sa longueur caractéristique courte. La figure 4.9 présente l'évolution de ces deux grandeurs en fonction de p . On y observe que rapidement, la longueur caractéristique décroît fortement tandis que le coefficient de regroupement reste à peu près constant. La raison est qu'il suffit de quelques rebranchements pour créer des raccourcis d'une partie à l'autre du graphe, qui réduisent considérablement les distances entre les sommets. Néanmoins, si ces raccourcis entraînent des modifications radicales sur la structure globale du graphe, leur faible nombre modifie à peine sa structure locale. Il reste localement dense, conservant un haut coefficient de corrélation.

Ce modèle permet donc de construire des graphes exhibant des propriétés observées dans les réseaux complexes naturels, courte longueur caractéristique et haut coefficient de regroupement, dépassant ainsi le modèle d'Erdős et Rényi. Néanmoins, la distribution de degrés ainsi construite suit, comme les graphes aléatoires, une distribution de Poisson. Ces graphes ne parviennent donc pas à capturer toute la richesse des réseaux naturels.

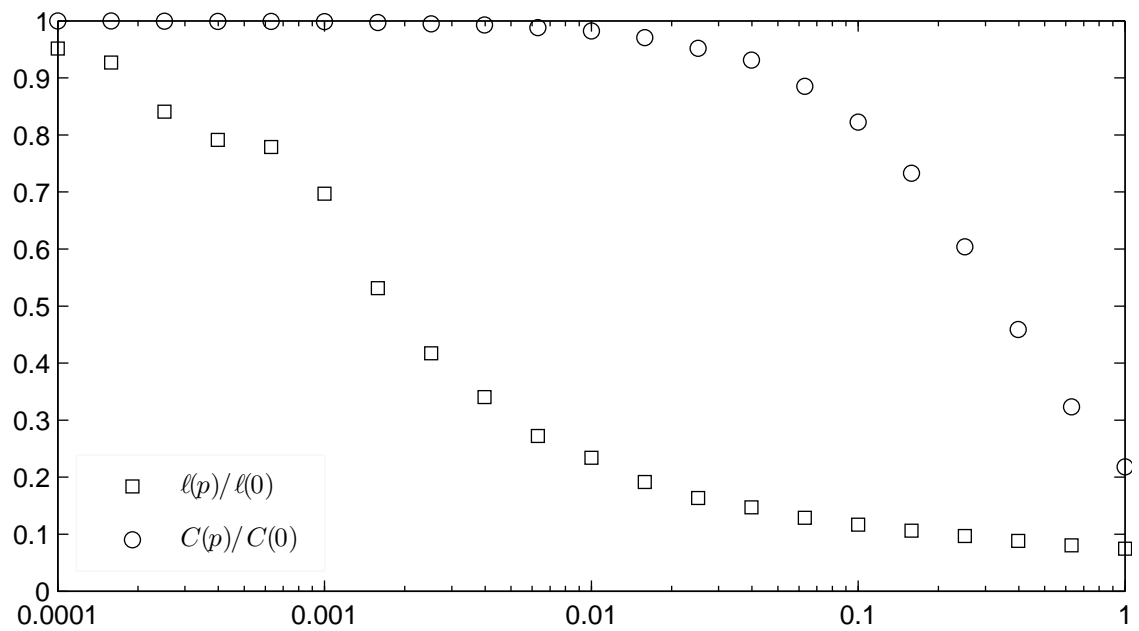


Figure 4.9 – Longueur caractéristique $\ell(p)$ et coefficient de regroupement $C(p)$ en fonction de la probabilité de rebranchement p , normalisés par leur valeur pour $p = 0$. Valeurs moyennes pour 15 graphes avec $N = 500$ et $k = 10$.

3.2 Graphes sans échelle

3.2.1 Le modèle de Barabási et Albert

La distribution de degrés des réseaux naturels en loi de puissance a été remarquée par Barabási & Albert (1999). Les graphes aléatoires comme les graphes petits mondes ont un degré moyen $\langle k \rangle$, caractéristique du graphe, autour duquel se répartissent les degrés des nœuds (voir la figure 4.5 ; la distribution atteint un maximum pour $k = \langle k \rangle$). Au contraire, dans les réseaux naturels, la distribution de degrés en loi de puissance implique qu'il n'y a aucun degré caractéristique du réseau (figure 4.6 ; il n'y a aucun pic dans la distribution). L'absence d'un tel degré caractéristique a conduit Barabási & Albert (1999) à introduire, à l'image de nombreux phénomènes eux aussi dépourvus de grandeur caractéristique, le terme de *réseaux sans échelle* (*scale free networks*).

Pour rendre compte de ce phénomène, Barabási & Albert (1999) ont adopté une perspective pour le moins pertinente : les réseaux naturels, quels qu'ils soient, ne sont pas construits de but en blanc, et les mécanismes qui sous-tendent leur construction ont sans doute des conséquences sur leurs propriétés. Ils ont donc proposé un modèle *constructiviste* de graphes. A la différence du modèle d'Erdős et Rényi et de celui de Watts et Strogatz, dans lesquels on se donne d'emblée un certain nombre de sommets entre lesquels on place des arêtes, dans le modèle de Barabási & Albert (1999) un graphe est construit incrémentalement, en y ajoutant un sommet à chaque pas de temps. Une autre différence de fond entre le modèle des graphes sans échelle et ceux des graphes aléatoires et graphes petits mondes, porte sur la probabilité de relier deux sommets par une arête. Dans les modèles d'Erdős et Rényi et de Watts

et Strogatz, cette probabilité est uniforme, identique pour tous les couples de sommets. Barabási & Albert (1999) proposent au contraire le principe d'*attachement préférentiel*, selon lequel un nouveau nœud entrant dans un réseau a plus de chance de s'associer à des nœuds ayant déjà un grand nombre de voisins : un nouvel acteur a toutes les chances de jouer son premier film avec des acteurs ayant participé à plusieurs autres films, et ayant donc déjà joué avec plusieurs autres acteurs.

Le mécanisme complet de construction est le suivant : initialement, le graphe est constitué de m_0 sommets. Chaque nouveau sommet est inséré dans le graphe en le connectant à $m < m_0$ sommets déjà présents. La probabilité que le sommet s_i , de degré k_i , soit choisi pour être un de ces m sommets est :

$$\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (4.9)$$

Barabási & Albert (1999) ont calculé analytiquement la distribution de degrés des graphes ainsi construits :

$$P(k) = \frac{2m^2}{k^3} \quad (4.10)$$

Cette distribution est bien une loi de puissance, avec $\gamma = 3$.

La longueur caractéristique a aussi été étudiée. Il a été établi que $\ell_{B.A.} \sim \ln(N)/\ln(\ln(N)) < \ell_{aléa}$ (Bollobás & Riordan, 2004). On ne dispose en revanche d'aucune expression analytique du coefficient de regroupement des graphes sans échelle. Albert & Barabási (2002) ont effectué une estimation numérique pour différentes tailles de réseaux vérifiant $\langle k \rangle = 4$. Ils ont évalué que le coefficient de regroupement était alors 5 fois supérieur à celui de graphes aléatoires de même taille et de même degré moyen. Néanmoins ce coefficient décroît avec la taille des graphes ($C \sim N^{0.74}$), tandis qu'il est constant pour les graphes du modèle de Watts et Strogatz.

3.2.2 Élaborations autour du modèle de Barabási et Albert

Le modèle de Barabási et Albert permet de construire des graphes ayant des distributions de degrés en loi de puissance. Les mécanismes de construction incrémentale et d'attachement préférentiel sur lesquels il repose sont des plus séduisants, en tant qu'heuristiques intéressantes pour expliquer la formation de réseaux naturels. Il ne parvient néanmoins pas à rendre compte de la variété des distributions de degrés observées dans les réseaux naturels : comme les nombreux exemples que nous avons donnés l'attestent, ces lois de puissance ont des exposants variés et sont parfois accompagnées de coupure exponentielle. Plusieurs types d'amélioration ont été proposés afin de tenter de reproduire ces phénomènes observés.

Attachement préférentiel

Le modèle de Barabási & Albert (1999) implémente l'idée d'un attachement préférentiel en reliant le sommet nouvellement inséré au sommet i déjà présent dans le graphe, une probabilité $\Pi(k_i)$ proportionnelle au degré k_i du sommet i . L'hypothèse selon laquelle la probabilité $\Pi(k_i)$ dépend linéairement de k_i a pu être testée empiriquement à partir de réseaux en évolution pour lesquels on peut connaître la date à laquelle les nouveaux nœuds sont intégrés.

Newman (2001a), à partir de deux bases de données de collaborations scientifiques, a observé la présence d'attachement préférentiel linéaire pour des valeurs de k inférieures à une valeur critique qui dépend du réseau. Au delà, $\Pi(k)$ semble être constant. Newman note par ailleurs que la valeur critique de k semble être celle où apparaît la coupure exponentielle dans la distribution de degrés.

Pastor-Satorras, Vazquez, & Vespignani (2001) ont étudié l'attachement préférentiel d'Internet, au niveau des ordinateurs, et ont déterminé que $\Pi(k)$ dépend linéairement de k , ce qui conforte ce que nous avons vu à la section 2.3 : la distribution de degrés de ce réseau suit une loi de puissance parfaite.

Jeong, Neda, & Barabasi (2003) ont étudié l'attachement préférentiel dans 4 réseaux : un réseau de collaboration scientifique, un réseau de citations (les nœuds sont des articles, et il y a un lien entre deux articles si l'un cite l'autre), un réseau d'acteurs de cinéma et Internet au niveau des domaines. Ces quatre réseaux ont des distributions de degrés en loi de puissance. Pour Internet et le réseau de citations, les auteurs ont déterminé que $\Pi(k) \propto k$. En revanche, pour les deux autres réseaux, ils concluent que $\Pi(k) \sim k^{-0.8}$. Barabási et al. (2002) ont observé une probabilité identique avec des réseaux de co-citations en mathématiques et en neurosciences.

Krapivsky, Redner, & Leyvraz (2000) ont montré que si l'on a $\Pi(k) \sim k^\alpha$, la distribution de degré suit en loi une puissance uniquement si $\alpha = 1$, c'est-à-dire si $\Pi(k) \sim ak$; l'exposant de la loi de puissance dépend alors de a . Si $\alpha < 1$, $P(k)$ décroît de manière exponentielle. Si $\alpha > 1$, on obtient un réseau en étoile où les sommets n'ont qu'un seul même voisin, connecté à tous les sommets.

Il semble que la linéarité de la probabilité de l'attachement ne soit pas universelle. Dans certains cas, elle paraît suivre elle aussi une loi de puissance, avec un exposant α , $0 < \alpha < 1$. Mais comme l'ont montré Krapivsky et al. (2000), une telle probabilité induit une distribution de degré qui ne suit pas une loi de puissance mais une décroissance exponentielle. On peut noter que l'observation de distribution de degrés en loi de puissance avec une coupure exponentielle peut alors être due à une probabilité d'attachement préférentiel $\Pi(k) \sim k$ pour $k < k_{critique}$ et $\Pi(k) \sim k^\alpha$, $\alpha < 1$ pour $k > k_{critique}$. Néanmoins, Barabási et al. (2002) et Jeong

et al. (2003) ont observé des distributions de degré en loi de puissance sans coupure exponentielle, avec des probabilités $\Pi(k) \sim k^\alpha, \alpha < 1$, semblant contredire les résultats de Krapivsky et al. (2000). La conclusion qui s'impose donc est que la probabilité d'attachement n'est pas le seul facteur influant sur la distribution de degrés.

Modifications internes

Le modèle de Barabási & Albert (1999) ne considère l'évolution des réseaux que par l'ajout de nouveaux nœuds. Or, ce mécanisme est loin d'être le seul observé dans les réseaux naturels. Des extensions ont donc été proposées pour prendre en compte l'ajout, la suppression ou le rebranchement d'arêtes entre les sommets déjà présents dans le graphe.

Albert & Barabasi (2000) ont exploré une version de leur modèle dans laquelle à chaque pas de temps, soit m nouvelles arêtes sont ajoutées avec une probabilité p , soit le rebranchement de m arêtes est effectué avec une probabilité q , soit un nouveau sommet est ajouté et relié à m sommets déjà présents, avec une probabilité $1 - p - q$. Dans les trois cas, le principe de l'attachement préférentiel est appliqué avec $\Pi(k) \propto k$. Ils montrent que, dans ce cas, la distribution de degrés suit une loi de puissance si $q < q_{max}$, avec q_{max} dépendant de p et m . L'exposant de la loi de puissance peut alors varier entre 2 et $+\infty$. Si $q > q_{max}$, la distribution de degré se rapproche d'une distribution exponentielle. Ils ont montré que ce modèle rend compte avec une grande précision de la distribution de degrés du réseau des acteurs, pour lequel l'évolution se fait fréquemment par ajout de liens internes, sans introduction de nouveau nœud (à chaque fois qu'un film réunit des acteurs n'ayant jamais joué ensemble, mais, n'en étant pas à leur première apparition au grand écran).

Contraintes d'évolution

Le modèle de Barabási & Albert (1999) présuppose que le degré d'un sommet peut croître indéfiniment. Manifestement, cette hypothèse ne se vérifie pas dans les réseaux naturels. Dans le réseau des acteurs par exemple, il y a une contrainte d'âge : passé un certain âge, un acteur cesse de jouer, et le nœud lui correspondant dans le réseau ne peut donc plus développer de nouvelles connexions. Ou encore, dans le réseau de transport aérien, on trouve une contrainte de capacité : le nombre de connexions que peut accueillir un aéroport est borné par sa taille. Il en est de même pour les réseaux neuronaux, un neurone ne pouvant établir un nombre illimité de synapses. Amaral et al. (2000) ont étudié l'influence de ces contraintes sur la distribution de degrés, interdisant à tout nœud ayant dépassé un certain âge ou atteint un degré critique de développer de nouvelles connexions. Ils ont observé l'apparition de coupures exponentielles dans les distributions de degrés.

3.3 Modélisation des réseaux naturels

Nous avons vu que les réseaux naturels présentent des caractéristiques récurrentes qui laissent présupposer l'existence d'un paradigme général permettant d'appréhender de manière globale tous ces phénomènes, pourtant d'origines diverses, qui produisent des réseaux. L'incapacité du modèle d'Erdős et Rényi à rendre compte de ces propriétés démontre en effet que tous ces réseaux ne sont pas aléatoires.

Comme le modèle de Barabási & Albert (1999) et ses multiples variantes le suggèrent, la similarité observée entre les réseaux naturels semble provenir de principes sous-jacents communs à tous les processus qui conduisent à la construction de ces

réseaux. Néanmoins, on ne dispose à l'heure actuelle d'aucun modèle permettant de proposer une vision unifiée des réseaux naturels. En particulier, les modèles d'évolution de réseaux ne semblent pas apporter de justification claire à la densité locale et à la distance caractéristique des réseaux naturels. Toutefois, chacune de ces variantes, lorsqu'elle parvient à reproduire la distribution de degrés du réseau qu'elle est censée modéliser, apporte des arguments forts en faveur des principes évolutifs qu'elle implémente.

Pour clore ce chapitre, nous présentons une étude que nous avons réalisée afin de déterminer les propriétés du réseau fonctionnel cérébral.

4 Réseau fonctionnel cérébral

4.1 Réseaux anatomiques et réseaux fonctionnels

Nous avons examiné, à la section 2.4.3, des réseaux neuronaux : le réseau des neurones de *C. elegans*, et des réseaux d'aires cérébrales du chat et du macaque. Ces réseaux sont construits sur des considérations anatomiques : les liens entre les nœuds sont soit des connexions synaptiques pour *C. elegans*, soit des connexions inter-aréales pour le chat et le macaque. Ils représentent, à différentes échelles, la structure des systèmes nerveux de ces organismes. De ce fait, ces réseaux en sont des représentations *statiques*. Or, cette perspective statique, basée sur la connectivité anatomique, ne saurait rendre compte à elle-seule de la richesse du fonctionnement cérébral. Tant au niveau des neurones, dont l'activation dépend de l'information qui leur est transmise par leur semblables, qu'au niveau des aires cérébrales, qui fonctionnent de concert, cette richesse se dévoile dès lors que l'on considère les aspects *dynamiques* de l'activité neuronale ou cérébrale. A toute échelle, les corrélations temporelles d'activation définissent une connectivité fonctionnelle. Bien que la connectivité anatomique contraigne cette connectivité fonctionnelle, et qu'en retour cette dernière puisse façonner la première (par renforcement des poids synaptiques, ou, sur une plus grande échelle temporelle, par l'établissement de nouvelles connexions entre divers sous-systèmes sous l'effet d'une pression évolutive), ces deux connectivités ne sont pas nécessairement identiques : les activités de deux

neurones ou de deux aires peuvent être corrélées en l'absence de lien anatomique direct, par la réception d'informations d'une source commune (Sporns, 2003).

Du fait de la dimension dynamique qu'elle apporte par rapport à la connectivité anatomique, la connectivité fonctionnelle permet de concevoir un réseau cérébral bien plus représentatif du fonctionnement cérébral que les réseaux anatomiques. C'est l'étude des propriétés de ce réseau fonctionnel cérébral que nous nous proposons d'exposer ici.

4.2 Réseaux de voxels

Les réseaux fonctionnels cérébraux sont encore peu étudiés. A notre connaissance, seuls Eguíluz, Chialvo, Cecchi, Baliki, & Apkarian (2005) ont jusqu'à présent proposé une étude quantitative des propriétés de ces réseaux. La raison en est sans doute, qu'à la différence des réseaux anatomiques, il n'existe pas de données directement accessibles sur ces réseaux. Eguíluz et al. (2005) (tout comme nous, mais d'une manière différente, voir section 4.3), ont utilisé des données provenant d'imagerie cérébrale pour inférer ces réseaux.

Les techniques d'imagerie cérébrale telles que la tomographie par émission de positons (TEP) ou l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) procèdent par l'observation des variations locales de débit sanguin pour mesurer l'activité cérébrale. En effet, les neurones voient leur consommation d'énergie augmenter après avoir été excités. Cette énergie leur étant apportée par le sang, il y a, dans les aires cérébrales activées, une augmentation concomitante du débit sanguin. Ces variations de débit sanguin sont mesurées dans des petits cubes, les voxels, dont la taille, variant entre le mm^3 et le cm^3 , est plus dictée par des contraintes techniques

que des considérations anatomiques ou physiologiques.

Pour construire leurs réseaux fonctionnels, Eguíluz et al. (2005) ont utilisé des données d'IRMf acquises en faisant réaliser des tâches par des sujets : 1 sujet qui oppose le pouce et l'index 10 s, puis relâche pendant 10 s ; 7 sujets qui tapotent du doigt, avec 3 différents protocoles pour marquer le début et la fin des périodes de tapotement (instructions verbales, point vert ou rouge sur un écran ou bien écran vert ou rouge) ; un nombre indéterminé de sujets qui écoutent de la musique. Les sommets des réseaux étaient les voxels, et un lien était établi entre deux voxels, si la corrélation temporelle des activités qui y étaient enregistrées, dépassait un seuil fixé r_c . Ils obtenaient ainsi un réseau de voxels par sujet et par tâche.

Bien que l'article de Eguíluz et al. (2005) soit globalement confus et peu rigoureux, il ressort que les réseaux ainsi construits sont des petits mondes : leur coefficient de regroupement est supérieur de plusieurs ordres de grandeur à celui de graphes aléatoires de dimensions comparables, tandis que leur distance caractéristique est équivalente (du moins pour les grandes valeurs de r_c). Eguíluz et al. (2005) prétendent que les réseaux qu'ils ont construits ont des distributions de degrés suivant des lois de puissance, mais la faiblesse de leur argumentation sur ce point est telle qu'il paraît délicat de tenir ce résultat pour acquis.

Indépendamment du manque de rigueur de leur étude, les réseaux construits par Eguíluz et al. (2005) souffrent d'au moins deux limitations qui réduisent la portée de leur intérêt. En premier lieu, l'étude de réseaux de voxels soulève quelques interrogations. On l'a vu, les voxels sont des volumes dont la raison d'être à trait à des contraintes d'ordre technologique, qui font que ces voxels n'ont aucune réalité anatomique, ni fonctionnelle. L'art de l'analyse de données d'imagerie cérébrale consiste au contraire à dépasser l'échelle du voxel pour identifier les aires anatomo-

fonctionnelles où a effectivement lieu l'activité observée. En second lieu, la technique employée par Eguíluz et al. (2005) pour construire leurs réseaux conduit à des réseaux spécifiques à une seule tâche (et qui plus est, dépendants du sujet), ne dévoilant de fait qu'une partie du réseau fonctionnel global.

Le réseau que nous allons étudier à présent dépasse ces deux limitations : c'est un réseau d'aires anatomo-fonctionnelles, non pas spécifique à une tâche, mais représentant le fonctionnement global du cerveau.

4.3 Construction du réseau

L'immense majorité des expériences d'imagerie cérébrale sont calquées sur le même schéma, que l'on peut grossièrement décrire ainsi : on cherche à déterminer quelles sont les zones cérébrales impliquées dans telle ou telle tâche. Pour ce faire, on sélectionne un groupe de sujets auxquels on fait effectuer la tâche en question, ainsi qu'une tâche dite de contrôle, supposée impliquer les mêmes processus cognitifs que la première, sauf sur le point précis qui est l'objet de l'étude (par exemple, la tâche contrôle implique les mêmes activités sensorimotrices que la tâche étudiée, mais un traitement cognitif des stimuli différent). On enregistre l'activité des cerveaux des sujets durant la réalisation de ces deux tâches, et l'on compare ensuite ces enregistrements : les zones qui sont plus activées dans la tâche étudiée que dans la tâche contrôle sont celles spécifiquement engagées dans cette tâche. Ce que les dizaines de milliers d'études de ce type nous ont appris, c'est que lors de la réalisation d'une tâche un tant soit peu complexe, ce n'est pas une, mais une ensemble d'aires anatomo-fonctionnelles que l'on voit fonctionner de concert (Friston, 1994).

Le réseau fonctionnel cérébral que nous avons cherché à construire et à étudier

est le réseau dont les nœuds sont ces aires anatomo-fonctionnelles, reliées entre elles si elles participent conjointement à la réalisation d'une tâche. Il n'existe malheureusement aucune base de données regroupant ce type d'informations. Pour y accéder, nous avons donc réuni tous les résumés des articles publiés entre août 1992 et juin 2004 dans la revue *Neuroimage*, spécialisée en imagerie cérébrale. Nous avons alors fait la supposition suivante : les auteurs rapportent dans le résumé de leur article les aires cérébrales qu'ils ont vues activées dans leur étude. Nous avons donc construit un réseau dont les nœuds sont les aires cérébrales, reliées ensemble si elle sont mentionnées dans le même résumé.

Le problème majeur d'une telle approche est l'absence de normalisation dans la communauté neuroscientifique et la synonymie qui en découle : une aire anatomo-fonctionnelle peut avoir plusieurs noms. Afin de pas construire un réseau dans lequel les aires pouvaient apparaître plusieurs fois sous des noms différents, nous avons utilisé la base de données *NeuroNames* (D. M. Bowden & Martin, 1995 ; D. Bowden & Dubach, 2003). *NeuroNames* est une entreprise pour standardiser la terminologie neuro-anatomique. Elle propose un découpage hiérarchique du cerveau de l'Homme et du primate non humain en 855 structures ¹, dont 129 sont des super-structures, c'est-à-dire divisées en sous-structures. 18 de ces structures sont indiquées comme étant propres au macaque, et ont été retirées de la base qui comportait donc au final 837 structures. Pour chacune des ces structures, *NeuroNames* propose, et c'est là tout son intérêt, une liste des synonymes rencontrés dans la littérature. Pour les 837 structures que nous avons utilisées, la base fournissait 3501 synonymes, soit 4.18 termes par structure. Nous avons pu ainsi identifier dans les résumés de manière

¹Nous donnons ici les chiffres de la version avec laquelle nous avons travaillé, légèrement différente de celle décrite dans D. Bowden & Dubach (2003).

unique chaque aire, quel que soit le nom sous lequel elle apparaissait.

Sur les 1891 résumés originaux, nous n'avons conservé que les 576 mentionnant au moins deux aires. Chacun d'entre eux mentionnait en moyenne 3.21 aires. Au total, 161 aires étaient citées dans ces résumés. Chaque aire était mentionnée en moyenne dans 13.94 résumés.

4.4 Propriétés du réseau fonctionnel cérébral

Le réseau que nous avons construit était donc constitué de 150 nœuds et 1214 liens. Pour la suite des analyses de ce réseau, nous n'avons considéré que la plus grande partie connexe du réseau, constitué de 148 nœuds et 1213 liens.

4.4.1 Coefficient de regroupement et longueur caractéristique

Nous avons mesuré le coefficient de regroupement et la longueur caractéristique de ce réseau. Nous avons trouvé $C_{NeuroImage} = 0.62$ et $\ell_{NeuroImage} = 2.23$. Un graphe aléatoire de même taille et de même densité aurait $C_{aléa} = 0.122$ et $\ell_{aléa} = 1.4210$. Le réseau que nous avons obtenu est donc un petit monde.

4.4.2 Distribution de degrés

Nous avons aussi étudié la distribution de degrés de ce réseau. Le degré maximum est $k_{max} = 79$ et le degré moyen $\langle k \rangle = 16.39$. La figure 4.10 représente la distribution de degrés sur une échelle logarithmique. Si elle suit une loi de puissance d'exposant γ , elle doit apparaître comme une droite de pente γ sur un tel graphique. C'est sur la base d'une telle observation, que Eguíluz et al. (2005) ont conclu que

les distributions de degrés de leurs réseaux suivaient des lois de puissance. Une telle représentation est pourtant peu fiable pour tirer la moindre conclusion (Newman, à paraître). Ceci est en partie causé par le bruit que l'on observe pour les valeurs élevée de k , bruit qui est dû à un faible échantillonnage pour ces valeurs. Dans notre cas, il n'est pas évident d'évaluer dans quelle mesure il est possible d'ajuster nos données avec une droite.

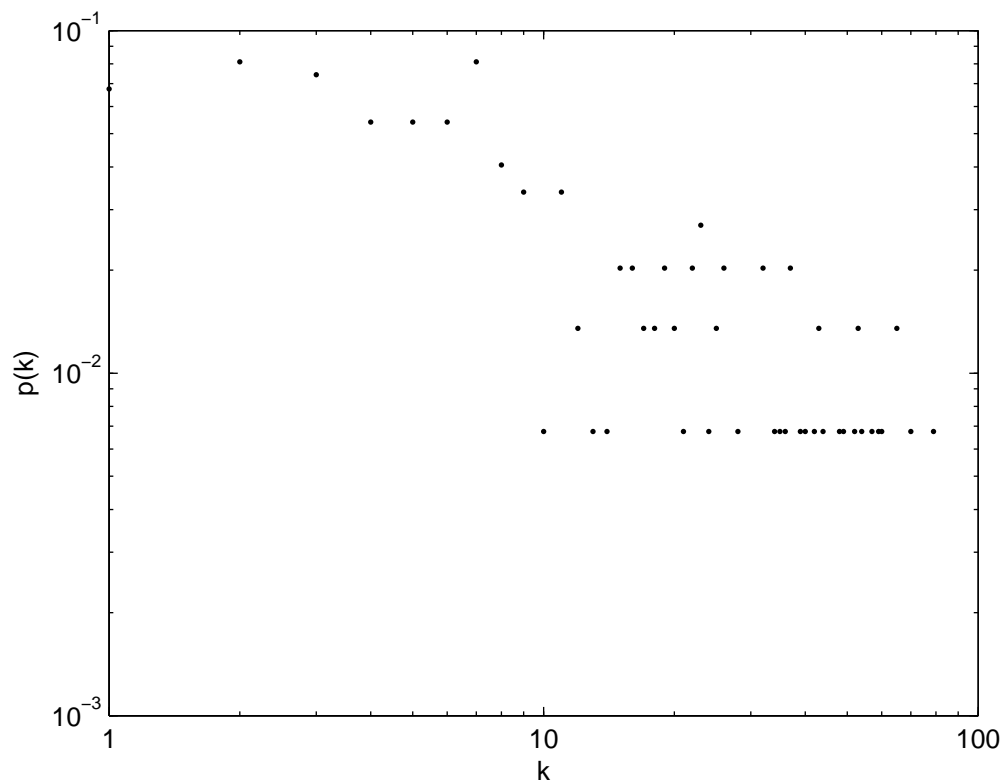


Figure 4.10 – Distribution de degrés du réseau fonctionnel cérébral avec une échelle logarithmique. Si cette distribution suit une loi de puissance, elle doit apparaître comme une droite avec une telle échelle.

Une méthode nettement plus fiable pour décider, ou non, de la présence d'une loi de puissance est d'observer non pas directement la distribution de degrés, mais

la distribution cumulative, c'est-à-dire $p(x \geq k)$ (Newman, à paraître). Cette distribution est représentée sur la figure 4.11. Si la distribution de degrés était une loi de puissance de degré γ , alors la distribution cumulative serait aussi une loi de puissance, de degré $\alpha = \gamma - 1$. Elle devrait donc apparaître aussi comme une droite sur une échelle logarithmique. Ce n'est manifestement pas le cas, la distribution de degrés de notre réseau ne suit pas une loi de puissance.

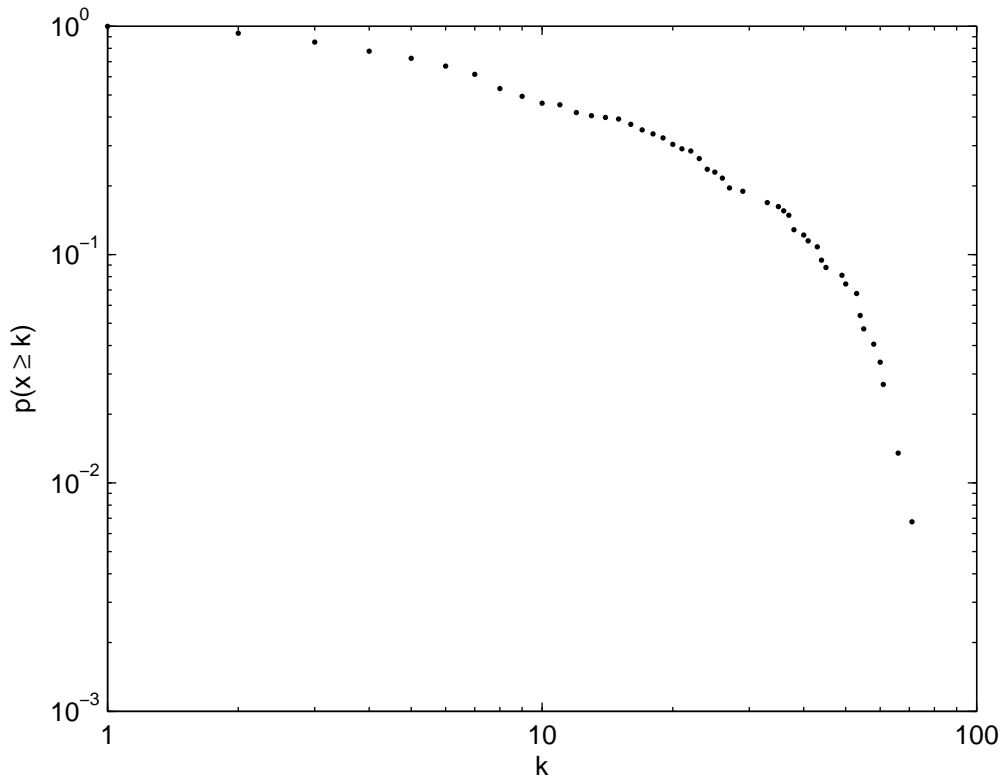


Figure 4.11 – Distribution cumulative des degrés du réseau fonctionnel cérébral avec une échelle logarithmique. Si la distribution des degrés est une loi de puissance d'exposant γ , la distribution cumulative est aussi une loi de puissance, d'exposant $\alpha = \gamma - 1$.

La nature de la distribution de degrés apparaît plus clairement lorsqu'on la trace sur un graphique semi-logarithmique (figure 4.12). Elle présente deux régimes, ca-

ractérisés par des droites. Une distribution apparaissant comme une droite sur un graphique semi-logarithmique est une distribution exponentielle (eq. 4.8)¹. Les deux régimes sont $p(k) \sim e^{-0.05k}$ pour $k < 54$ et $p(k) \sim e^{-0.12k}$ pour $k \geq 54$.

Il est remarquable de noter que Amaral et al. (2000) ont justement déterminé que le réseau neuronal de *C. elegans* a des distributions de degrés entrants et sortants qui suivent des lois exponentielles.

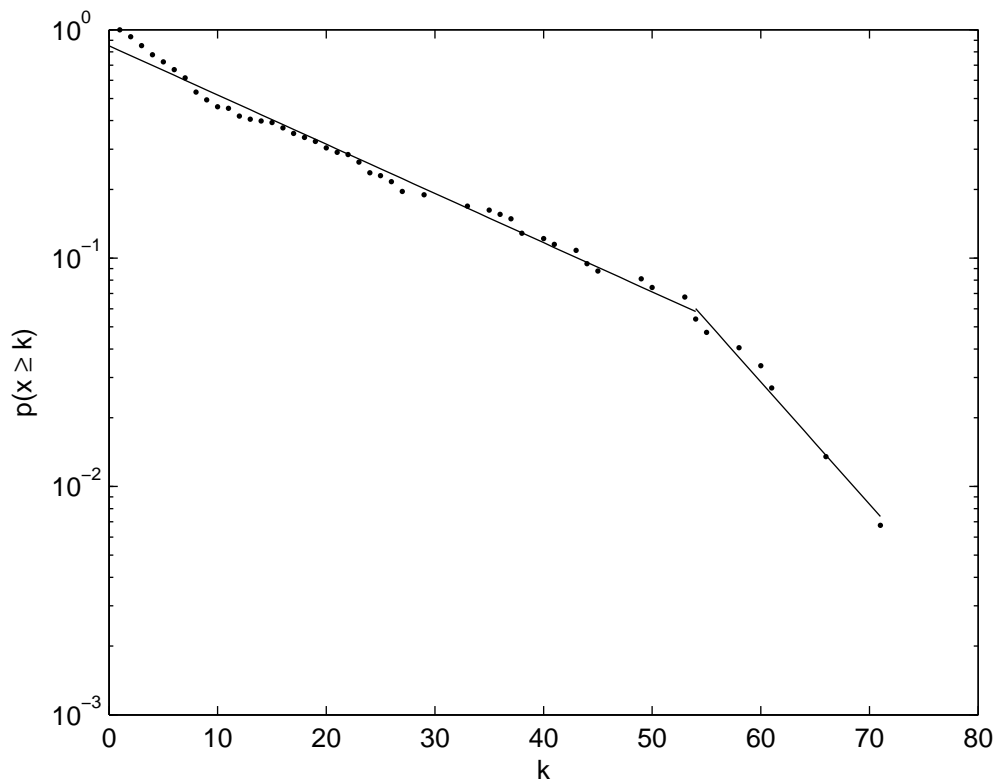


Figure 4.12 – Ajustement de la distribution des degrés du réseau fonctionnel cérébral avec avec une distribution exponentielle. Les points représentent la distribution cumulative des degrés. Les deux lignes continues représentent les deux régimes, $\beta = 0.05k$ et $\beta = 0.12$.

¹Si $p(k)$ est une distribution exponentielle d'exposant γ , alors la distribution cumulative $p(x \geq k)$ est aussi une distribution exponentielle, de même exposant. Elle apparaît donc aussi comme une droite sur un graphique semi-logarithmique.

4.5 Origines des propriétés du réseau extrait de *NeuroImage*

Nous prétendons que le réseau que nous avons construit à partir des résumés de *NeuroImage* est le réseau fonctionnel cérébral, et que l'on peut donc attribuer à ce dernier les propriétés que nous avons mesurées. De telles affirmations sont-elles légitimes ? Se pourrait-il, au contraire, que les cooccurrences de noms d'aires cérébrales dans un résumé soient de mauvais indices de relation fonctionnelle, et que les propriétés de notre réseau soit un artefact de construction ?

Ces questions revêtent une importance d'autant plus grande que le réseau que nous étudions ici est la version monopartite d'un graphe bipartite, et que l'on sait que de telles projections peuvent, sous certaines conditions, être des graphes petits mondes et / ou sans échelle (Guillaume & Latapy, 2004 ; Newman, Watts, & Strogatz, 2002). Cette section a donc pour objectif de justifier notre affirmation que les propriétés du réseau que nous avons construit sont bien celles du réseau fonctionnel cérébral que nous prétendons étudier. Nous allons dans un premier temps définir les graphes bipartites et expliquer comment, sous certaines conditions, ils permettent de fabriquer des graphes petits mondes et / ou sans échelle. Nous pourrons alors jeter un nouveau regard sur les propriétés de notre réseau, qui nous permettra de trancher entre une origine artefactuelle de ces propriétés et une origine dans l'architecture fonctionnelle cérébrale.

4.5.1 Graphes bipartites

Nous avons construit notre graphe en assignant un sommet à chaque aire anatomofonctionnelle rencontrée dans les résumés des articles que nous avons traités, et en créant une arête entre deux sommets si l'on trouve une cooccurrence des noms de ces aires dans au moins un des résumés.

Dans ce processus, il y a implicitement un second graphe que nous n'avons pas évoqué jusqu'à présent. Ce second graphe est constitué de deux types de sommets : les uns sont les même que ceux du premier graphe, les autres représentent les résumés. Dans ce graphe, une arête n'est possible qu'entre un sommet représentant une aire et un sommet représentant un résumé, et indique alors que l'aire est nommée dans le résumé (figure 4.13).

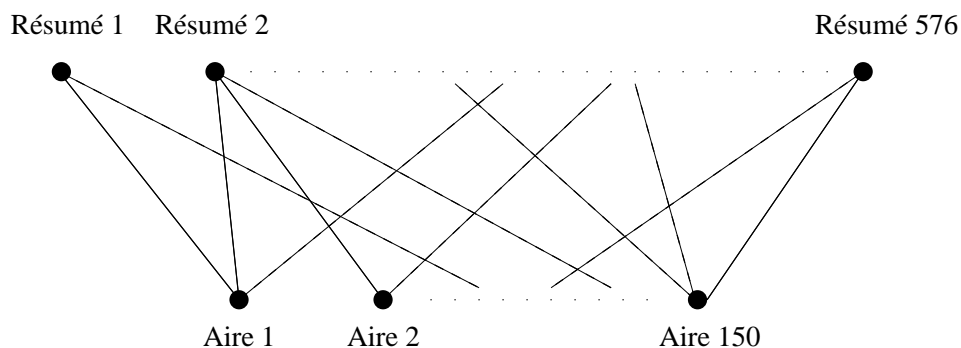


Figure 4.13 – Structure bipartite sous-jacente du réseaux fonctionnel cérébral construit.

Voici la définition formelle d'un graphe bipartite :

Définition 4.10 (Graphe bipartite) Un graphe bipartite G est un triplet (\top, \perp, E) , où \top et \perp sont deux ensembles de sommets disjoints, et $E \in \top \times \perp$ l'ensemble des arêtes.

Deux distributions de degrés sont associées à un graphe bipartite :

- la distribution des degrés des sommets de \top , que l'on notera $P_{\top}(k)$
- la distribution des degrés des sommets de \perp , que l'on notera $P_{\perp}(k)$

A partir d'un graphe bipartite, il est possible de former deux graphes non orientés, appelés projections monopartites.

Définition 4.11 (Projection monopartite) *Un graphe bipartite G a deux projections monopartites :*

- *La projection haute : $G^{\top} = (\top, E^{\top})$, où $s_i, s_j \in E^{\top}$ si et seulement si il existe un sommet de \perp auquel sont reliés s_i et s_j dans G .*
- *La projection basse : $G^{\perp} = (\perp, E^{\perp})$, où $s_i, s_j \in E^{\perp}$ si et seulement si il existe un sommet de \top auquel sont reliés s_i et s_j dans G .*

La figure 4.14 présente un graphe bipartite et ses deux projections monopartites.

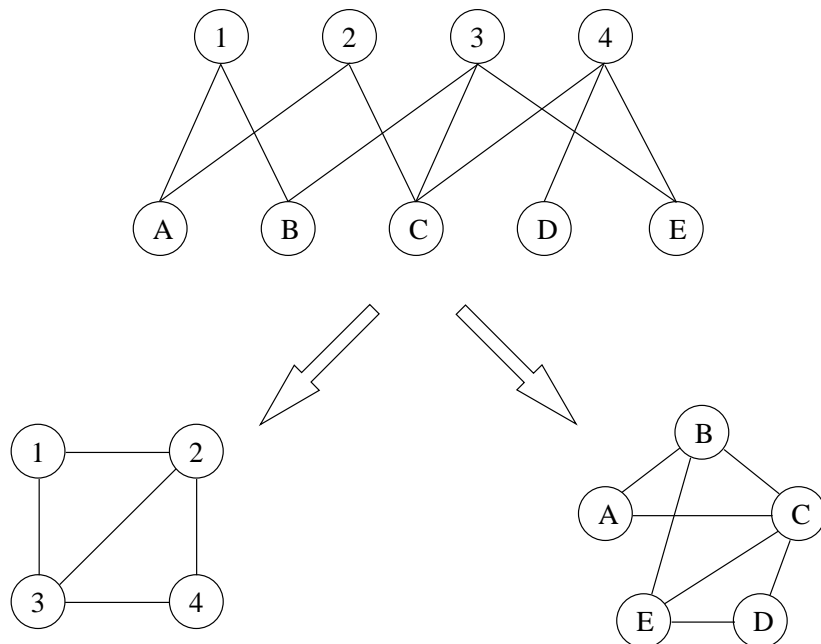


Figure 4.14 – Un graphe bipartite G (en haut) et ses deux projections monopartites : G^{\top} (en bas à gauche) et G^{\perp} (en bas à droite).

Guillaume & Latapy (2004) ont démontré trois théorèmes importants pour nous sur les projections monopartites¹ de graphes bipartites (leurs résultats convergent avec ceux de Newman et al. (2002) proposés indépendamment). Ces trois théorèmes concernent respectivement la distribution de degrés, la longueur caractéristique et le coefficient de regroupement des projections monopartites.

Le premier théorème affirme que si la distribution de degrés $P_{\perp}(k)$ suit une loi de puissance, alors la distribution de degrés de la projection monopartite suit aussi une loi de puissance, de même exposant.

Le second théorème affirme que si la distribution de degrés $P_{\perp}(k)$ suit une loi de puissance, alors la longueur caractéristique de la projection monopartite est de l'ordre de $\ln(|\perp|)$, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que celle d'un graphe aléatoire de même densité (cf. équation 4.5).

Enfin, le dernier théorème affirme que si $P_{\perp}(2)$ est indépendant de $|\perp|$ et que $P_{\top}(2)$ ne tend pas vers 1 quand la taille du réseau augmente, alors le coefficient de regroupement de la projection monopartite est constant. Pour des graphes de taille suffisamment grande, il est donc très supérieur à celui d'un graphe aléatoire de même taille (cf. équation 4.4).

Le réseau que nous avons construit est la projection monopartite (basse) d'un graphe bipartite où \top est l'ensemble des résumés et \perp est l'ensemble des aires² (figure 4.13). Étant donné que la distribution de degrés de notre réseau ne suit pas une loi de puissance, en vertu du premier théorème de Guillaume & Latapy

¹Par symétrie, tout ce que l'on peut dire sur les projections monopartites basses est valable pour les projections monopartites hautes et *vice-versa*. Dans la suite nous ne considérerons plus que les projections basses des graphes bipartites.

²C'est le cas de nombreux réseaux, comme le réseau des collaborations cinématographiques, où \top est l'ensemble des films et \perp est l'ensemble des acteurs, le réseau des collaborations scientifiques, où \top est l'ensemble des articles et \perp est l'ensemble des scientifiques, ... Guillaume & Latapy (2004) argumentent en fait que tout réseau complexe a une structure bipartite sous-jacente.

(2004), nous pouvons affirmer que la distribution des degrés bas $P_{\perp}(k)$ du graphe monopartite non plus ne suit pas une loi de puissance. Ceci est confirmé par la figure 4.15 qui représente cette distribution. Cette distribution suit en revanche une distribution exponentielle : $P_{\perp}(k) \sim e^{-0.03k}$ (figure 4.16). La distribution des degrés hauts est elle aussi exponentielle $P_{\top}(k) \sim e^{-0.65k}$ (figure 4.17)

Nous ne sommes donc pas dans un cas d'application des deux premiers théorèmes. En revanche, étant donné que $P_{\perp}(2) \sim e^{-0.03 \cdot 2}$ est indépendant de $|\perp|$ et

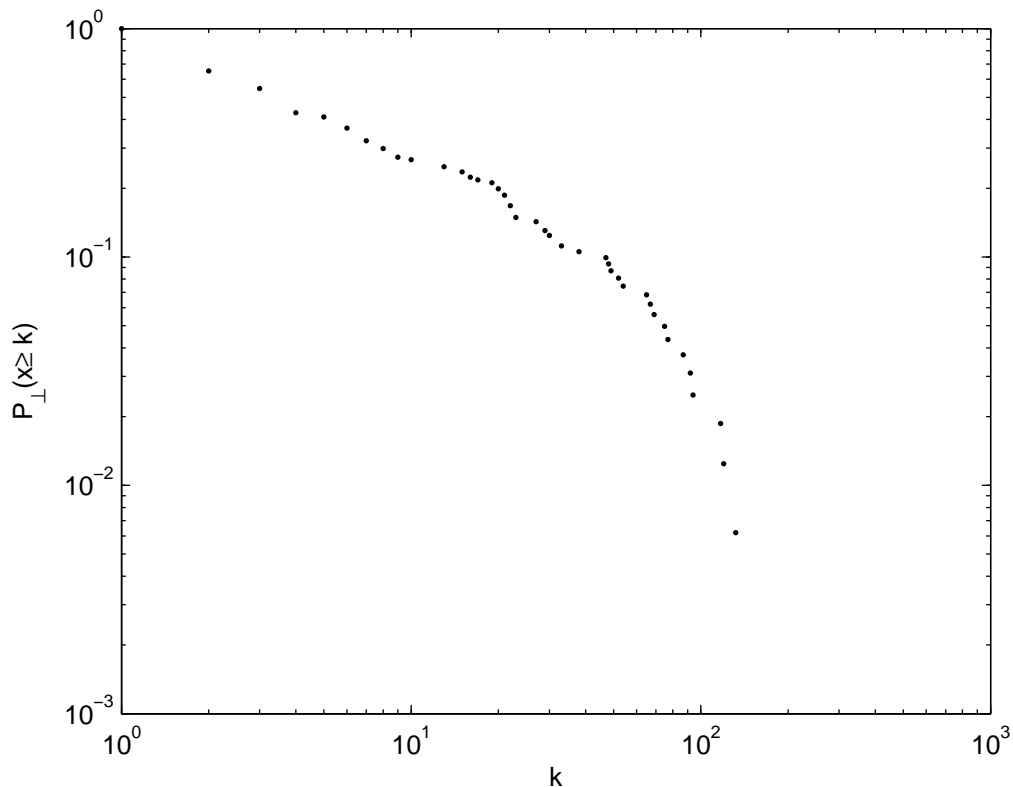


Figure 4.15 – Distribution cumulative des degrés bas du graphe monopartite sous-jacent avec des échelles logarithmiques. Si cette distribution suivait une loi de puissance, elle apparaîtrait comme une droite.

que $P_T(2) \sim e^{-0.65 \cdot 2}$ est constant, le troisième théorème s'applique.

Mais indépendamment du fait que ces théorèmes s'appliquent formellement ou non, ce qu'ils nous apprennent, c'est que les propriétés d'un réseau ayant une structure bipartite sous-jacente peuvent découler des propriétés de cette structure. Le réseau que nous étudions ici est, du fait de l'approche employée pour le construire, non pas le réel réseau fonctionnel cérébral, mais une approximation (un nouvel article,

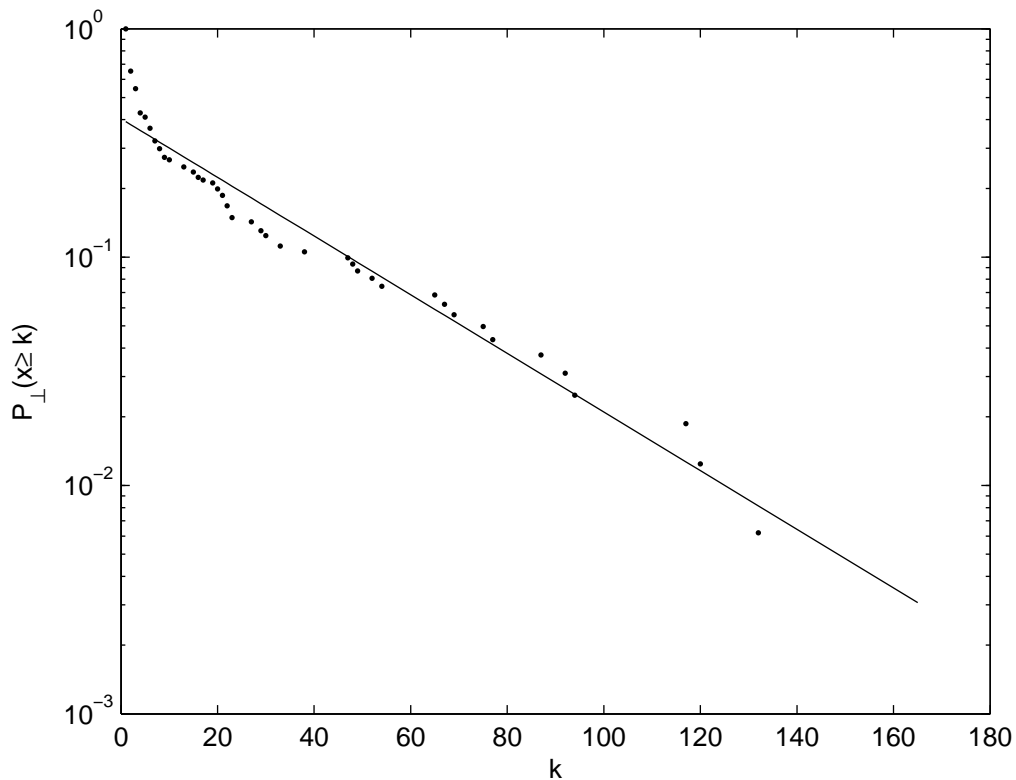


Figure 4.16 – Ajustement de la distribution cumulative des degrés bas du graphe monopartite sous-jacent. Cette distribution suit une droite de pente -0.03 sur une échelle semi-logarithmique, c'est donc une distribution exponentielle avec $\beta = 0.03$.

mettant en lumière des co-activations non encore observées, conduirait à construire un réseau légèrement différent, qui serait une meilleure approximation). Notre approximation est-elle une bonne approximation ? Les propriétés que nous avons détaillées aux sections précédentes approximent-elles le réseau fonctionnel cérébral réel, ou bien sont-elles les conséquences du graphe bipartite par lequel nous avons dû passer pour construire notre réseau ?

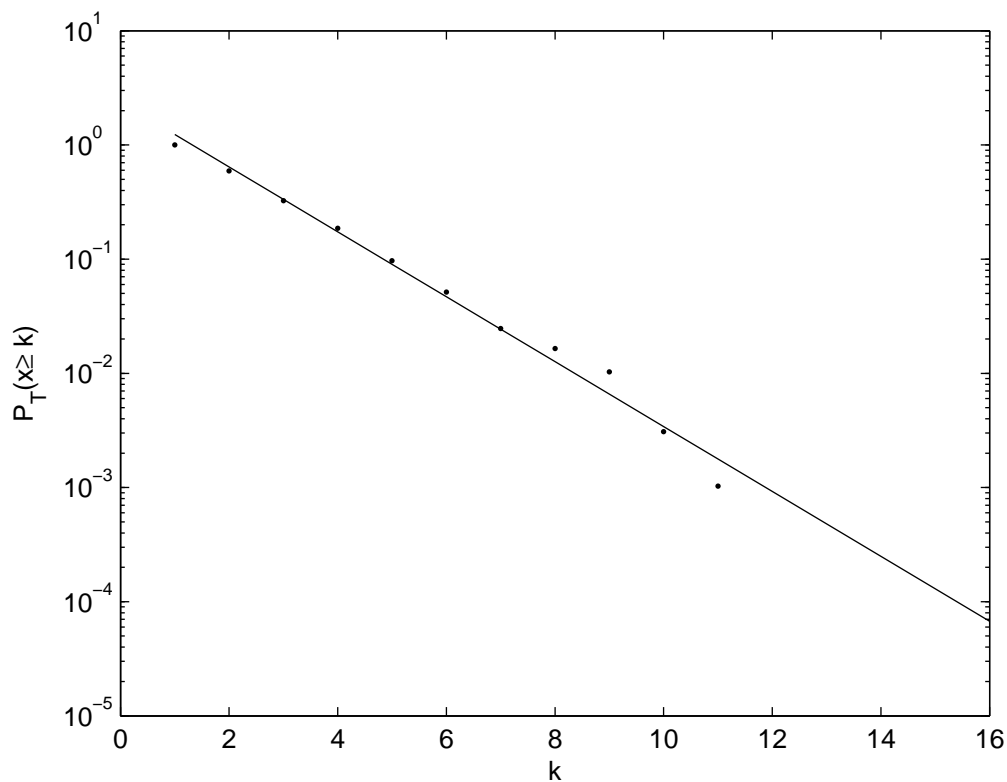


Figure 4.17 – Ajustement de la distribution cumulative des degrés hauts du graphe monopartite sous-jacent. Cette distribution suit une droite de pente -0.65 sur une échelle semi-logarithmique, c'est donc une distribution exponentielle avec $\beta = 0.65$.

4.5.2 Simulations numériques des propriétés des projections monopartites de graphes bipartites

Afin d'évaluer l'influence du graphe bipartite qui sous-tend notre réseau, nous souhaiterions connaître précisément les propriétés des projections monopartites de graphes bipartites tels que celui-ci. Pour cela, les théorèmes de (Guillaume & Laptay, 2004) ne vont pas nous être d'un grand secours : nous avons vu que, pour ce qui était de la distribution de degrés et de la longueur caractéristique, ils ne pouvaient s'appliquer dans notre cas. En ce qui concerne le coefficient de regroupement, leur théorème prédit seulement que, notre réseau doit avoir un coefficient de regroupement très supérieur à celui d'un graphe aléatoire comparable.

Pour obtenir des informations plus précises, nous avons créé 100 graphes bipartites aléatoires, ayant le même nombre de sommets que le graphe bipartite de notre réseau, et les mêmes distributions de degrés $P_{\top}(k)$ et $P_{\perp}(k)$ que celui-ci. Nous avons ensuite construit les projections monopartites basses de ces graphes et en avons mesuré la distribution de degrés, la longueur caractéristique et le coefficient de regroupement. S'il s'avère que les propriétés de notre réseau sont comparables à celles des graphes aléatoires ainsi construits, alors force sera de conclure que ses propriétés ont comme origine sa structure bipartite sous-jacente. Si elles sont différentes, alors elles ne seront pas dues, du moins en grande partie, à cette structure.

Longueur caractéristique et coefficient de regroupement

Les longueurs caractéristiques des 100 graphes aléatoires se distribuent selon une loi normale de moyenne $\mu_{\ell} = 2.14$ et de déviation standard $\sigma_{\ell} = 0.03$. La probabilité que la longueur caractéristique $\ell_{NeuroImage} = 2.23$ provienne de cette

distribution est 0.06 (figure 4.18).

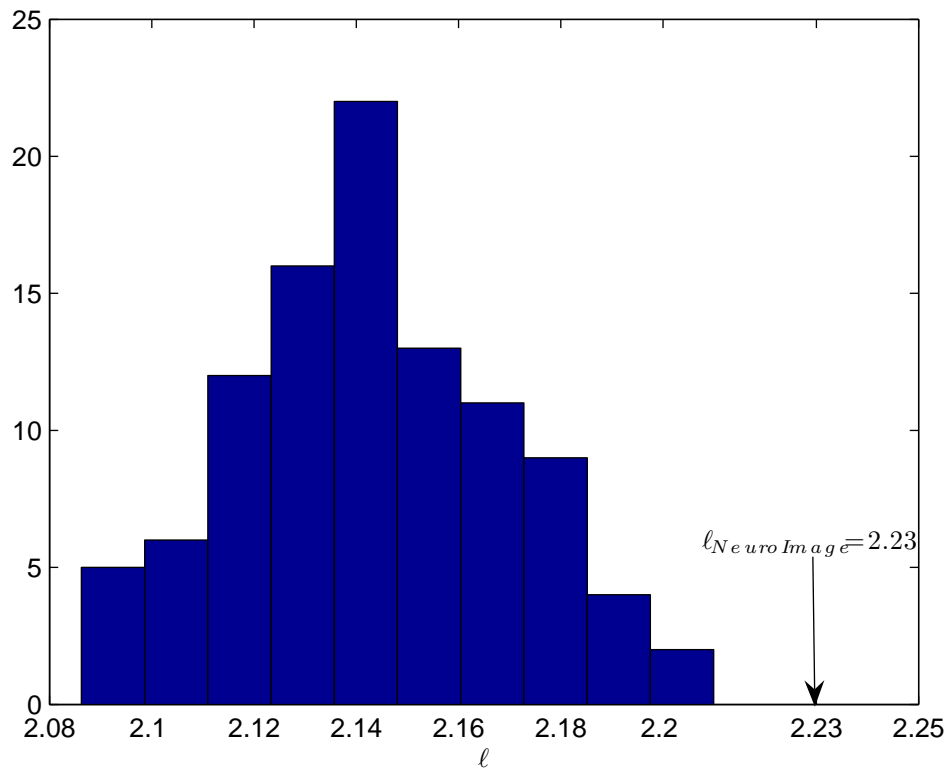


Figure 4.18 – Histogramme des longueurs caractéristiques des 100 graphes aléatoires. La probabilité d’un graphe aléatoire d’avoir comme longueur caractéristique $\ell_{NeuroImage} = 2.23$ est 0.06.

Les coefficients de regroupement des 100 graphes aléatoires se distribuent selon une loi normale de moyenne $\mu - C = 0.5$ et de déviation standard $\sigma_C = 0.01$. la probabilité que la longueur caractéristique $C_{NeuroImage} = 0.62$ provienne de cette distribution est de l’ordre de 10^{-17} (figure 4.19).

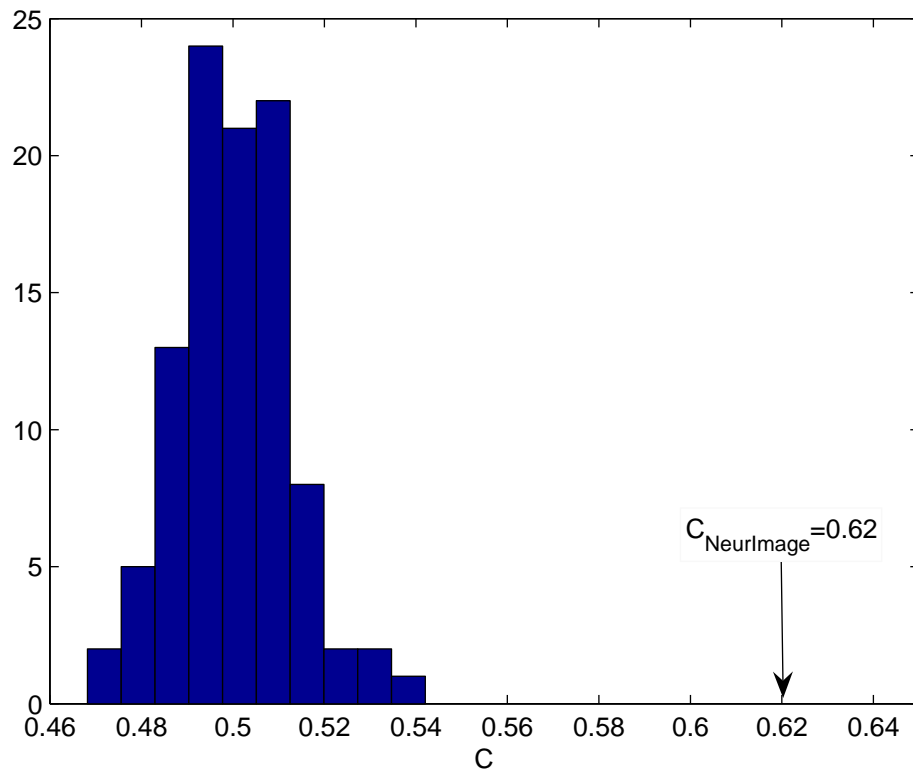


Figure 4.19 – Histogramme des coefficients de regroupement des 100 graphes aléatoires. La probabilité d'un graphe aléatoire d'avoir comme coefficient de regroupement $C_{NeuroImage} = 0.62$ est de l'ordre 10^{-17} .

Distributions de degrés

La figure 4.20 montre la distribution cumulative moyenne des degrés (ainsi les variations autour de cette moyenne) des 100 graphes aléatoires et la distribution cumulative des degrés de notre réseau. À l'image de cette dernière, les distributions de degrés des graphes aléatoires semblent suivre une distribution exponentielle avec deux régimes distincts. Néanmoins, alors que pour les petits degrés la distribution de notre réseau semble coïncider avec celle des graphes aléatoires, pour les degrés les plus grands elle s'en éloigne en décroissant nettement plus rapidement.

Conclusion sur l'origine des propriétés de notre réseau fonctionnel cérébral

Les simulations numériques que nous avons effectuées nous permettent d'affirmer que les projections monopartites de graphes bipartites aléatoires ayant les mêmes distributions de degrés que le graphe bipartite qui sous-tend notre réseau fonctionnel cérébral, sont des petits mondes. En effet, ils ont une petite longueur caractéristique, en moyenne de 2.14, et un haut coefficient de regroupement, en moyenne de 0.5. Par ailleurs, leur distribution de degrés semble suivre un loi exponentielle.

Dit autrement, si l'on reprenait tous les résumés de *NeuroImage* que nous avons utilisés, si dans chacun d'entre eux on remplaçait chaque occurrence d'aire cérébrale par le nom d'une autre, choisie aléatoirement tout en respectant le nombre de résumés dans lesquels chaque aire est citée, et si l'on construisait un réseau d'aires cérébrales sur la base de leurs cooccurrences dans les résumés, celui-ci serait, comme le nôtre dont nous affirmons qu'il représente le réseau fonctionnel cérébral, un petit monde avec une distribution exponentielle de ses degrés.

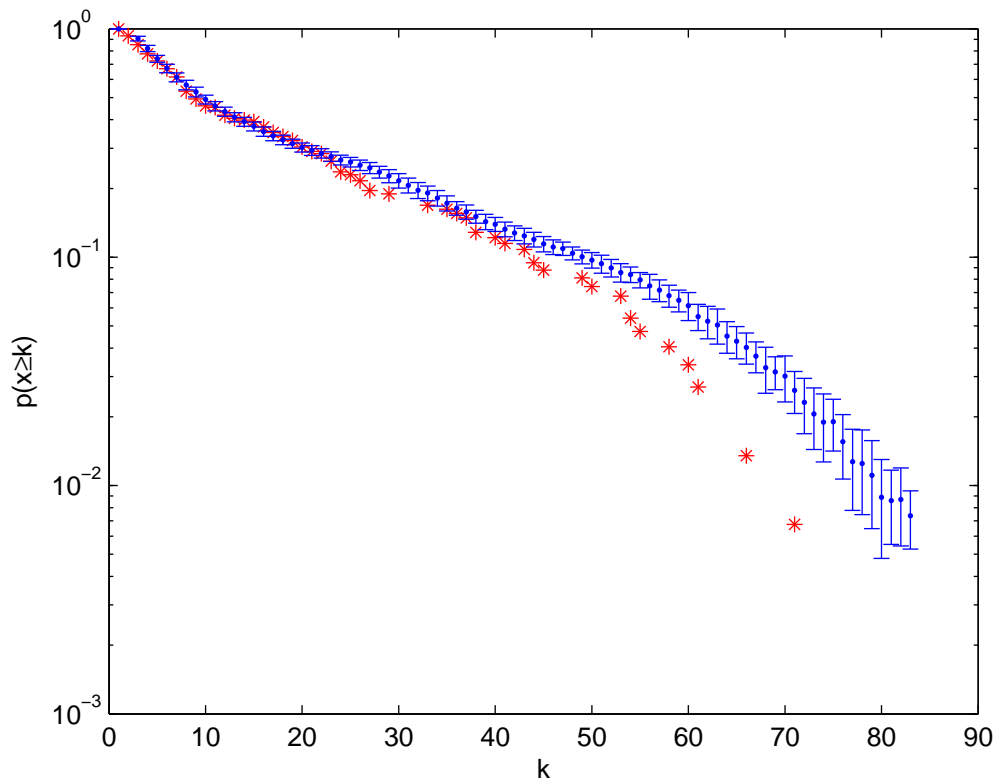


Figure 4.20 – En bleu : distribution cumulative moyenne des degrés de 100 projections monopartites de graphes bipartites aléatoires ayant les mêmes distributions de degrés $P_{\top}(k)$ et $P_{\perp}(k)$ que notre réseau. En rouge : distribution cumulative des degrés de notre réseau. Alors que les deux distributions coïncident pour les petites valeurs de k , la distribution de notre réseau s'éloigne de celles des graphes aléatoires pour les grandes valeurs.

Ceci étant dit, notre réseau a des propriétés très différentes de celles de ces graphes aléatoires. Sa longueur caractéristique et surtout son coefficient de regroupement sont très supérieurs à ceux de ces derniers. De même, si les distributions de degrés de notre réseau et des graphes aléatoires semblent qualitativement comparables, d'un point de vue quantitatif, notre réseau s'éloigne considérablement des ces derniers.

La conclusion de ces comparaisons est que notre réseau est très différent des graphes aléatoires. En tous points, ses propriétés sont différentes des leurs. Dès lors, il paraît difficile de les attribuer à sa structure bipartite sous-jacente. Plus précisément, cette structure bipartite n'est pas quelconque, et c'est sa singularité qui confère à notre réseau ses propriétés. Ce graphe bipartite représente la manière dont sont mentionnées les aires cérébrales dans les résumés d'articles relatant des expériences d'imagerie cérébrale fonctionnelle. Ces résumés étant censés énoncer les résultats importants de l'étude qu'ils décrivent, la singularité du graphe bipartite qui soutend notre réseau provient des patterns d'activations cérébrales observés lors de ces expériences. Il s'ensuit que nous pouvons à présent affirmer que le réseau que nous avons construit est une bonne représentation du réseau fonctionnel cérébral, et que les propriétés que nous en avons données sont bien les propriétés du réseau fonctionnel cérébral. Celui-ci est donc un petit monde, dont la distribution de degrés est composée de deux régimes exponentiels différents.

5 Conclusions

Un réseau représente un ensemble d'entités entretenant des relations les unes avec les autres. La généralité de cette définition est telle qu'elle peut s'appliquer à un nombre incalculable de cas de figure, dans sans doute tous les domaines de la Science. Néanmoins, la généralité de cette notion ne la rend pas caduque pour autant : mathématiquement formalisée par la théorie des graphes, elle permet d'analyser puissamment des problèmes issus de la sociologie, de l'informatique, de la biologie, . . . De plus, l'action combinée de la puissance et de la généralité de la notion de réseau a permis de mettre en évidence des similarités entre des phénomènes semblant pourtant très différents les uns autres. La prise de conscience de ce dernier point, à la fin du siècle dernier, constitue sans doute un tournant dans de nombreuses disciplines.

On pensait auparavant que les grands ensembles d'entités en interaction que l'on observait, répondaient à des schémas d'interactions propres à chacun, dont les principes organisateurs étaient si complexes, qu'au final ces schémas d'interactions étaient aléatoires. Le modèle de graphes aléatoires introduit par Erdős et Rényi, accompagné des développements théoriques de ces derniers et de leurs successeurs, s'imposaient alors comme des outils de prédilection pour appréhender ces grands réseaux complexes.

Les travaux de Watts & Strogatz (1998) et Barabási & Albert (1999), sans doute rendus possibles par des puissances de calcul qui nous permettent désormais de

manipuler ces réseaux, en ont radicalement changé notre vision. Nous savons maintenant que ces grands réseaux complexes, que l'on peut observer partout autour de nous, sont non seulement très différents des graphes aléatoires, mais surtout très similaires les uns des autres. Trois propriétés, apparemment indépendantes, se retrouvent quasi systématiquement dans tous ces réseaux : mêmes si elles ne sont pas en contact, deux entités sont toujours proches l'une de l'autre ; ces réseaux présentent un contraste entre une structure globale peu dense, c'est-à-dire présentant peu d'interactions au vu du nombre d'entités présentes, et une structure locale très dense, les entités ayant tendance à se regrouper en petites communautés au sein desquelles les interactions sont très fréquentes ; enfin, le nombre d'interactions de chaque entité est une grandeur irrégulièrement distribuée : tandis que la majorité interagissent avec très peu d'autres, quelques unes interagissent avec un grand nombre. On appelle "petits mondes" les réseaux vérifiant les deux premières de ces propriétés, et "réseaux sans échelle" ceux qui vérifient une version un peu plus spécifique de la troisième. Ces propriétés semblent quasi-universelles, tant elles sont récurrentes dans les réseaux que l'on observe.

Nous avons voulu vérifier la présence de ces propriétés dans un réseau très peu étudié quoique fascinant, le réseau fonctionnel cérébral. Dans ce réseau, les entités sont les aires cérébrales, et leurs interactions sont marquées par leur collaboration à la réalisation des activités cognitives. Nous avons utilisé des données d'imagerie cérébrale fonctionnelle pour construire ce réseau et avons montré qu'il était un petit monde, confirmant, une fois de plus, l'omniprésence de ce type de structure dans la nature.

Tout au long de ce chapitre, nous n'avons pas évoqué le langage. Pourtant il semble séduisant de vouloir l'observer en adoptant une perspective d'un ensemble

4.5 Origines des propriétés du réseau extrait de NeuroImage

d'entités en interaction. Peut-on construire un ou des réseaux à partir d'une langue ? Quelles en seraient les propriétés ? En particulier, peut-on retrouver dans le langage les propriétés universelles des réseaux complexes ? Qu'est-ce que ces réseaux pourraient nous apprendre sur les changements sémantiques ? Le chapitre suivant est consacré à ces questions, et aux réponses que l'on peut y apporter.

Changements sémantiques et réseaux lexicaux

LES CHAPITRES II et III ont présenté des méthodes pour observer et étudier les changements sémantiques sur des périodes allant de une à quelques générations. Dans ce chapitre, nous allons exposer une approche reposant sur la construction de réseaux lexicaux à partir de corpus. Cette approche autorise des profondeurs historiques encore plus importantes. Ce chapitre abordera des questions telles que : y a-t-il une relation entre la fréquence d'un mot et son nombre de sens ? Ces deux attributs influent-ils sur son évolution postérieure ? Les changements sémantiques interviennent-ils à un taux constant ?

Les réseaux que nous proposons d'utiliser sont, à l'image des nombreux réseaux que nous avons décrits dans le chapitre précédent, des réseaux de type "petit monde".

Une littérature grandissante atteste l'existence des propriétés dans des réseaux lexicaux d'origines variées et la première partie de ce chapitre y sera consacrée. Dans la seconde, nous détaillerons la méthode que nous proposons et l'illustrerons avec des corpus de chinois couvrant une période de 3000 ans.

1 Réseaux lexicaux

Au cours du chapitre précédent, nous avons décrit l'engouement, observable depuis quelques années, de nombreuses disciplines variées à appréhender leur objet d'étude sous forme de réseau. La raison en est que tous ces réseaux partagent souvent des propriétés non triviales : ils sont localement très denses sans l'être à un niveau global, ils ont de petites distances caractéristiques et des distributions de degrés spécifiques. Les réseaux représentant des entités en relation les unes avec les autres, il est tentant de vouloir représenter une langue, et plus particulièrement ses aspects sémantiques, sous la forme d'un réseau dont les nœuds sont des unités lexicales et les liens leurs relations syntagmatiques et/ou paradigmatiques. Les propriétés des réseaux lexicaux sont dès lors l'objet d'un intérêt croissant. Les études s'y intéressant diffèrent principalement par les stratégies suivies par leurs auteurs pour obtenir le ou les réseaux qu'ils décrivent. Il est possible de dégager deux approches : les informations nécessaires à la construction des réseaux sont puisées soit dans les productions des lexicographes (dictionnaires, thésaurus, . . .), soit dans celles de locuteurs (tâches de libre association sémantique ou corpus). Nous allons tour à tour détailler les résultats des études suivant ces approches.

1.1 Réseaux construits à partir de ressources lexicographiques

1.1.1 Réseaux de dictionnaires

Les dictionnaires sont une source possible d'informations sur les relations sémantiques qu'entretiennent les mots d'une langue. Ainsi, Gaume et al. (2004) ont étudié les longueurs caractéristiques et les coefficients de regroupement de deux réseaux issus du dictionnaire *Le Robert*. Dans le premier de leurs réseaux, les nœuds sont tous les substantifs définis dans le dictionnaire. Un lien est présent entre deux nœuds si l'un des substantifs correspondants est utilisé dans la définition de l'autre. La plus grande composante connexe du graphe ainsi construit est composé de 51511 sommets et 392142 liens. Sa longueur caractéristique est $\ell_{Robert_1} = 3.32$ et son coefficient de regroupement est $C_{Robert_1} = 0.183$. Un graphe aléatoire de taille et de densité équivalentes aurait une longueur caractéristique $\ell_{aléa} = 3.98$ et un coefficient de regroupement de $C_{aléa} = 3 \times 10^{-4}$. Leur réseau est donc un petit monde.

Ce premier réseau ne prend pas en compte la structure hiérarchique des entrées d'un dictionnaire qui informe sur les relations entre les différents sens de l'unité lexicale définie. Pour pallier cette perte d'information, Gaume et al. (2004) ont construit un second graphe, constitué de deux type de nœuds : les nœuds ω , qui représentent comme dans le premier graphe les substantifs définis dans le dictionnaire, et les nœuds Δ , utilisés pour caractériser la structuration des sens des entrées du dictionnaire. À chaque entrée définissant un substantif, un arbre de nœuds Δ est construit, reflétant la structure de l'article. Chacune des feuilles de cet arbre corres-

pond à une définition et est reliée aux nœuds ω représentant les substantifs utilisés dans la définition (figure 5.1). La plus grande composante connexe de ce second graphe est composée de 140026 nœuds et 399941 liens. Sa longueur caractéristique est $\ell_{Robert_2} = 5.21$ et son coefficient de regroupement $C_{Robert_2} = 0.008$. Un graphe aléatoire de taille et de densité équivalentes aurait une longueur caractéristique $\ell_{aléa} = 6.8$ et un coefficient de regroupement de $C_{aléa} = 4 \times 10^{-4}$. Bien que l'introduction de la structure des entrées dans le réseau réduise le coefficient de regroupement, il reste supérieur de 2 ordres de grandeur à celui d'un graphe aléatoire de mêmes taille et densité. Ce second graphe est lui aussi un petit monde.

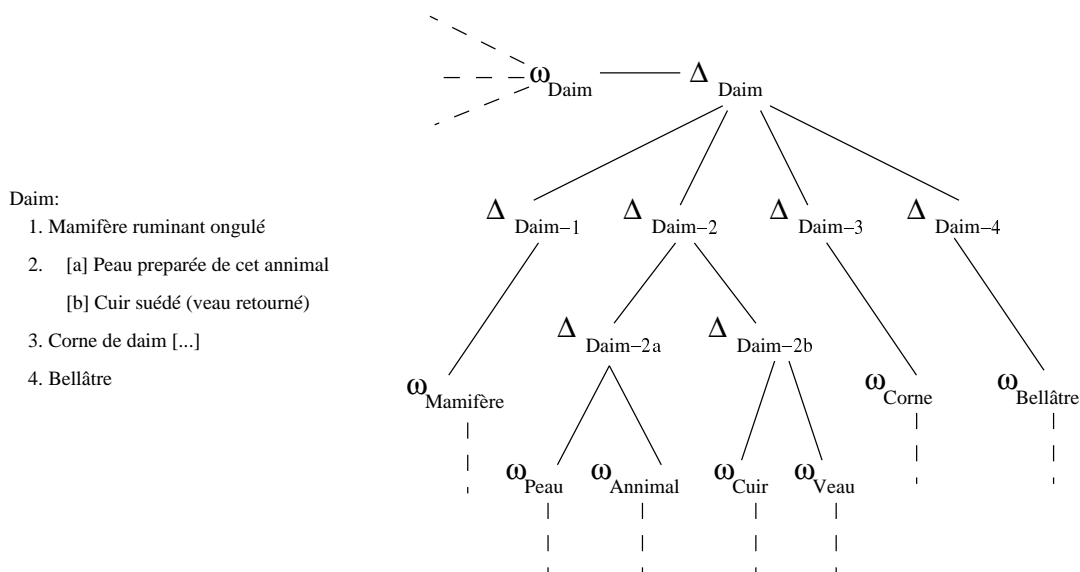


Figure 5.1 – Principe de construction du second graphe de Gaume et al. (2004). Le *Robert* propose 4 sens pour *daim* et les organise hiérarchiquement. Pour chaque substantif du dictionnaire, les auteurs créent un nœud ω et un arbre de nœuds Δ représentant la structure de l'entrée. Un arc est créé entre une feuille de l'arbre et un nœud ω si le substantif représenté par le nœud ω entre dans la définition représentée par la feuille.

En sus des définitions, les dictionnaires fournissent les synonymes des unités lexicales qu'il définissent. Venant (2004) a calculé la longueur caractéristique et le

coefficient de regroupement du réseau issu du dictionnaire électronique des synonymes (DES) du CRISCO (voir note 1 p. 99). La construction d'un réseau à partir du DES est naturelle : les nœuds sont les mots présents dans le DES, et un arc est présent entre 2 nœuds si le DES donne comme synonymes les mots auxquels ils correspondent. Ce réseau contient 49133 nœuds et 198549 liens. Sa longueur caractéristique $\ell_{DES} = 4.73$ est du même ordre de grandeur que celle d'un graphe aléatoire comparable ($\ell_{aléa} = 5.17$) et son coefficient de regroupement $C_{DES} = 0.35$ est très supérieur à celui d'un graphe aléatoire ($C_{aléa} = 1.6 \times 10^{-4}$). C'est donc un petit monde. Gaume (2005) a étudié un sous-ensemble du DES, contraint aux seuls verbes. Le réseau correspondant comprend 9043 sommets et 50948 liens. Sa longueur caractéristique est $\ell_{DES_{verbes}} = 4.17 (\simeq \ell_{aléa} = 3.76)$ et son coefficient de regroupement $C_{DES_{verbes}} = 0.35 (\gg C_{aléa} = 0.001)$. Gaume (2005) a aussi observé la distribution de degrés et a conclu qu'elle s'apparente à une loi de puissance, sans toutefois en donner l'exposant. Ce réseau est donc un petit monde sans échelle.

Albert & Barabási (2002) citent une étude similaire conduite par leur équipe et non publiée. Le réseau qu'ils étudient est construit à partir des informations de synonymie fournies par le dictionnaire anglophone *Merriam-Webster*. La plus grande composante connexe de ce réseau est formée de 22311 nœuds de degré moyen 13.48. Ils ont calculé $\ell_{MW} = 4.5 (\simeq \ell_{aléa} = 3.85)$ et $C_{MW} = 0.7 (\gg C_{aléa} = 6 \times 10^{-4})$. Ils ont aussi déterminé que la distribution de degrés suivait une loi de puissance d'exposant $\gamma_{MW} = 2.8$. Une fois de plus, ce réseau est un petit monde sans échelle.

1.1.2 Réseaux de thésaurus

Les thésaurus sont une autre source d'informations possible pour construire des réseaux lexicaux. Un thésaurus donne, pour chacune de ses entrées, une liste de mots sémantiquement associés. Ces associations sont moins contraintes que les relations de synonymies données par les dictionnaires. Ainsi, Motter, Moura, Lai, & Dasgupta (2002) ont étudié un réseau construit à partir du thésaurus *Moby*¹ et citent comme exemples de termes listés pour l'entrée *nature* : *universe*, *world* et *character*. Le réseau construit par Motter et al. (2002) est composé de 30000 nœuds ayant un degré moyen de 59.9. Ils ont calculé $\ell_{Moby} = 3.16 (\simeq \ell_{aléa} = 2.52)$ et $C_{Moby} = 0.53 (\gg C_{aléa} = 0.002)$. Motter et al. (2002) observent que la distribution de degrés suit une loi exponentielle pour $k < 100$ et une loi de puissance avec $\gamma_{Moby} = 3.5$ pour $k > 100$.

Steyvers & Tenenbaum (2005) ont pris comme source un autre thésaurus : *Roget's Thesaurus* (Roget, 1911). Ce thésaurus regroupe 29381 mots en 1000 catégories sémantiques, chaque mot pouvant appartenir à plusieurs catégories. Ce thésaurus a donc une structure de graphe bipartite avec, d'un côté, des nœuds représentant les mots et, de l'autre, des nœuds représentant les catégories. Les auteurs ont étudié la projection monopartite de ce graphe sur les mots, deux mots étant reliés s'ils partagent au moins une catégorie. Le graphe qu'ils ont ainsi obtenu a comme longueur caractéristique $\ell_{Roget} = 5.60$ et comme coefficient de regroupement $C_{Roget} = 0.875$. Steyvers & Tenenbaum (2005) n'ont pas comparé ce réseau à un graphe aléatoire construit à partir du modèle d'Erdős-Rényi, mais à la projection monopartite d'un graphe bipartite aléatoire avec les mêmes distributions de degré que le graphe bi-

¹<http://www.dcs.shef.ac.uk/research/ilash/Moby/>

partite représentant le thésaurus. Ils ont obtenu $\ell_{aléa} = 5.43$ et $C_{aléa} = 0.613$. La longueur caractéristique et le coefficient de regroupement du graphe aléatoire sont comparables à ceux du réseau issu du thésaurus. Comme nous l'avons vu à la section 4.5.1 du chapitre précédent, la projection monopartite d'un graphe bipartite aléatoire peut avoir un grand coefficient de regroupement selon les propriétés des distributions de degrés haute et basse du graphe bipartite. Les auteurs ne précisant pas si ℓ_{Roget} et C_{Roget} s'écartent, ou non, de manière statistiquement significative des valeurs obtenues avec des projections monopartites de graphes bipartites aléatoires, il est difficile de conclure sans ambiguïté que le réseau issu du thésaurus est un petit monde. En revanche, sa distribution de degrés suit une loi de puissance d'exposant $\gamma_{Roget} = 3.19$, faisant de lui un réseau sans échelle.

1.1.3 Wordnet

Wordnet est une base de données lexicale développée à l'université de Princeton et dont la structure se veut la plus proche possible de celle du lexique mental telle que révélée par les recherches en psycholinguistique (Miller, 1995 ; Fellbaum, 1998). Les noms, verbes, adjectifs et adverbes de l'anglais y sont consignés par ensembles de synonymes, nommés *synsets*. Chaque synset correspond à un sens. Ainsi, un mot polysémique appartient à plusieurs synsets. En plus des relations d'appartenance d'un mot à un synset, Wordnet comprend deux types de relations : des relations lexicales et des relations sémantiques. Les relations lexicales (par exemple l'antonymie) sont établies entre deux mots, tandis que les relations sémantiques le sont entre deux synsets. Parmi les relations sémantiques, on trouve dans Wordnet des relations d'hyponymie et d'hyperonymie (*chien* est un hyponyme de *canidé*

et inversement *canidé* est l'hyperonyme de *chien*) et des relations de méronymie et d'holonymie (*queue* est méronyme de *chien* et *chien* est holonyme de *queue*). D'autres relations existent dans Wordnet, mais n'ont pas été prises en considération par les études que nous allons passer en revue.

Steyvers & Tenenbaum (2005) ont étudié un réseau extrait de Wordnet. Dans leur réseau, les sommets sont les mots et les synsets, et les liens sont les relations d'appartenance d'un mot à un synset, d'antonymie, d'hyponymie et d'hyperonymie et de méronymie et d'holonymie. Hyponymie et hyperonymie d'une part et méronymie et holonymie d'autre part étant réciproques, chaque paire de relations a été fusionnée de manière à considérer le réseau comme non-orienté. Ce réseau est composé de 221647 nœuds (122005 mots et 99642 synsets). Les nœuds représentant des mots ont un degré moyen de 1.6 et ceux représentant des synsets de 4. La longueur caractéristique du réseau est $\ell_{Wordnet} = 10.56 (\simeq \ell_{aléa} = 10.61)$ et son coefficient de regroupement $C_{Wordnet} = 0.027 (\gg C_{aléa} = 1.3 \times 10^{-4})$. Sa distribution de degrés suit une loi de puissance d'exposant $\gamma_{Wordnet} = 3.11$. Il s'agit d'un petit monde sans échelle.

Étudier un réseau lexical dont les nœuds sont aussi bien les mots d'une langue que leurs sens comme l'ont fait Steyvers & Tenenbaum (2005) peut sembler étrange : il n'est pas évident de savoir ce que ce réseau représente réellement. Sigman & Cecchi (2002) ont aussi étudié Wordnet, mais en en extrayant un réseau dont les nœuds sont uniquement les synsets composés de noms. Ce réseau est donc le réseau des sens des noms. Comme Steyvers & Tenenbaum (2005), Sigman & Cecchi (2002) ont fusionné les relations d'hyponymie et d'hyperonymie et les relations de méronymie et d'holonymie. Ils ont aussi défini une relation de "polysémie" entre deux synsets, établie s'ils partagent un même mot, et une relation d'"antonymie" entre

deux synsets, établie si un des mots de l'un synset est antonyme de l'un des mots de l'autre synset. Sigman & Cecchi (2002) ont étudié les distributions de degrés en considérant séparément les relations d'hyponymie, de méronymie et de polysémie (les synsets n'ayant que 0, 1 ou 2 antonymes, la distribution de degrés assortie à cette relation n'a pas été étudiée). Ces trois distributions suivent des lois de puissance, dont les auteurs ne donnent pas les exposants.

Pour étudier la longueur caractéristique et le coefficient de regroupement, Sigman & Cecchi (2002) ont considéré huit réseaux : tous sont composés de 66025 nœuds (les synsets de Wordnet composés de noms) mais différent quant aux relations sémantiques entre synsets utilisées pour joindre les nœuds. Le premier de leurs réseaux ne comporte que les relations d'hyponymie. Il reflète l'organisation taxonomique des sens dans Wordnet et il a une structure d'arbre. Ce premier réseau hyponymique a ensuite servi de base pour la construction des sept autres, en y ajoutant les 1, 2 ou 3 autres types de relation (antonymie, méronymie et polysémie). Ainsi, ils ont été en mesure de déterminer la contribution de chacun des types de relation sémantique à la longueur caractéristique et au coefficient de regroupement. Plutôt que de comparer les longueurs caractéristiques et les coefficients de regroupement mesurés à ceux de graphes aléatoires construits selon le modèle d'Erdős-Rényi, Sigman & Cecchi (2002) ont construit des réseaux semi-aléatoires en ajoutant aléatoirement des liens au réseau hyponymique : chaque réseau lexical a été comparé avec un graphe semi-aléatoire de même nombre d'liens. Néanmoins, Sigman & Cecchi (2002) ne donnent pas les valeurs des longueurs caractéristiques et des coefficients de regroupement qu'ils obtiennent avec les graphes semi-aléatoires construits pour correspondre aux réseaux lexicaux comprenant les relations d'antonymie. Leurs résultats sont présentés sur la figure 5.2.

1.1 Réseaux construits à partir de ressources lexicographiques

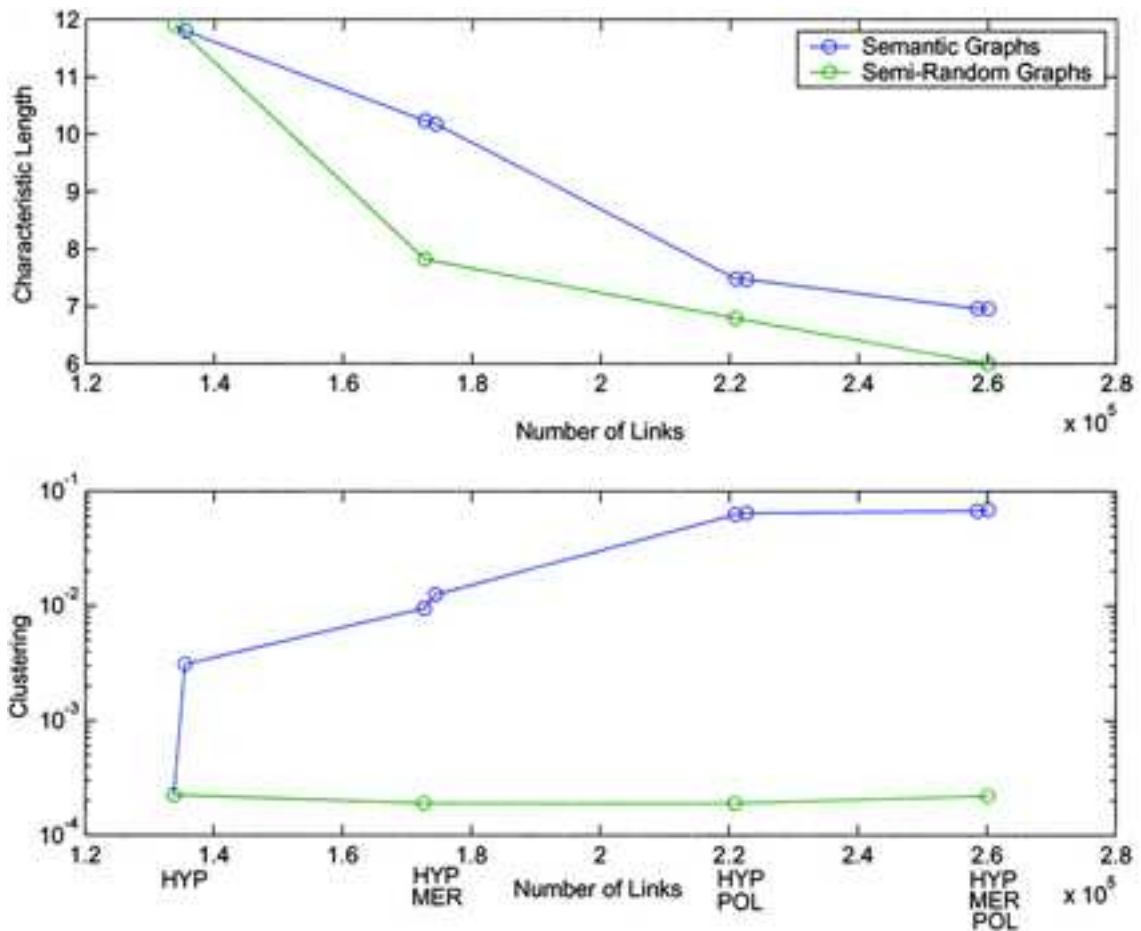


Figure 5.2 – En bleu : longueurs caractéristiques (en haut) et coefficients de regroupement (en bas) des réseaux étudiés par Sigman & Cecchi (2002). En vert : longueurs caractéristiques et coefficients de regroupement de graphes semi-aléatoires construits en ajoutant aléatoirement des liens à l’arbre hyponymique. Les réseaux comprenant les 1849 relations d’antonymie ne sont pas mentionnés en abscisse, mais sont représentés sur les graphiques par les cercles accolés à droite de ceux mentionnés en abscisses.

Sigman & Cecchi (2002) interprètent leurs résultats en soulignant que la polysémie est la relation sémantique permettant de transformer le réseau hyponymique en réseau petit monde. En effet, tous les réseaux comprenant les relations de polysémie ont une longueur caractéristique comparable à celle des graphes semi-aléatoires et un coefficient de regroupement supérieur de plusieurs ordres de grandeur aux leurs. Ce n'est pas le cas des réseaux ne comprenant que la méronymie : bien que l'adjonction des relations de méronymie provoque une augmentation du coefficient de regroupement, la longueur caractéristique des réseaux comprenant ces relations est supérieure à celle des graphes semi-aléatoires. L'impact de l'antonymie est similaire : la présence de ces relations conduit à une hausse du coefficient de regroupement, mais est pratiquement sans effet sur la longueur caractéristique. Néanmoins, tous ces résultats restent sujets à caution, les comparaisons entre réseaux lexicaux et graphes semi-aléatoires n'étant pas statistiquement évaluées. S'il n'est pas nécessaire de démontrer la significativité statistique lorsque les différences sont de plusieurs ordres de grandeurs, comme dans le cas des coefficients de regroupement, elle permettrait de mieux apprécier les différences de quelques unités observées par Sigman & Cecchi (2002) entre les longueurs caractéristiques des réseaux lexicaux et celles des graphes semi-aléatoires.

1.2 Réseaux construits à partir de productions de locuteurs

Dans la section précédente nous avons passé en revue des travaux analysant des réseaux lexicaux construits à partir de ressources explicitement produites pour dé-

crire le contenu sémantique des unités lexicales ou les relations sémantiques qu'elles entretiennent. Nous allons à présent nous pencher sur des réseaux construits directement à partir des productions de locuteurs, soit d'après les résultats de tâches de libre association, soit d'après des corpus.

1.2.1 Réseaux construits à partir de tâches de libre association

Dans une tâche de libre association, on définit une liste de *mots indices* qui sont présentés successivement aux sujets. Pour chaque mot indice, les sujets doivent produire le ou les premiers mots qui leur viennent spontanément à l'esprit. Fontoura Costa (2004) a fait réaliser une telle tâche à un seul sujet produisant des associations pendant une semaine. Il a ainsi obtenu un réseau de 250 nœuds et 1930 liens. Ce réseau est orienté, le nœud correspondant au mot m_1 étant relié au nœud correspondant au mot m_2 si le sujet a produit m_2 à la lecture de m_1 . La longueur caractéristique de ce réseau est $\ell_{Costa} = 3.32$ et son coefficient de regroupement $C_{Costa} = 0.075$. Fontoura Costa (2004) conclut que son réseau est un petit monde, sans fournir la longueur caractéristique et le coefficient de regroupement d'un graphe aléatoire de mêmes dimension et densité. Si l'on effectue ces calculs, on obtient : $\ell_{aléa} = 2.01 < \ell_{Costa}$ et $C_{aléa} = 0.061 \simeq C_{Costa}$. Il semblerait que ce réseau se rapproche plus d'un graphe régulier que d'un petit monde. L'auteur présente des graphiques des distributions cumulatives des degrés entrants et sortants mais limite sa discussion à la seule mention que les distributions sont différentes, et que celles des degrés entrants semblent suivre une loi de puissance pour les degrés inférieurs à 4.

Steyvers & Tenenbaum (2005) ont aussi employé une tâche de libre association comme source d'informations. Leur base empirique est néanmoins bien plus large

que celle de Fontoura Costa (2004). Ils ont utilisé les normes de libre association établies par Nelson, McEvoy, & Schreiber (1999) sur 6000 sujets avec une liste de 5018 mots indices (une centaine de mots parmi les 5018 étaient présentés à chaque sujet). Steyvers & Tenenbaum (2005) ont construit deux réseaux, en laissant de côté les mots produits par les sujets qui ne faisaient pas partie de la liste de mots indices de Nelson et al. (1999) : un premier réseau orienté, dans lequel un mot A était relié à un mot B si au moins deux sujets avaient produit B à la présentation de A ; un second réseau obtenu en symétrisant les liens du premier. Le réseau non orienté était connexe et donc composé de 5018 nœuds, son degré moyen étant de 22. La plus grande partie connexe du réseau orienté comprenait 96% des nœuds ; son degré moyen était 12.7. Les auteurs ont calculé $\ell_{NELSON_{orienté}} = 4.27 (\simeq \ell_{aléa} = 4.26)$ et $\ell_{NELSON_{nonorienté}} = 3.04 (\simeq \ell_{aléa} = 3.03)$. Le coefficient de regroupement n'étant pas défini pour les réseaux orientés, il n'a été calculé que pour le réseau non orienté : $C_{NELSON_{nonorienté}} = 0.186 (\gg C_{aléa} = 1.29 \times 10^{-4})$. Ce réseau est donc un petit monde. Steyvers & Tenenbaum (2005) se sont aussi intéressés à la distribution des degrés de ces réseaux. Celle du réseau non orienté suit une loi de puissance d'exposant $\gamma_{NELSON_{nonorienté}} = 3.01$ et la distribution de degrés entrants du réseau orienté s'approche d'une loi de puissance dont l'exposant est $\gamma_{NELSON_{orienté}}^{in} = 1.79$. La distribution de degrés sortants suit une loi présentant un pic centré sur la moyenne, évoquant aux auteurs une distribution normale ou distribution ξ^{21} . Steyvers & Tenenbaum (2005) expliquent cette distribution en faisant remarquer que sa sensibilité aux conditions expérimentales de la tâche de libre association, en particulier au nombre de sujets auxquels a été présenté le mot indice, et au nombre de mots qu'ils

¹sic. Une erreur typographique s'est sans doute glissée dans l'article de Steyvers & Tenenbaum (2005), les auteurs voulant sans doute faire référence à la distribution du χ^2 .

avaient à produire en réponse au mot indice.

1.2.2 Réseaux construits à partir de corpus

Les corpus sont une source de productions de locuteurs utilisables pour construire des réseaux lexicaux. Dans un réseau construit à partir d'un corpus, les nœuds représentent les mots du corpus, et les liens leurs cooccurrences. La littérature sur les propriétés statistiques des corpus, et en particulier des cooccurrences, est vaste et ne se limite pas à celle des réseaux lexicaux (Manning & Schütze, 1999). Deux approches sont couramment employées pour relever les cooccurrences : la première définit une cooccurrence entre deux mots comme la présence dans le corpus des deux mots à une distance inférieure à N mots, et la seconde définit une cooccurrence comme leur présence dans une même unité textuelle, telle qu'une phrase ou un paragraphe. Ferrer i Cancho & Sole (2001) ont employé la première approche et Ferrer i Cancho, Solé, & Köhler (2004) une version élaborée de la seconde, prenant en considération les relations syntaxiques.

Ferrer i Cancho & Sole (2001), dans ce qui est sans doute la première étude à montrer que les réseaux lexicaux ont les mêmes propriétés que les grands réseaux complexes naturels, ont utilisé la première approche pour construire deux réseaux à partir d'un sous-ensemble de 70 millions de mots du *British National Corpus*. Une cooccurrence est définie entre deux mots s'ils apparaissent dans le corpus séparés par au plus un mot. Dans le premier réseau, dit non contraint, un lien est établi entre deux mots s'ils cooccurraient au moins une fois dans le corpus. Dans le second réseau, dit contraint, un lien était créé entre deux mots si leur nombre de cooccurrences était supérieur à celui attendu dans le cas d'une distribution aléatoire

des mots selon leur fréquence respective. La plus grande composante connexe du premier réseau était composé de 478773 nœuds avec un degré moyen de 74.2 tandis que celle du second comportait 460902 nœuds avec un degré moyen de 70.13. Les auteurs ont calculé les longueurs caractéristiques de ces réseaux $\ell_{BNC_{nonconstraint}} = 2.63 (\simeq \ell_{aléa} = 3.03)$ et $\ell_{BNC_{constraint}} = 2.67 (\simeq \ell_{aléa} = 3.06)$, ainsi que les coefficients de regroupement : $C_{BNC_{nonconstraint}} = 0.686 (\simeq C_{aléa} = 1.52 \times 10^{-4})$ et $C_{BNC_{constraint}} = 0.437 (\simeq C_{aléa} = 1.55 \times 10^{-4})$. Ces deux réseaux sont des petits mondes. Leurs distributions de degrés sont en outre quasi identiques. Elles exhibent deux régimes différents : une loi de puissance d'exposant $\gamma_{BNC}^1 = 1.5$ pour les degrés inférieurs à 5000 et une autre loi de puissance d'exposant $\gamma_{BNC}^2 = 2.7$ pour les autres.

Ferrer i Cancho et al. (2004) ont analysé trois réseaux construits à partir de corpus annotés avec des informations syntaxiques selon le formalisme des grammaires de dépendance, formalisme qui représente la structure des phrases par les relations de dépendance existant entre leurs mots (figure 5.3).

Le petit garçon cherche son ballon rouge

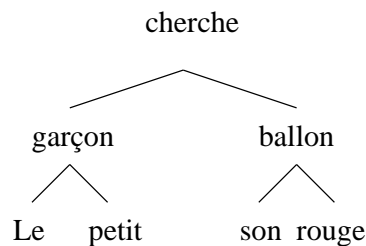


Figure 5.3 – Exemple de structure de dépendance

Les liens des réseaux construits par Ferrer i Cancho et al. (2004) représentent directement les relations de dépendance. Les relations de dépendance étant orientées, les réseaux le sont aussi. Les trois corpus étaient un corpus de tchèque, com-

posé de 562820 mots et 31701 phrases, un corpus de roumain de 21275 mots et 2340 phrases, et un corpus d'allemand de 153007 mots et 10027 phrases. Les réseaux correspondants avaient respectivement $N_{tcheque} = 33336$, $N_{roumain} = 5563$ et $N_{allemand} = 6789$ mots. Leur degré moyen était $\langle k \rangle_{tcheque} = 13.4$, $\langle k \rangle_{roumain} = 4.6$ et $\langle k \rangle_{allemand} = 5.1$. Ces trois réseaux sont des petits mondes, puisque d'une part $\ell_{tcheque} = 3.5 (\simeq \ell_{aléa} = 4)$, $\ell_{roumain} = 3.4 (\simeq \ell_{aléa} = 5.2)$ et $\ell_{allemand} = 3.8 (\simeq \ell_{aléa} = 5.7)$, et d'autre part $C_{tcheque} = 0.1 (\gg C_{aléa} = 4 \times 10^{-4})$, $C_{roumain} = 0.09 (\gg C_{aléa} = 9.2 \times 10^{-4})$ et $C_{allemand} = 0.02 (\gg C_{aléa} = 6 \times 10^{-6})$.

Considérés comme non orientés, les réseaux de Ferrer i Cancho et al. (2004) ont des distributions de degrés suivant des lois de puissance d'exposant $\gamma_{tcheque} = 2.29$, $\gamma_{roumain} = 2.19$ et $\gamma_{allemand} = 2.23$. Si l'orientation des liens est prise en compte, les distributions de degré suivent aussi des lois de puissance, d'exposants $\gamma_{tcheque}^{in} = 1.99$, $\gamma_{roumain}^{in} = 2.20$ et $\gamma_{allemand}^{in} = 2.37$ et $\gamma_{tcheque}^{out} = 1.98$, $\gamma_{roumain}^{out} = 2.20$ et $\gamma_{allemand}^{out} = 2.09$. Ces trois réseaux sont donc sans échelle.

1.3 Conclusions

Tous les résultats des études que nous avons passé en revue sont synthétisés dans le tableau 5.1. À l'exception d'une seule, celle de Fontoura Costa (2004), toutes ces études concluent que les réseaux lexicaux ont les mêmes propriétés que les réseaux complexes naturels que nous avons détaillés au chapitre précédent : d'une part, ils ont une faible longueur caractéristique et un grand coefficient de regroupement, faisant d'eux des réseaux petits mondes, et d'autre part ils ont des distributions de degrés suivant des lois de puissance, caractéristiques des réseaux sans échelle. Le fait que le réseau de Fontoura Costa (2004) ne présente pas ces pro-

priétés est probablement due à sa petite taille, Steyvers & Tenenbaum (2005) ayant par ailleurs montré que les réseaux construits à partir de tâches de libre association sont des petits mondes sans échelle. D'une manière plus générale, la variété des sources d'informations employées pour construire ces réseaux lexicaux, ainsi que la convergence des résultats, permettent d'écarter l'hypothèse selon laquelle les caractéristiques des réseaux lexicaux puissent provenir de biais méthodologiques et de conclure au contraire que ces caractéristiques sont intrinsèques au langage.

Réseau	N	$\langle k \rangle$	ℓ	$\ell_{aléa}$	C	$C_{aléa}$	γ	référence
Robert	51511	15.23	3.32	3.98	0.183	3×10^{-4}	-	Gaume et al. (2004)
Robert 2	140026	57.13	5.21	6.8	0.008	4×10^{-4}	-	Gaume et al. (2004)
DEC	49133	8.08	4.73	5.17	0.35	1.6×10^{-4}	-	Venant (2004)
DEC (verbes)	9043	11.26	4.17	3.76	0.35	0.001	?	Gaume (2005)
Merriam-Webster	22311	13.48	4.5	3.85	0.7	1.6×10^{-4}	2.8	Albert & Barabási (2002)
Moby	30000	59.9	3.16	2.52	0.53	0.002	3.5	Motter et al. (2002)
Roget's Thesaurus	29381	-	5.60	5.43†	0.875	0.613†	3.19	Steyvers & Tenenbaum (2005)
Wordnet	221647	2.68	10.56	10.61†	0.027	1.6×10^{-4} †	3.11	Steyvers & Tenenbaum (2005)
Wordnet *	66025	15.44	7.4	~ 7	0.06	$\sim 10^{-4}$?	Sigman & Cecchi (2002)
Libre association	250	7.4	3.32	0.02	0.075	0.061	X	Fontoura Costa (2004)
Nelson et al. (1999) orienté	5018	22	4.27	4.26	-	-	1.76	Steyvers & Tenenbaum (2005)
Nelson et al. (1999) non orienté	~ 4800	12.7	3.04	3.03	0.186	1.29×10^{-4}	3.01	Steyvers & Tenenbaum (2005)
BNC, non contraint	478773	74.2	2.63	3.03	0.686	1.52×10^{-4}	1.5 / 2.7 ‡	Ferrer i Cancho & Sole (2001)
BNC, contraint	460902	70.13	2.67	3.06	0.437	1.54×10^{-4}	1.5 / 2.7 ‡	Ferrer i Cancho & Sole (2001)
Tchèque	33336	13.4	3.5	4	0.1	4×10^{-4}	2.29 §	Ferrer i Cancho et al. (2004)
Roumain	5563	4.6	3.4	5.2	0.09	9.2×10^{-4}	2.19 §	Ferrer i Cancho et al. (2004)
Allemand	6789	5.1	3.8	5.7	0.02	6×10^{-6}	2.23 §	Ferrer i Cancho et al. (2004)

Tableau 5.1 – Nombres de nœuds (N), degrés moyens ($\langle k \rangle$), distances caractéristiques (ℓ), distances caractéristiques de graphes aléatoires de taille et de degré moyen identiques ($\ell_{aléa}$), coefficients de regroupement (C), coefficients de regroupement de graphes aléatoires de taille et de degré moyen identiques ($C_{aléa}$) et exposants des lois de puissance (γ) suivies par les distributions de degrés des réseaux lexicaux. Tirets (-) : données non disponibles. Points d'interrogation (?) dans la colonne γ : distribution de degrés du réseau correspondant suit une loi de puissance dont l'exposant n'est pas donné. Croix (X) : distribution de degrés ne suivant pas une loi de puissance. † : le graphe aléatoire n'est pas construit selon le modèle d'Erdős-Rényi (voir texte). * : les données sont celles du réseau comprenant les relations d'hyponymie et de polysémie. § : seul le degré des réseaux non orientés est précisé.

2 Graphes de corpus et sémantique diachronique

2.1 Introduction

Variétés de chinois ¹

Linguistiquement, derrière le vocable de *chinois* se trouve une grande variété de parlers, tant diachroniquement que synchroniquement. Cette diversité est similaire à celle existant entre le latin et les langues romanes qui en descendent. Diachroniquement, il est d'usage de faire débiter le chinois avec les premiers écrits : des textes divinatoires gravés sur des os et des coquillages, qui remontent à 1500 av. JC. L'histoire du chinois est de manière consensuelle divisée en trois périodes, le chinois ancien (jusqu'au 6^e siècle), le chinois moyen (jusqu'au 13^e siècle), puis le chinois moderne (Lehmann, 1992). Synchroniquement, il se décompose en huit grands groupes dialectaux (bien que le terme de langue soit plus approprié que celui de dialecte) : le mandarin, le wu, le huizhou, le gan, le xiang, le min, le keja et le cantonnais.

Parallèlement à ces découpages diachronique et synchronique, s'est développée et maintenue une forme vernaculaire écrite, désignée par le terme de chinois littéraire. Le chinois littéraire a évolué à partir du chinois classique, la forme écrite du

¹Sauf mention contraire, tous les faits sur le chinois avancés ici proviennent de Norman (1988)

chinois ancien développée entre le 5^e siècle av. JC et le début du 3^e siècle ap. JC. C'est en chinois classique qu'ont été écrits plusieurs des plus influents textes de la pensée chinoise, tels que les *Analectes* de Confucius ou *Le Livre de la Voie et de la Vertu* de Lao Tseu. À l'instar du latin en occident, le chinois classique est resté utilisé pour la communication écrite en dépit des évolutions subies par les formes orales. Il n'en a pas moins subi ses propres évolutions, produisant le chinois littéraire. Le chinois écrit datant d'avant le 5^e siècle av. JC est appelé chinois pré-classique et diffère largement du chinois classique et, par conséquent, du chinois littéraire. Le 20^e siècle a vu l'abandon progressif du chinois littéraire dans les productions écrites et son remplacement par un nouveau vernaculaire écrit, plus proche des formes orales.

Les travaux que nous présentons dans ce chapitre étant effectués sur la base de corpus, ils concernent les formes écrites du chinois : les chinois pré-classique, classique, littéraire et moderne, et non ses formes orales. Les variations dialectales synchroniques sont donc hors de notre propos.

Éléments typologiques du chinois et système d'écriture

Le chinois classique est un exemple quasi parfait de langue isolante : virtuellement tous les morphèmes sont monosyllabiques et tous les mots sont monomorphémiques ; le chinois n'a pas de morphologie. Le système d'écriture chinois est logographique, chaque caractère représentant un morphème. Une conséquence directe est que le nombre de caractères est nécessairement élevé. Le tableau 5.2 donne le nombre de caractères recensés par des dictionnaires représentatifs de différentes périodes.

Les nombres impressionnants de caractères catalogués par ces dictionnaires doivent être tempérés. Non seulement ces dictionnaires donnent, le cas échéant, différentes

Date	Nom du dictionnaire	Nombre de caractères
100	<i>Shuowen jiezi</i>	9353
6 ^e siècle	<i>Yupian</i>	12158
601	<i>Qieyun</i>	16917
1011	<i>Guangyun</i>	26194
1039	<i>Jiyun</i>	53525
1615	<i>Zihui</i>	33179
1716	<i>Kangxi zidian</i>	47035
1916	<i>Zhonghua da zidian</i>	48000

Tableau 5.2 – Nombre de caractère recensés par des dictionnaires représentatifs de différentes périodes. D’après Norman (1988).

variantes utilisées pour écrire un même mot, mais comprennent aussi un grand nombre de caractères rares. Sur les dizaines de milliers de caractères existants, seuls quelques milliers sont couramment utilisés.

L’évolution du chinois est marquée, entre autre, par une simplification de son système phonologique. Les mots étant monosyllabiques, cette évolution a eu pour conséquence l’apparition de nombreux homophones. Pour parer à ce phénomène, le chinois a eu recours à l’introduction sans cesse croissante de mots bisyllabiques, voire polysyllabiques. Le nombre de mots monosyllabiques en chinois moderne est évalué à moins de 30% (Duanmu, 1999). Le principal mécanisme de construction de mots polysyllabiques est la composition de morphèmes. Les mots polysyllabiques sont donc polymorphémiques. Le chinois étant particulièrement résistant à l’emprunt lexical, la composition morphémique est le principal procédé d’innovation lexicale en chinois.

Le système d’écriture du chinois est la principale raison qui nous a conduit à nous tourner vers cette langue (ou plutôt cette famille de langues). D’une part le système d’écriture chinois est l’un des rares à proposer une tradition à la fois très

longue, ininterrompue pendant plusieurs millénaires, et très fournie, rendant possible l'application de la méthode que nous proposons sur une grande profondeur historique. D'autre part, étant logographique, le système d'écriture chinois rend transparents les changements phonologiques intervenus au cours des millénaires sur lesquels portent notre étude. Les systèmes d'écriture alphabétiques calquent la forme écrite des mots sur leur forme orale. Dans les langues employant de tels systèmes d'écriture, comme les langues occidentales, les changements phonologiques ont donc une conséquence directe sur la forme écrite des mots. Nous proposons de comparer des réseaux construits à partir de corpus d'époques différentes. Si nous avions utilisé une langue employant un système d'écriture alphabétique, une étape préalable à toute comparaison aurait été l'appariement fastidieux des différentes formes écrites d'un même mot à différents stades de la langue (par exemple ancien anglais *fæder* > anglais moyen *fader* > anglais *father*). Le système d'écriture logographique du chinois rend cette étape superfétatoire.

Description des corpus

Les réseaux que nous étudierons dans ce chapitre ont été construits à partir de 10 corpus représentatifs d'époques différentes. Le tableau 5.3 donne les époques d'écriture des textes composant ces corpus, ainsi que la taille de ces corpus.

2.2 Construction des réseaux

L'approche que nous avons employée pour construire un réseau à partir d'un corpus est similaire à celle employée par Ferrer i Cancho & Sole (2001) : les nœuds sont les caractères du corpus et un lien est présent entre deux nœuds si les caractères

	Époque	Nombre de caractères différents	Nombre total de caractères
Corpus 01	1066 - 256 av. JC	3102	101 367
Corpus 02	770 - 221 av. JC	4719	1 204 482
Corpus 03	206 av. JC - 220	4925	1 322 846
Corpus 04	220 - 281	4978	1 460 552
Corpus 05	251 - 979	5868	5 738 534
Corpus 06	960 - 1279	5107	1 919 310
Corpus 07	1272 - 1644	5080	1 436 061
Corpus 08	1644 - 1911	4699	1 089 393
Corpus 09	1911 - 1949	5529	4 217 094
Corpus 10	1949 - présent	6688	9 465 250

Tableau 5.3 – Époque d’écriture et taille des corpus utilisés dans notre étude.

correspondants apparaissent séparés dans le corpus par moins de trois caractères. Ce faisant, nous négligeons le fait que le chinois moderne multiplie les mots polysyllabiques. Les réseaux que nous construisons sont donc à considérer au niveau du morphème, plus qu’au niveau du mot.

Une fois construits, ces réseaux sont filtrés de manière à ne conserver que les liens représentant des cooccurrences statistiquement significatives. Cette significativité est évaluée avec un test du Student à un seuil de 0.01. Plus précisément, pour conserver un lien entre deux caractères A et B , la fréquence F_{AB} de la cooccurrence correspondante doit vérifier (Manning & Schütze, 1999) :

$$\frac{F_{AB} - \frac{2 \cdot D \cdot F_A \cdot F_B}{N_C}}{\sqrt{F_{AB}}} > t \quad (5.1)$$

où F_A et F_B sont les fréquences des caractères A et B , D la distance maximale pouvant séparer les caractères A et B ($D = 3$), N_C le nombre total de caractères dans le corpus, et t la valeur minimale du test de Student pour une significativité de

0.01 ($t = 2.326$). Le tableau 5.4 donne le nombre de sommets et le degré moyen des réseaux avant le filtrage des liens, ainsi qu'après le filtrage et l'extraction de la plus grande composante connexe. Le nombre de nœuds après filtrage ainsi que le degré moyen sont corrélés à la taille du corpus (respectivement, $\rho = 0.88, p < 0.001$ et $\rho = 0.93, p < 0.001$).

Avant de tirer quelle conclusion diachronique que ce soit à partir des réseaux que nous avons construits, il convient de s'assurer que ceux-ci représentent bien des états du chinois se succédant dans le temps. Si tel est bien le cas, la similarité entre deux de ces réseaux doit être décroissante en fonction de l'intervalle temporel qui sépare les corpus à partir desquels ils ont été construits. Nous définissons la similarité S_{R_i, R_j} entre les réseaux R_i et R_j par :

$$S_{R_i, R_j} = \frac{|R_i \cap R_j|}{\min(|R_i|, |R_j|)}, \quad (5.2)$$

	Avant filtrage		Après filtrage	
	N	$\langle k \rangle$	N	$\langle k \rangle$
Corpus 01	3102	68.44	1021	9.14
Corpus 02	4719	224.12	2679	30.60
Corpus 03	4925	240.74	2713	34.72
Corpus 04	4978	315.16	3065	39.28
Corpus 05	5868	608.48	4544	86.08
Corpus 06	5107	309.81	3164	43.27
Corpus 07	5080	300.16	3330	37.02
Corpus 08	4699	212.10	2572	26.10
Corpus 09	5529	390.81	4007	56.61
Corpus 10	6688	532.08	5007	85.79

Tableau 5.4 – Nombre de nœuds N et degré moyen $\langle k \rangle$ avant le filtrage des liens ainsi qu'après le filtrage et l'extraction de la plus grande composante connexe des réseaux lexicaux issus des 10 corpus de chinois.

où $R_i \cap R_j$ est le réseau composé des nœuds et des liens présents à la fois dans R_i et dans R_j et $|R|$ le nombre de liens du réseau R . Si l'un des réseaux est un sous-réseau de l'autre, S_{R_i, R_j} vaut 1 ; si les deux réseaux ne partagent aucun lien, S_{R_i, R_j} vaut 0. La figure 5.4 donne une représentation graphique de la similarité entre toutes les paires de réseaux. Elle diminue au fur et à mesure que l'on compare des corpus éloignés dans le temps. L'analyse de ces réseaux pour une étude diachronique du chinois est donc justifiée.

2.3 Analyse statistique des réseaux

Cette section présente l'analyse des longueurs caractéristiques, coefficients de regroupement et distributions de degrés des 10 réseaux.

2.3.1 Longueurs caractéristiques et coefficients de regroupement

Le tableau 5.5 donne les longueurs caractéristiques et les coefficients de regroupement des 10 réseaux, ainsi que ceux de graphes aléatoires de même taille et même densité. Ni la longueur caractéristique ni coefficient de regroupement ne sont corrélé à la taille du corpus. Pour chacun des 10 réseaux que nous avons construits, la longueur caractéristique est courte, de l'ordre de celle d'un graphe aléatoire de même taille et de même densité, et le coefficient de regroupement est élevé, supérieur de plusieurs ordres de grandeur à celui d'un graphe aléatoire. Tous ces réseaux sont donc des petits mondes. Cette propriété, déjà observée à un niveau lexical (voir section 1), est aussi vérifiée à un niveau morphémique.

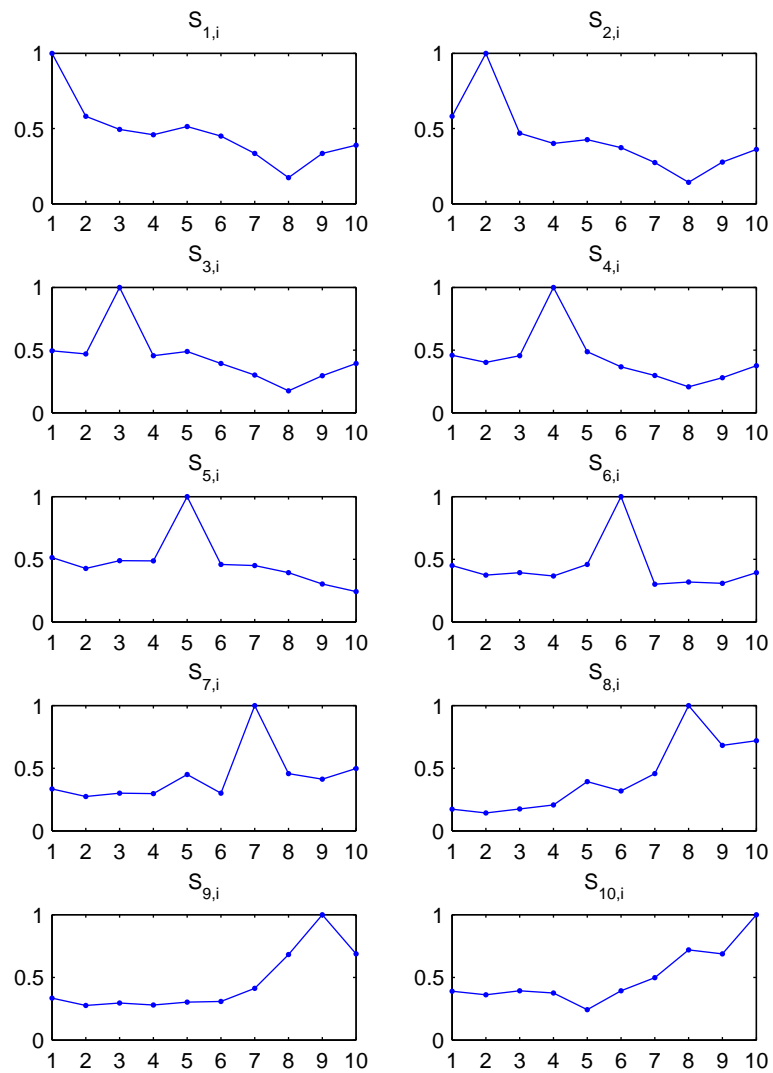


Figure 5.4 – Similarités entre les réseaux étudiés. Chaque graphique donne la similarité $S_{k,i}$ entre le réseau k et tous les autres .

	ℓ	$\ell_{aléa}$	C	$C_{aléa}$
Corpus 01	3.09	3.13	0.60	0.009
Corpus 02	2.54	2.31	0.62	0.011
Corpus 03	2.59	2.23	0.58	0.013
Corpus 04	2.62	2.19	0.54	0.012
Corpus 05	2.53	1.89	0.51	0.019
Corpus 06	2.71	2.15	0.52	0.013
Corpus 07	2.76	2.25	0.59	0.011
Corpus 08	2.71	2.40	0.58	0.010
Corpus 09	2.39	2.06	0.58	0.014
Corpus 10	2.46	1.91	0.59	0.017

Tableau 5.5 – Longueurs caractéristiques et coefficients de regroupement des réseaux lexicaux issus des 10 corpus de chinois (ℓ et C) et de graphes aléatoires de mêmes taille et densité ($\ell_{aléa}$ et $C_{aléa}$)

2.3.2 Distributions de degrés

La figure 5.5 présente les distributions cumulatives de degrés des 10 réseaux que nous avons construits. Les échelles des graphiques sont semi-logarithmiques et les distributions y apparaissent comme des droites. Les degrés suivent donc des distributions exponentielles. Pour chaque réseau, le meilleur ajustement est indiqué par une ligne continue et l'exposant β est donné. Ce résultat diffère de ceux des études présentées dans la section 1 qui concluent dans la plupart des cas à des distributions de degrés en lois de puissance. Une explication possible peut provenir du fait que nos réseaux se situent à un niveau morphémique, ainsi que des stratégies d'innovation lexicale du chinois. Le modèle initial de croissance de réseaux par attachement préférentiel de Barabási & Albert (1999) prédit une distribution de degrés en loi de puissance. Dans les développements subséquents de leur modèle, Albert & Barabasi (2000) ont montré que si la probabilité de développement d'un réseau par

adjonction de nouveaux liens internes est suffisamment supérieure à celle de développement par ajout de nouveaux nœuds, la distribution de degrés résultante est une distribution exponentielle (voir chapitre précédent, section 3.2.2). Comme nous l'avons mentionné plus haut, la principale stratégie d'innovation lexicale du chinois est la création de mots polymorphémiques. Observées à un niveau morphémique, les innovations lexicales se caractérisent par l'apparition de nouvelles cooccurrences de morphèmes, ce qui se traduit dans les réseaux par l'apparition de nouveaux liens internes. Les distributions exponentielles de degrés que nous observons sont donc en accord avec nos attentes.

2.4 Analyse des évolutions sémantiques du chinois

Notre but dans ce chapitre est d'analyser quantitativement les changements sémantiques des morphèmes du chinois au travers de leur nombre de sens, et en particulier d'évaluer l'impact de leur fréquence et de leur nombre de sens à un instant donné sur leur évolution future. A cette fin, il est crucial pour nous d'évaluer le nombre de sens de chaque morphème. La méthode que nous proposons pour cette évaluation repose sur l'idée suivante : du fait de ses différents sens, un morphème interagit avec un certain nombre d'autres qui vont constituer un voisinage sémantique dans les réseaux. Pour déterminer les différents sens d'un morphème, nous procédons en deux étapes : extraction du voisinage sémantique, puis identification des sens au sein du voisinage sémantique à partir de ses propriétés topologiques.

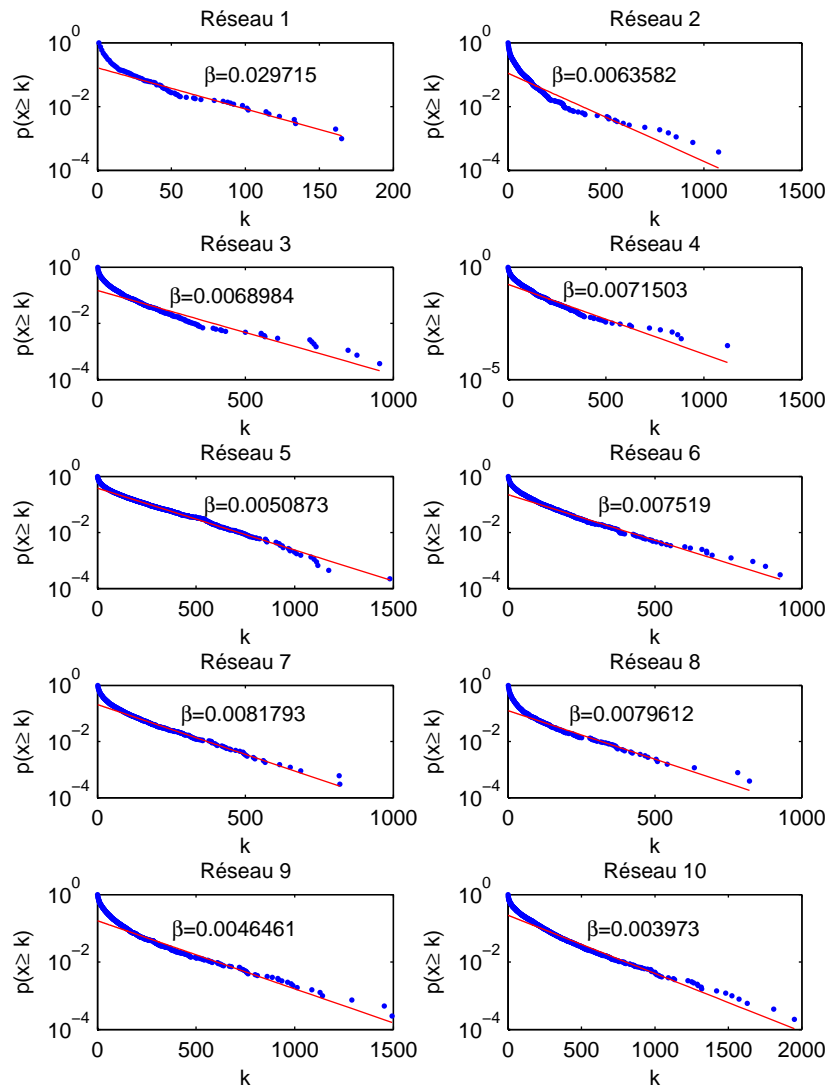


Figure 5.5 – Distributions de degrés des 10 réseaux sur une échelle semi-logarithmique. Ces distributions apparaissent comme des droites, indiquant des distributions exponentielles. Les lignes correspondent aux meilleurs ajustements. Pour chaque ajustement, l'exposant β est donné.

2.4.1 Extraction du voisinage sémantique

Pour extraire le voisinage sémantique d'un morphème, nous utilisons une idée proposée par Gaume (Gaume et al., 2004 ; Gaume, 2005) reposant sur les *marches aléatoires*. Lors d'une marche aléatoire, on part de l'un de ses sommets du réseau et l'on se déplace vers l'un de ses voisins choisi aléatoirement, puis vers l'un des voisins de ce nouveau sommet, et ainsi de suite. Dans les réseaux ayant une petite longueur caractéristique, il est possible, en quelques sauts seulement, de passer d'un sommet du réseau à n'importe quel autre. Néanmoins, dans les réseaux ayant un fort coefficient de regroupement, c'est-à-dire dans les réseaux localement denses, il est possible de rester piégé longtemps dans la zone dense à laquelle appartient le nœud de départ. C'est cette dernière propriété qui rend attrayante l'idée d'utiliser les marches aléatoires pour extraire les voisinages sémantiques.

Le temps moyen de premier passage $T_{i,j}$ est le nombre moyen de sauts nécessaires pour atteindre le nœud n_j lors d'une marche aléatoire débutant du nœud n_i . Pour chacun des 10 réseaux, nous avons calculé ces temps moyens de premier passage pour chaque couple de nœuds (White & Smyth, 2003). La figure 5.6 présente les distributions de valeurs obtenues pour chacun des 10 réseaux. Ces distributions sont révélatrices de la structure des réseaux. Pour comparaison, nous avons construit des graphes ayant les mêmes nombres de sommets et de liens que le réseau construit à partir du corpus 8, selon les modèles de Barabási et Albert, Erdős et Renyi, et Watts et Strogatz avec $p = 0$ (c'est-à-dire un graphe régulier), $p = 0.01$ et $p = 0.1$. Aucun de ces modèles ne produit une distribution semblable à celle observée pour les réseaux morphémiques, indiquant qu'aucun d'entre eux n'est en mesure de modéliser correctement nos réseaux.

2.4 Analyse des évolutions sémantiques du chinois

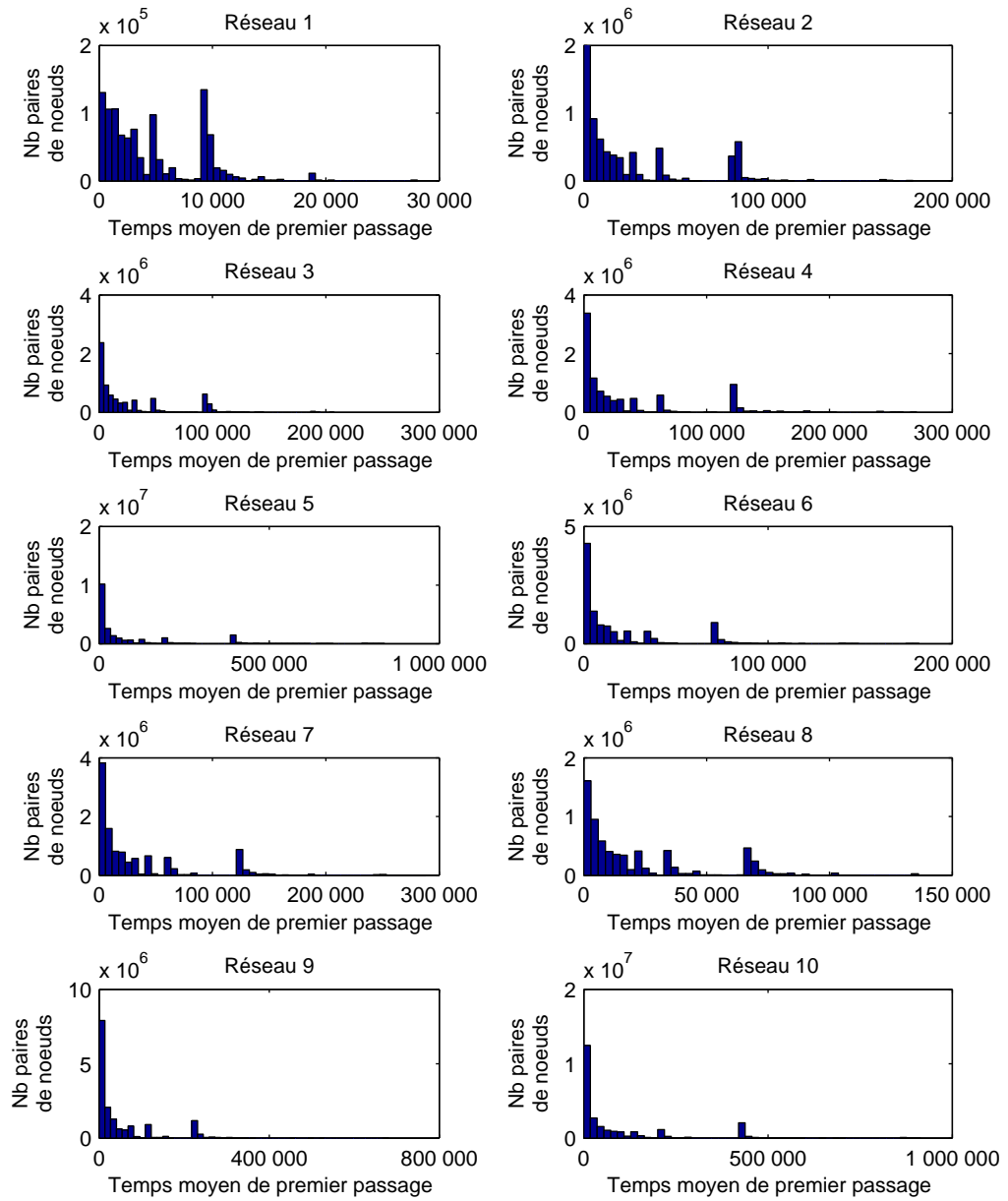


Figure 5.6 – Distributions des temps moyens de premier passage des 10 réseaux.

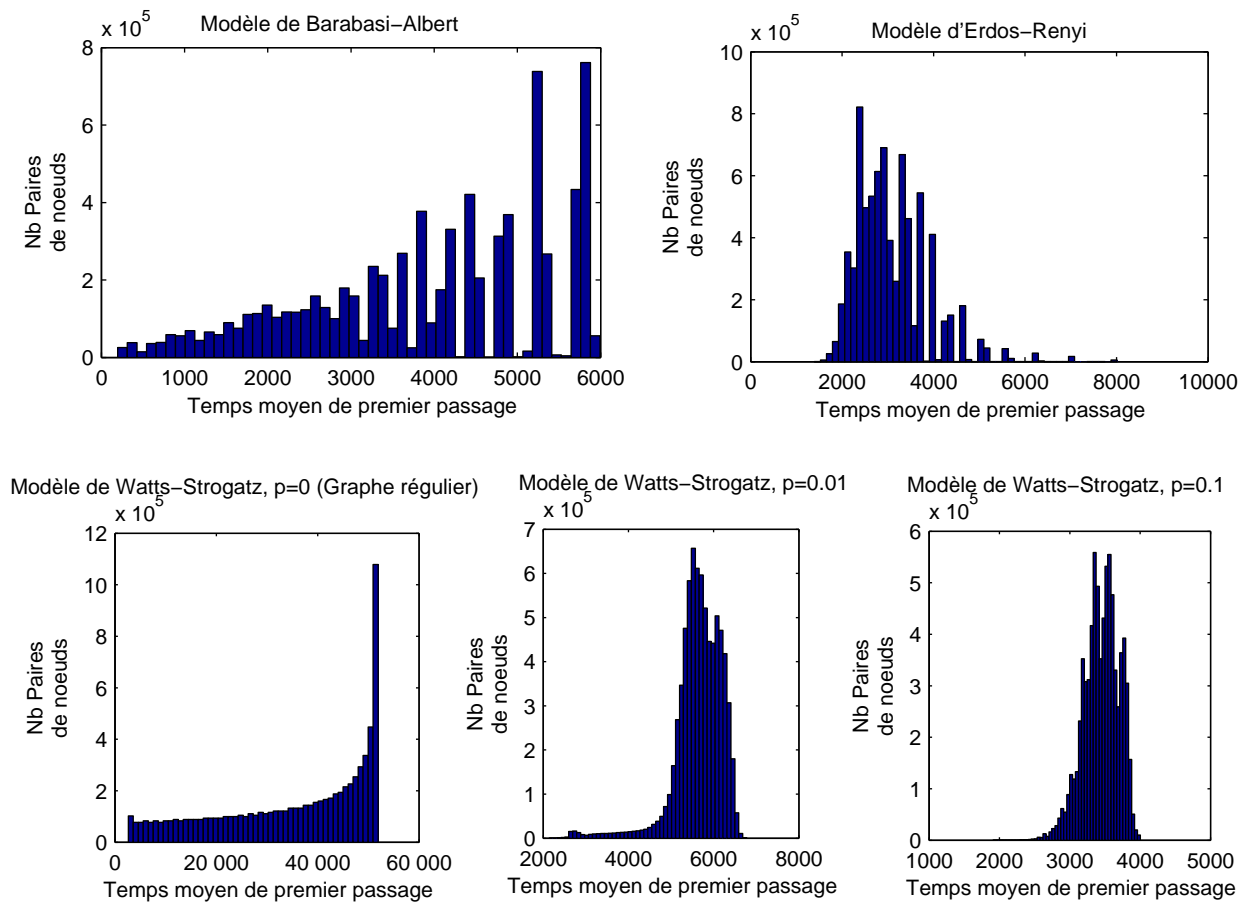


Figure 5.7 – Distributions des temps moyens de premier passage pour des graphes construits selon les modèles de Barabási et Albert, Erdős et Renyi, et Watts et Strogatz avec $p = 0$ (graphe régulier), $p = 0.01$ et $p = 0.1$. Tous ces graphes ont les mêmes nombres de sommets et de liens que le réseau construit à partir du corpus 8.

Afin de mieux comprendre les propriétés des marches aléatoires dans nos réseaux, nous avons choisi arbitrairement à titre d'exemple un nœud N dans un de nos réseaux et donné sur la figure 5.8 la distribution des $T_{N,i}$ (les temps moyens de premier passage aux nœuds du réseaux des marches aléatoires partant du nœud N) et la distribution des $T_{i,N}$ (les temps moyens de premier passage au nœud N des marches aléatoires partant de tous les nœuds du réseau).

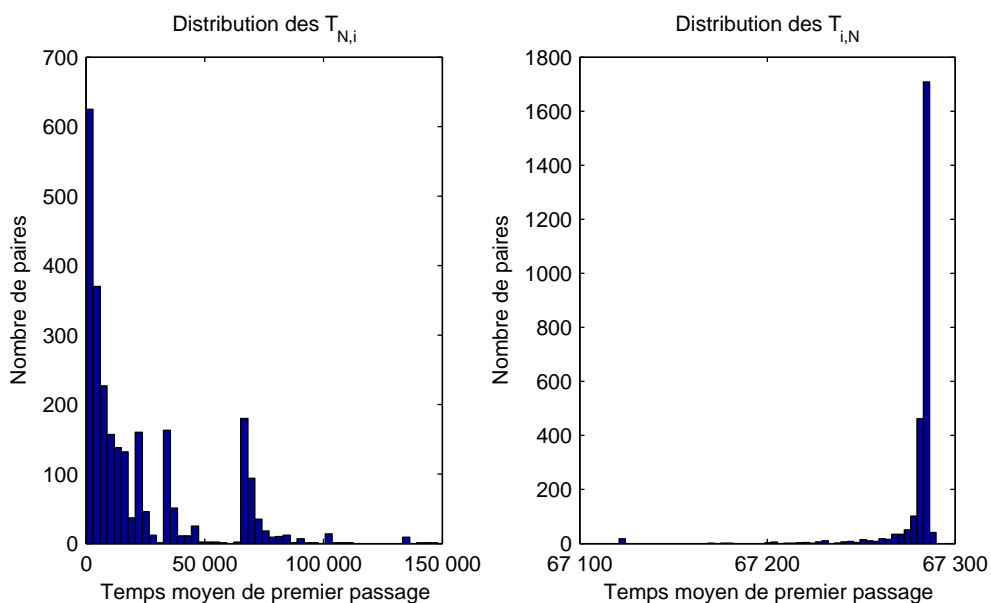


Figure 5.8 – Distributions des $T_{N,i}$ et des $T_{i,N}$ d'un nœud arbitrairement choisi dans l'un des réseaux.

Tous les nœuds de tous les réseaux ont des distributions des $T_{N,i}$ et des $T_{i,N}$ comparables à celles données sur la figure 5.8. Tandis que la distribution des $T_{N,i}$ est fortement similaire à celle observée lorsque toutes les paires de nœuds sont prises en considération, la distribution des $T_{i,N}$ diffère largement : elle est fortement centrée sur sa moyenne, indiquant que le temps moyen de premier passage en un nœud ne dépend pas de nœud d'origine de la marche aléatoire. Il est néanmoins possible d'observer sur la distribution des $T_{i,N}$ que le temps moyen de premier passage au

nœud N est sensiblement plus petit pour les marches aléatoires au départ de certains nœuds du réseaux. Nous définissons le voisinage sémantique d'un nœud à partir de cette dernière observation : appartiennent au voisinage sémantique d'un nœud N tous les nœuds k tels que :

$$T_{k,N} < \langle T_{i,N} \rangle - \sigma_{T_{i,N}} \quad (5.3)$$

où $\langle T_{i,N} \rangle$ est le temps moyen de premier passage au nœud N d'une marche aléatoire en provenance d'un nœud quelconque, et $\sigma_{T_{i,N}}$ l'écart type des temps moyens de premier passage au nœud N d'une marche aléatoire en provenance d'un nœud quelconque.

2.4.2 Détermination des sens

Méthode

Le procédé décrit ci-dessus permet d'obtenir le voisinage sémantique de chaque morphème M , c'est-à-dire un ensemble de morphèmes avec lesquels le morphème M partage des affinités sémantiques. Si M est polysémique, ces affinités sémantiques peuvent porter sur l'un ou l'autre de ses sens. Ainsi chacun des sens de M engendre un sous-ensemble de son voisinage sémantique. Déterminer les sens de M correspond donc à déterminer les sous-ensembles de son voisinage sémantique qu'ils engendrent.

Cette détermination est inspirée des travaux de Ploux & Victorri (1998). Ces auteurs ont utilisé le DES (le dictionnaire électronique de synonymes du CRISCO, déjà mentionné ; voir note 1 p. 99), afin de dresser des cartographies des espaces

sémantiques des unités lexicales référencées dans ce dictionnaire. Pour déterminer les différents sens d'une unité, Ploux & Victorri (1998) se sont basés sur l'idée que chaque sens peut être représenté non pas par un de ses synonymes, ceux-ci étant aussi polysémiques, mais par un ensemble de ses synonymes, ou plutôt par l'intersection de leur sens. La méthode qui en découle consiste à considérer le sous-graphe du DES constitué de l'unité lexicale dont on cherche à déterminer les sens et de ses voisins (ses synonymes), et à rechercher les *cliques* de ce graphe. Une clique est un sous-graphe maximal complet, c'est-à-dire un sous-graphe dont tous les sommets sont connectés et tel qu'il n'existe pas de sous-graphe comportant plus de sommets vérifiant cette propriété. En termes de synonymes, une clique est un ensemble d'unités lexicales toutes synonymes les unes des autres, tel qu'il n'existe pas d'autre unité dont elles soient toutes synonymes.

Notre approche de détermination des sens d'un morphème se rapproche de celle de Ploux & Victorri (1998) puisque, au lieu de considérer le sous-graphe engendré par un nœud et ses voisins, nous considérons le sous-graphe engendré par un nœud et son voisinage sémantique, et, au lieu de rechercher les cliques de ce sous-graphe, nous y recherchons les zones denses. Une des propriétés des réseaux complexes naturels, que nous avons déjà mentionnée à plusieurs reprises, est d'être globalement peu denses mais localement denses : ils sont constitués de zones fortement interconnectées, les rendant localement denses ; ces zones sont connectées entre elles par quelques liens seulement, rendant les réseaux globalement peu denses. Le voisinage sémantique d'un morphème étant composé d'autant d'ensembles de morphèmes que celui-ci a de sens, il est naturel de s'attendre à ce que le graphe engendré par le voisinage sémantique contienne autant de zones denses que de sens.

La littérature sur les méthodes de recherche de zones denses dans les réseaux

est foisonnante (voir Danon, Díaz-Guilera, Duch, & Arenas, sous presse pour une revue). Étant donné la quantité de réseaux à analyser (le voisinage sémantique de chaque nœud de chacun des 10 réseaux), notre choix, dicté par des soucis d'efficacité, s'est porté sur l'algorithme le plus rapide, proposé par Clauset, Newman, & Moore (2004).

Évaluation

Parmi les différentes lois que Zipf (1949) a énoncées, il en est une qui stipule que le nombre de sens n_s d'une unité lexicale est proportionnel à la racine carrée de sa fréquence f : $n_s = \alpha \cdot \sqrt{f}$. Cette loi empirique, établie à partir du nombre de sens donnés par un dictionnaire, nous permet de nous forger une idée sur la validité de la méthode de dénombrement des sens que nous proposons. La figure 5.9 donne pour chaque corpus le nombre de sens de ses morphèmes en fonction de leur fréquence, ainsi que les paramètres du meilleur ajustement des points par une courbe d'équation $n_s = \alpha \cdot \sqrt[\beta]{f}$. Pour le corpus 1, notre méthode sous-estime considérablement le nombre de sens prédits par la loi de Zipf. L'explication la plus vraisemblable est à chercher dans la taille du premier corpus, 10 à 100 fois plus petit que les neuf autres. Il est alors probable que les différents sens des morphèmes n'y apparaissent pas tous ou trop rarement pour être relevés par notre méthode. Pour les corpus 2 à 10, notre méthode semble surestimer le nombre de sens prédits par la loi de Zipf. Les meilleurs ajustements proposent en moyenne $\beta = 1.43(\pm 1.12)$ au lieu de la valeur $\beta = 2$ de la loi de Zipf (β n'est pas corrélé à la taille du corpus : $\rho = 0.49, p > 0.15$). Néanmoins, cette surestimation semble principalement toucher les morphèmes les plus fréquents. Pour les morphèmes moins fréquents, nos résultats apparaissent plus en accord avec la prédiction de la loi de Zipf. Une

autre loi découverte par Zipf (1949) – la plus connue – énonce que la fréquence des unités lexicales est inversement proportionnelle à leur rang, lorsqu’elles sont triées par fréquences décroissantes. Autrement dit, les unités lexicales peu fréquentes sont beaucoup plus nombreuses que les unités fréquentes. Puisque notre méthode de détermination du nombre de sens est plus précise pour les morphèmes peu fréquents que pour les morphèmes fréquents, elle est alors valide dans une grande majorité des cas.

2.4.3 Quantification des changements sémantiques

Taux de changements

La figure 5.10 présente pour chaque paire de corpus consécutifs le nombre de sens de chaque morphème dans le corpus le plus récent en fonction du nombre de sens dans le corpus le plus ancien. La ligne continue est la droite $y = x$: les points situés au-dessus représentent des morphèmes ayant gagné des sens et ceux situés au-dessous, des morphèmes en ayant perdu. Nous employons comme mesure de la similarité sémantique entre deux corpus le coefficient de corrélation entre les nombres de sens des morphèmes dans les deux corpus. La figure 5.11 donne cette similarité en fonction du nombre d’années séparant le début de l’époque correspondant au premier corpus et la fin de l’époque correspondant au second. À l’exception du point représentant la similarité entre les corpus 2 et 3, et dans une moindre mesure, de celui représentant la similarité entre les corpus 1 et 2, la similarité décroît de manière linéaire en fonction du temps. L’écart observé pour la similarité entre les corpus 1 et 2 peut s’expliquer, une fois de plus, par la petite taille du corpus 1 qui ne permet pas de capturer l’ensemble des sens des morphèmes. Quant à l’écart observé

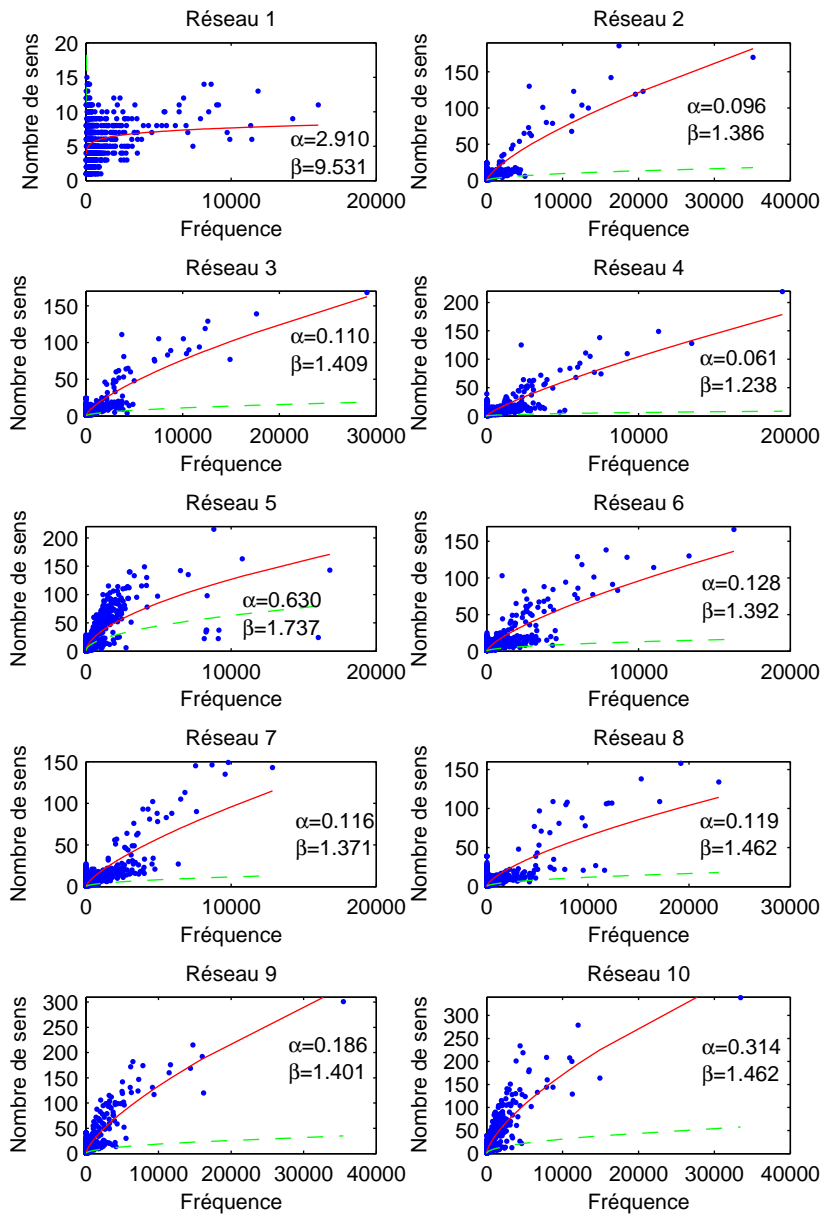


Figure 5.9 – Nombre de sens des morphèmes en fonction de leur fréquence (en nombre d’occurrences par million de caractères) sur une échelle logarithmique et pour chacun des corpus. La loi de Zipf (1949) sur le nombre de sens des unités lexicales stipule que le nombre de sens n_s d’une unité est proportionnelle à la racine carrée de sa fréquence f : $n_s = \alpha \cdot \sqrt{f}$. Le nuage de point de chaque réseau R_i a été ajusté avec une fonction d’équation $n_s = \alpha_i \cdot \beta_i \sqrt{f}$. Les valeurs α_i et β_i du meilleur ajustement sont indiquées pour chaque réseau. La courbe continue indique ce meilleur ajustement. La courbe en pointillés indique la prédiction de la loi de Zipf $n_s = \alpha_i \cdot \sqrt{f}$ (L’échelle du graphique correspondant réseau 1 ne permet pas de faire apparaître ce dernière courbe).

pour la similarité entre les corpus 2 et 3, une explication possible pourrait être qu'ils recouvrent à eux deux la période du chinois classique, et que celui-ci ait été relativement stable. Nos résultats indiquent que, d'une façon générale, les changements sémantiques interviennent à un taux constant.

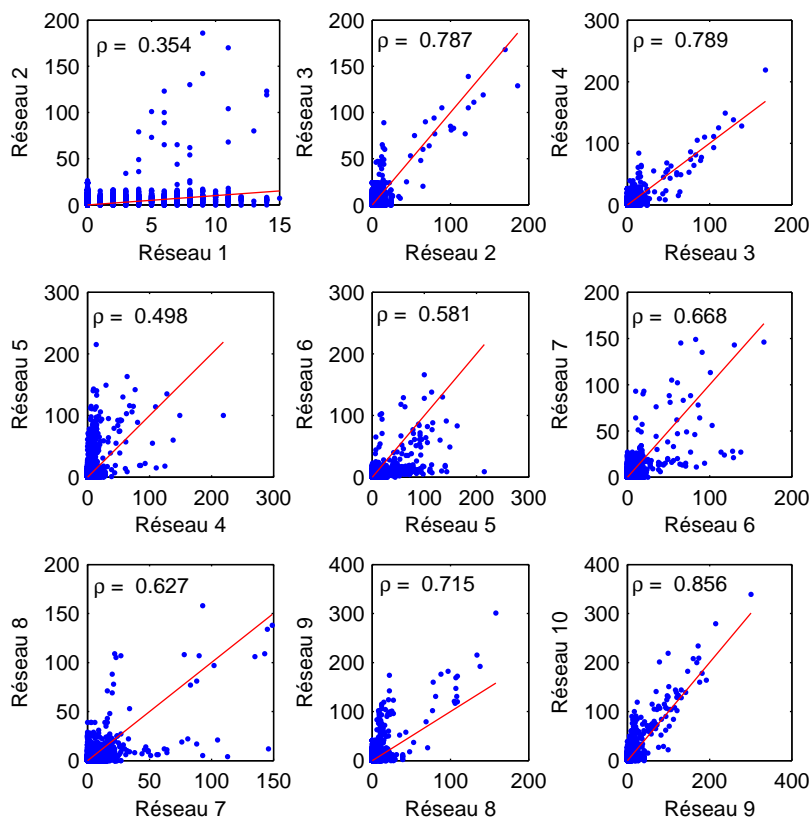


Figure 5.10 – Nombre de sens des morphèmes dans chaque paire de corpus consécutifs. La droite $y = x$ est indiquée par un ligne continue. Le coefficient de corrélation ρ donne un mesure de la similarité entre les corpus.

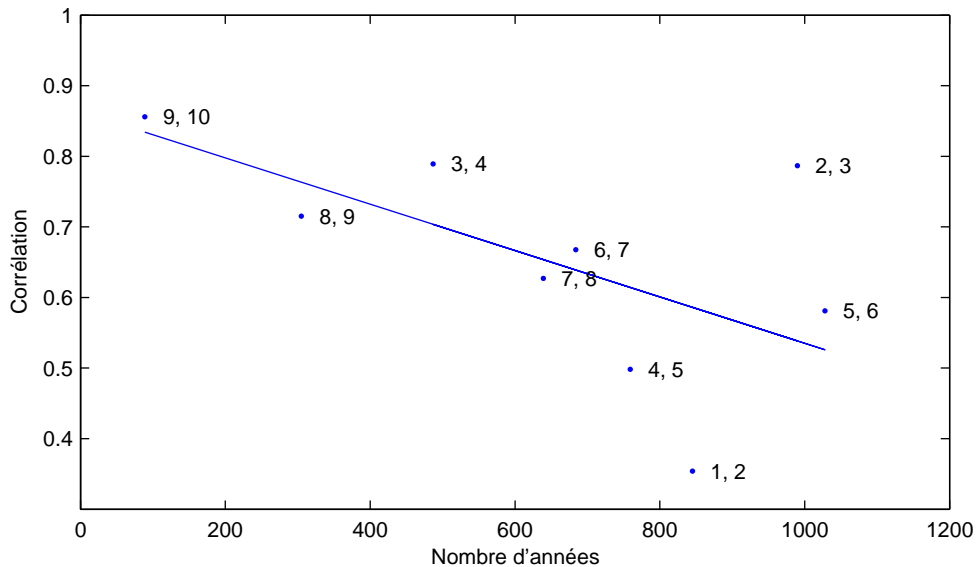


Figure 5.11 – Similarité sémantique des corpus en fonction de la durée de la période les séparant. La droite est le meilleur ajustement linéaire en excluant les points correspondant aux similarités entre les corpus 1 et 2 et entre les corpus 2 et 3.

Facteurs influençant les changements sémantiques

La probabilité qu'un morphème subisse un changement sémantique est influencée par plusieurs facteurs. Nous nous pencherons en particulier sur les relations entre la fréquence et le nombre de sens d'un morphème dans un corpus et son nombre de sens dans le corpus suivant.

Influence de la fréquence La figure 5.12 montre que les morphèmes les moins fréquents ont moins tendance à être l'objet d'un changement sémantique que les morphèmes les plus fréquents. De plus, en ne considérant que ces derniers, il ressort que les morphèmes gagnant des sens ont une fréquence inférieure à ceux en perdant.

La figure 5.13 montre une corrélation très significative entre la variation du

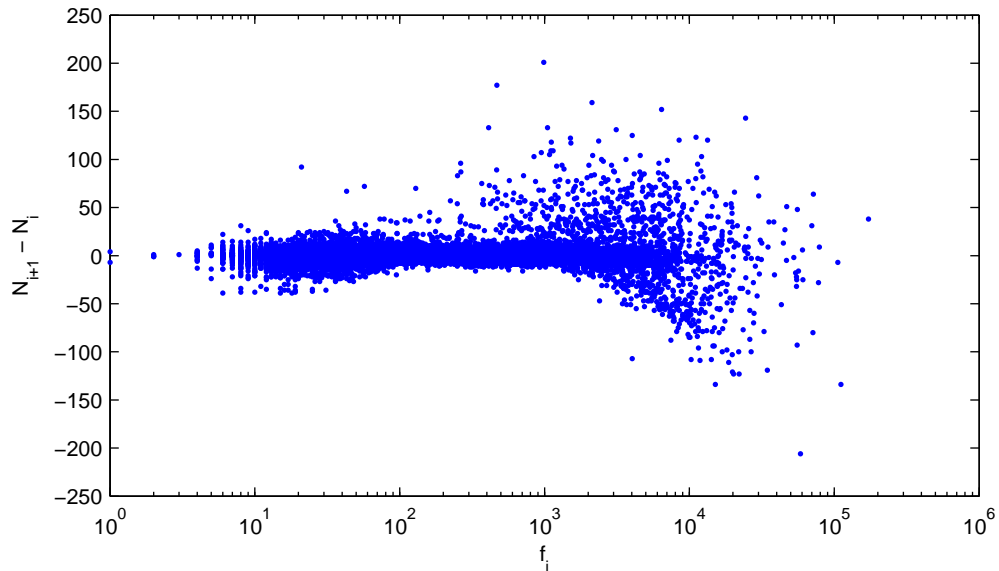


Figure 5.12 – Évolution du nombre de sens en fonction de la fréquence : différence entre le nombre de sens N_{i+1} d'un morphème dans le corpus $i + 1$ et son nombre de sens N_i dans le corpus i en fonction de sa fréquence f_i dans le corpus i .

nombre de sens et la variation de fréquence ($\rho = 0.51, p < 0.000001$). Les morphèmes devenant moins fréquents sont ceux ayant perdu des sens, tandis que ceux devenant plus fréquents sont ceux qui ont gagné des sens.

Influence de la polysémie Les résultats du paragraphe précédent, conjugués avec la dépendance existant entre le nombre de sens d'un morphème et sa fréquence (section 2.4.2), conduisent à penser que les morphèmes les moins polysémiques seront ceux les plus à mêmes de gagner des sens, tandis que les morphèmes plus polysémiques auront tendance à en perdre. Les résultats présentés sur la figure 5.14 sont conformes cette à prédiction.

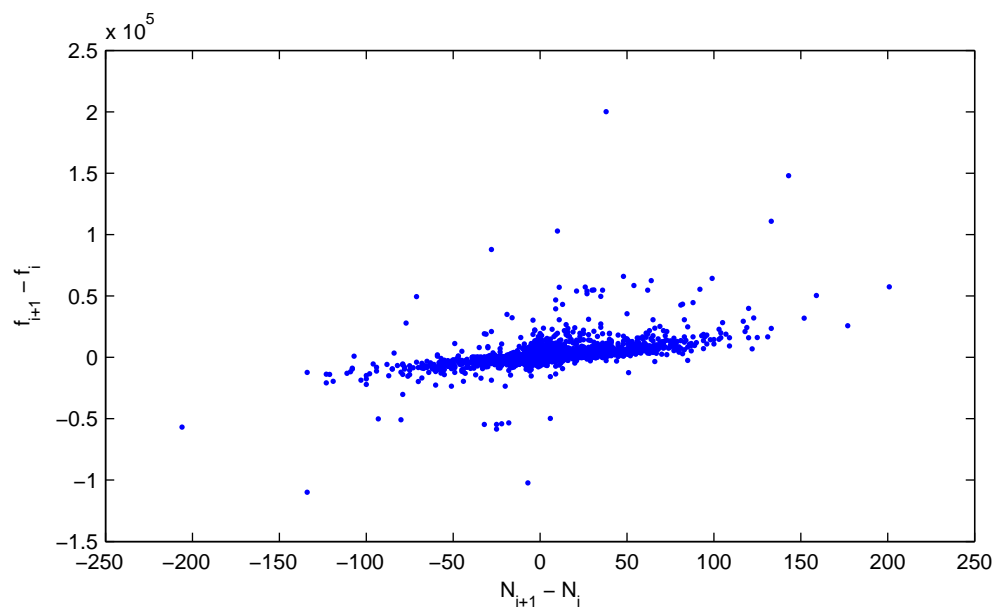


Figure 5.13 – Variation de la fréquence des morphèmes entre deux corpus consécutifs en fonction de la variation du nombre de leurs sens.

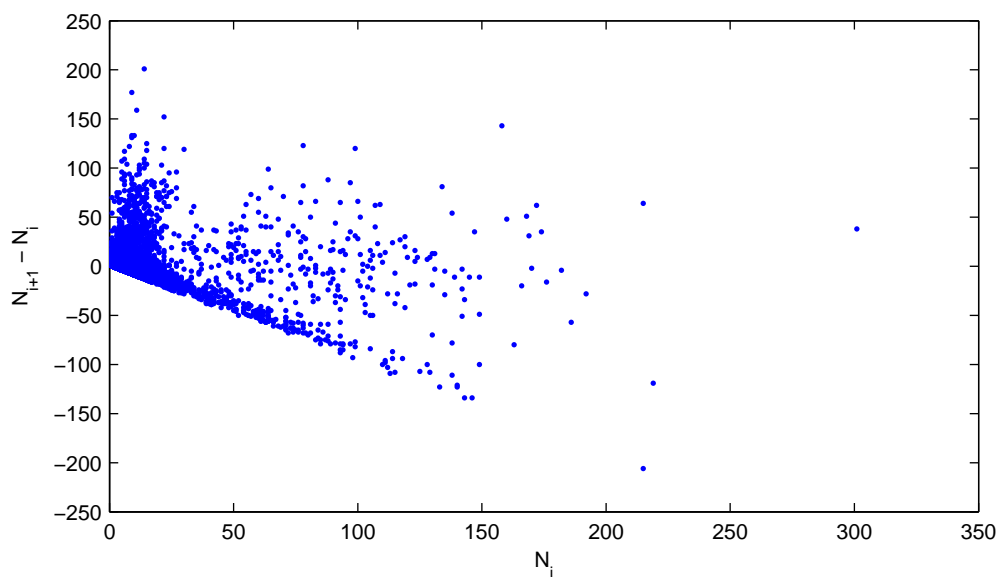


Figure 5.14 – Évolution du nombre de sens en fonction de la polysémie : différence entre le nombre de sens N_{i+1} d'un morphème dans le corpus $i + 1$ et son nombre de sens N_i dans le corpus i en fonction de son nombre de sens dans le corpus i .

2.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons exposé une méthode d'extraction automatique des sens des mots d'un corpus, et l'avons appliquée à 10 corpus de chinois couvrant ensemble une période de 3000 ans. Cela nous a permis de donner, à notre connaissance, les premières évaluations quantitatives d'un certain nombre d'aspects des changements sémantiques.

Notre méthode repose sur la construction d'un réseau lexical à partir des cooccurrences observées dans un corpus. Appliquée au chinois, les cooccurrences que nous considérons sont des cooccurrences de caractères, et notre analyse se situe donc à un niveau morphémique. Nous avons montré que ces réseaux sont des petits mondes sans échelle, confirmant ainsi de nombreux résultats présents dans la littérature. La convergence de ces résultats, et l'omniprésence de ce type de réseaux dans la nature, conduit à penser qu'il s'agit d'un mode de représentation des langues pertinent.

Nous avons utilisé un procédé de marches aléatoires, et en particulier les temps de premier passage, pour extraire le voisinage sémantique d'un morphème. Les distributions des temps de premier passage de nos réseaux présentent un profil particulier, qui distinguent ces derniers du modèle d'Erdős-Rényi, du modèle de Watts-Strogatz et du modèle de Barabási-Albert. Les raisons de ce profil spécifique, liées aux caractéristiques topologiques des réseaux, sont laissées à des recherches ultérieures.

Au sein du voisinage sémantique d'un morphème, nous avons assimilé chacune des zones denses à un des sens du morphème. Pour les morphème les moins fréquents (mais les plus nombreux) le nombre de sens n que nous déterminons ainsi

est de l'ordre de \sqrt{f} , où f est la fréquence. Ce résultat est en accord avec les observations de Zipf (1949). Pour les morphèmes les plus fréquents (et les moins nombreux), notre méthode semble surestimer le nombre de sens, celui-ci étant de l'ordre de ${}^{1.4}\sqrt{f}$. Ces évaluations ne sont pas valables pour le premier des 10 corpus que nous avons étudiés, vraisemblablement du fait de sa petite taille.

Étant en mesure de connaître le nombre de sens d'un morphème dans un corpus, nous avons pu établir une mesure de similarité entre deux corpus consécutifs, basée sur le changement du nombre de sens des morphèmes. À part pour les paires de corpus (1,2) et (2,3), il ressort que cette similarité dépend linéairement de la durée des périodes que couvrent les corpus : les changements sémantiques se produisent à un taux constant.

Néanmoins, tous les morphèmes n'ont pas la même probabilité d'être l'objet d'un changement sémantique. En observant les relations entre la fréquence ou le nombre de sens d'un morphème dans un corpus et son nombre de sens dans le corpus suivant, nous avons pu établir que plus un morphème est fréquent (et polysémique), plus il a tendance à être l'objet d'un changement sémantique. D'autre part les morphèmes gagnant de nouveaux sens ont une fréquence plus faible que ceux en perdant. Enfin un morphème gagnant des sens devient plus fréquent, et inversement. En gagnant de nouveaux sens, un morphème multiplie les contextes dans lesquels il peut intervenir, et de fait son nombre d'occurrences. Tous ces résultats n'avaient, à notre connaissance, jamais été vérifiés expérimentalement.

Ces résultats appellent néanmoins à être améliorés. Holmes (1994) insiste sur la nécessité d'appareiller les corpus en taille et en contenu lorsqu'ils doivent être comparés. Les 10 corpus que nous avons utilisés varient énormément en taille : de 1 à 100 en prenant en compte tous les corpus, et encore quasiment de 1 à 10 en excluant

le premier des corpus dont la taille s'est avérée trop petite. Cette variation est potentiellement source de biais lors de la construction des réseaux (leur degré moyen ainsi que leur longueur caractéristique sont corrélés avec la taille des corpus correspondant), bien que notre méthode semble ne pas y être sensible (l'exposant β de la relation $n = \alpha \cdot \sqrt[\ell]{f}$ entre le nombre de sens n et la fréquence f n'est pas corrélé à la taille du corpus). Une étude approfondie de l'impact de la valeur de significativité de la fréquence des cooccurrences retenue pour le filtrage des liens, permettrait probablement d'obtenir une meilleure idée de l'ampleur de ce biais, voire de l'éliminer. Nous ne disposons pas d'assez d'informations pour évaluer l'appariement en contenu des corpus.

En chinois classique et littéraire, les mots sont monomorphémiques, et le niveau morphémique auquel se situent nos réseaux correspond donc au niveau lexical. En chinois moderne, les mots sont composés de un, deux caractères, ou plus. Le niveau morphémique est donc sublexical. Il serait peut-être plus judicieux de ne travailler qu'au niveau lexical, et d'opérer un prétraitement à l'aide d'un dictionnaire sur les corpus les plus récents afin d'y regrouper les caractères en mot. Un autre prétraitement envisageable pour faire gagner notre méthode en précision serait d'éliminer les caractères représentant des morphèmes grammaticaux pour ne conserver que ceux ayant un contenu sémantique. Les mots grammaticaux étant aussi les plus fréquents (Weiss, Indurkha, & Damerau, 2004), il est possible que ce soit pour ces derniers que l'évaluation du nombre de sens est surestimée par rapport aux observations de Zipf (1949).

En dépit de ces améliorations possibles, l'approche basée sur la construction de réseaux que nous avons proposée dans ce chapitre apparaît puissante et efficace. Elle a permis de quantifier plusieurs aspects des changements sémantiques et ce, à notre

connaissance, pour la première fois.

Conclusions

L'APPRÉHENSION scientifique des changements sémantiques est un programme de recherche établi il y a plus d'un siècle et demi. Nombre de linguistes s'y sont attelés, et nous avons dégagé trois traditions auxquelles il est possible de rattacher les travaux ayant contribué à la compréhension des changements sémantiques. Les premières recherches, menées entre la fin du 19^e siècle et le milieu du 20^e ont participé à un travail de classification des différents types de changements sémantiques. Nous les avons, pour cette raison, regroupées sous le nom de tradition taxonomiste. Ces recherches ont fait ressortir deux mécanismes employés de manière privilégiée lors de ces changements, la métaphore et la métonymie. Behaviorisme, structuralisme et générativisme, trois courants scientifiques ayant marqué le 20^e siècle, ont pour leur part contribué à un déclin relatif des recherches sur les changements sémantiques durant le milieu de ce siècle. Un renouveau s'est opéré dans les années 1970, avec les études portant sur la recherche de parallélismes dans les changements observés ; parallélismes au sein

d'une même langue, en considérant des champs sémantiques entiers plutôt que des mots isolés, mais surtout parallélismes entre langues, en adoptant une perspective trans-linguistique. Les apports de cette tradition typologiste sont que les changements sémantiques obéissent à des régularités, et qu'il sont souvent emprunts de directionnalité. Ces deux premières traditions ont essentiellement adopté une attitude descriptive des changements sémantiques. L'avènement, dans les années 1980, de la linguistique cognitive marque un tournant vis-à-vis de cette attitude. En intégrant la faculté de langage dans l'ensemble de la cognition, la linguistique cognitive propose la vision d'une sémantique reposant directement sur notre système conceptuel et parvient à expliquer les changements sémantiques en termes d'opérations cognitives.

Face à ces (r)évolutions théoriques récentes dans les recherches sur les changements sémantiques, les procédés méthodologiques pour les identifier sont pourtant restés inchangés : observation des manifestations synchroniques des changements sémantiques, c'est-à-dire des patterns de polysémie (par exemple, Evans & Wilkins, 2000) et des groupes de cognats (par exemple, Sweetser, 1990, chapitre 2), et, le cas échéant, recherche (essentiellement manuelle) dans des corpus des développements sémantiques (par exemple, Geeraerts, 1997). L'objectif de cette thèse a été de montrer que d'autres approches sont envisageables (notamment en tirant partie des puissances de calcul sans cesse croissantes offertes par les ordinateurs). Nous avons en particulier présenté trois études, illustrant chacune une approche méthodologique permettant d'appréhender les changements sémantiques à une échelle de temps différente.

La sociolinguistique variationniste a montré que les changements linguistiques en cours de réalisation se reflètent dans la variabilité présente au sein d'une com-

munauté de locuteurs (Labov, 1963, 1966). En particulier, l'hypothèse du temps apparent stipule que les variations synchroniques entre locuteurs d'âges différents peuvent être interprétées comme autant d'états diachroniquement différents de leur langue. Si des études reposant sur cette hypothèse – ou même la confirmant – ont été menées sur divers aspects du langage (avant tout en phonologie), jamais, à notre connaissance, les changements sémantiques n'avaient été abordés sous cet angle. Nous avons avancé comme explication possible la difficulté à observer et quantifier la variabilité sémantique synchronique. Nous avons proposé une solution à ce problème en important des méthodes d'anthropologie quantitative permettant de représenter dans un espace multi-dimensionnel la structure d'un champ sémantique, à partir des jugements de similarité entre les termes du champ sémantique (Romney et al., 2000). En comparant de telles représentations – pour le champ sémantique de l'habitat – obtenues à partir de deux groupes de sujets de deux générations différentes, nous avons montré d'une part qu'il est possible d'observer la variabilité sémantique synchronique et, d'autre part, que les représentations des deux générations sont significativement différentes. Selon l'hypothèse du temps apparent, cette différence est la manifestation d'un changement sémantique en cours de réalisation. Néanmoins, l'hypothèse du temps apparent n'a jamais été validée dans le cadre des changements sémantiques, et il convient de considérer aussi l'hypothèse alternative selon laquelle la structure des champs sémantiques évolue de manière concomitante au vieillissement des locuteurs. Outre le fait qu'il paraisse difficile d'étayer cette hypothèse, nos travaux présentés au chapitre V fournissent un argument supplémentaire pour affirmer que ces résultats sont bien le reflet d'un changement sémantique en cours : les termes que nous avons employés pour mener notre étude ont été choisis, outre pour leur appartenance au champ sémantique de l'habitat, pour l'évolu-

tion récente de leur fréquence. Or, nous avons montré au chapitre V que les changements de fréquence sont hautement corrélés avec les changements sémantiques. Nous avons alors toutes les raisons de privilégier l'hypothèse du temps apparent et d'affirmer que nous avons, et ce, à notre connaissance, pour la première fois, observé de la sorte un changement sémantique en cours de réalisation. Cette étude appelle à être complétée par d'autres qui prendraient en compte des une palette plus étendue de facteurs socio-économique, et qui ainsi préciseraient les origines et la diffusion géographiques et sociales de ce changement. D'une manière plus générale, notre étude ouvre la voie à l'application du paradigme de la sociolinguistique variationniste aux changements sémantiques.

Si, par notre première étude, nous avons abordé les changements sémantiques à l'échelle de temps de la génération, la seconde nous a permis de considérer des changements se produisant sur plusieurs générations. Pour cela, nous nous sommes placé dans le paradigme de la linguistique évolutionnaire, qui applique les concepts et les méthodes de la vie artificielle à la linguistique, en modélisant des populations de locuteurs afin d'étudier la dynamique qui émerge de leurs interactions. En effectuant une revue des stratégies adoptées pour rendre compte de la sémantique par les différents modèles proposés dans le cadre de la linguistique évolutionnaire, nous avons fait ressortir deux faiblesses caractéristiques de la majorité de ces modèles. D'une part, une partie des modèles externalisent la sémantique, ce qui a pour conséquence de transformer la communication en un processus de transmission d'un signal *et* de son sens, rendant de fait superflu le premier (Smith, 2003a). D'autre part, une autre partie des modèles adoptent une vision classique de la catégorisation et sont incapables de rendre compte de l'effet de prototype. Le modèle que nous avons proposé est l'un des rares à éviter ces deux écueils. Nous avons appliqué notre modèle

à l'étude des changements sémantiques provoqués par ce qu'Ullmann (1951/1957, 1952/1965, 1962/1967) a appelé les *causes historiques*, c'est-à-dire par la conservation d'une unité lexicale en dépit de l'évolution de son référent – et par conséquent de son sens. Nous avons montré que la rapidité de l'évolution du référent module la probabilité de maintien de l'unité lexicale : plus l'évolution est lente, plus le maintien est probable ; inversement, plus elle est rapide et plus l'innovation lexicale devient alors probable. Nos résultats vont dans le sens de la critique que Blank (1999) a adressée à la classification des causes de changements sémantiques d'Ullmann, en argumentant que les *causes historiques* et le *besoin d'un nouveau nom* sont les deux pôles d'un même phénomène (Chapitre I, section 1.2.4). Enfin, dans notre modèle, la synonymie est stimulée par l'évolution des référents, nous conduisant à formuler l'hypothèse que la synonymie est le reflet linguistique de la dynamique de notre environnement, hypothèse à vérifier par des recherches futures.

Enfin, notre dernière étude porte sur des échelles de temps encore plus grandes, en considérant 3000 ans d'histoire du chinois écrit. Pour ce faire, nous avons construit et analysé des réseaux lexicaux. Il a été découvert récemment qu'une grande majorité de réseaux complexes naturels (réseaux sociaux, réseaux informatiques, réseaux biologiques, ...) partageaient, en dépit de leur origines variées, des propriétés non triviales. Ces réseaux sont des *petits mondes*, c'est-à-dire que bien que composés de peu de liens au regard de leur nombre de nœuds (ils sont peu denses), deux nœuds quelconques ne sont séparés que par très peu de liens, et les liens sont disposés de manière à rendre ces réseaux localement denses (Watts & Strogatz, 1998). Ces réseaux sont aussi *sans échelle*, c'est-à-dire qu'alors que la majorité des nœuds ont très peu de liens, quelques uns d'entre eux en ont beaucoup (Barabási & Albert, 1999). Nous avons notamment montré, à partir des cooccurrences de noms d'aires

cérébrales dans une revue d'imagerie cérébrale, que le réseau fonctionnel cérébral est un petit monde.

Les relations sémantiques entre les mots d'une langue permettent de la représenter (du moins ses aspects sémantiques) sous forme de réseaux. Plusieurs démarches peuvent être suivies pour la construction de ces réseaux, mais toutes conduisent à des réseaux petits mondes sans échelle. Notre étude s'est appuyée sur 10 réseaux construits à partir de 10 corpus de chinois d'époques différentes, recouvrant ensemble les trois derniers millénaires. Les nœuds de ces réseaux représentent les caractères présents dans ces corpus et, un lien entre deux nœuds, la présence significative de cooccurrences entre les deux caractères correspondants. Le système d'écriture chinois étant logographique, chaque caractère représentant un morphème de la langue, les réseaux que nous avons étudiés se situent donc à un niveau morphémique. Nous avons proposé une méthode pour extraire les différents sens d'un morphème dans un corpus à partir de la structure du réseau correspondant. Elle procède en deux étapes : extraction du voisinage sémantique du nœud correspondant grâce aux propriétés des marches aléatoires, puis détermination des zones denses, qui correspondent aux sens, de ce voisinage sémantique. Nous avons validé cette méthode en montrant que le nombre de sens extraits pour un morphème est relié à sa fréquence d'une manière similaire à celle déterminée par Zipf (1949). Connaissant ainsi le nombre de sens de chaque morphème dans chaque corpus, nous avons démontré d'une part que les changements sémantiques interviennent à taux constant et, d'autre part, que la fréquence et le nombre de sens sont deux facteurs influençant la probabilité d'un morphème d'être l'objet d'un changement sémantique : les morphèmes les plus fréquents sont les plus exposés à un changement sémantique, et les morphèmes gagnant des sens sont moins fréquents et moins polysémiques que ceux

qui en perdent. Par ailleurs, une augmentation de fréquence est hautement corrélée à un gain de sens, et inversement. C'est, à notre connaissance, la première fois que ces relations sont vérifiées expérimentalement. En sus des pistes que nous avons déjà mentionnées pour améliorer la méthode d'extraction de sens que nous avons proposée, la voie à la fois la plus naturelle et la plus pertinente pour conforter nos résultats, consisterait à étendre notre étude à d'autres langues.

L'ensemble des travaux de cette thèse ont été guidés par notre conviction que les frontières entre différents domaines scientifiques n'appellent qu'à être franchies, afin de transposer des uns aux autres des concepts et des méthodes ayant montré leur pertinence et leur efficacité. Cette conviction s'est traduite par l'application à l'étude des changements sémantiques de paradigmes variés et stimule aussi l'avenir que nous pouvons imaginer à ces travaux. Aussi, des mariages fructueux sont à attendre entre les différentes méthodes que nous avons proposées : si nous avons utilisé des réseaux lexicaux pour observer des changements sémantiques sur de grandes échelles de temps, il est tout à fait envisageable d'utiliser des corpus de productions contemporaines, comme par exemple des forums de discussion sur internet, pour observer des changements sémantiques en cours. Les résultats ainsi obtenus pourraient être confrontés à ceux d'études relevant de la sociolinguistique variationniste telles que celle que nous avons menée. L'étude de changements en cours, et notamment de leur diffusion, pourrait aussi être appréhendée par des modèles multi-agents tels que celui que nous avons proposé, en particulier en dotant les populations de structures sociales de type petit monde sans échelle.

Si les créations ne sont pas un acquis, ce n'est pas seulement que, comme toutes choses, elles passent, c'est aussi qu'elles ont presque toute leur vie devant elles. (Maurice Merleau-Ponty)

Bibliographie

- Adamic, L. A. (1999). The small world web. In *Proceedings of the third european conference on research and advanced technology for digital libraries* (pp. 443–452). Springer-Verlag.
- Albert, R., & Barabasi, A. L. (2000). Topology of evolving networks : local events and universality. *Phys Rev Lett*, 85, 5234–5237.
- Albert, R., & Barabási, A.-L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *reviews of modern physics*, 74, 47–97.
- Albert, R., Barabasi, A.-L., & Jeong, H. (1999). Diameter of the world wide web. *Nature*, 401.
- Amaral, L. A. N., Scala, A., Barthélémy, M., & Stanley, H. E. (2000). Classes of small-world networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(21), 11149–11152.
- Barabási, A.-L., & Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286, 509–512.
- Barabási, A.-L., Jeong, H., Néda, Z., Ravasz, R., Schubert, A., & Vicsek, T. (2002). Evolution of the social network of scientific collaborations. *Physica A*, 311, 590-614.

- Barabási, A.-L., & Oltvai, Z. N. (2004). Network biology : understanding the cell's functional organization. *Nat Rev Genet*, 5, 101–113.
- Barsalou, L. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, 22, 577-660.
- Barsalou, L., Solomon, K., & Wu, L. (1999). Perceptual simulation in conceptual tasks. *Current Issues in Linguistic Theory*, 152, 209–228.
- Bartsch, R. (2002). Metaphor and metonymy in comparison and contrast. In R. Dirven & R. Poerings (Eds.), (pp. 49–75). MOUTON DE GRUYTER.
- Batali, J. (2002). Linguistic evolution through language acquisition : Formal and computational models. In T. Briscoe (Ed.), (chap. The negotiation and acquisition of recursive grammars as a result of competition among exemplars). Cambridge : Cambridge University Press.
- Belpaeme, T. (2001). Simulating the formation of color categories. In B. Nebel (Ed.), *Proceedings of the international joint conference on artificial intelligence 2001 (ijcai'01), seattle, wa* (p. 393-398). San Francisco : Morgan Kauffman.
- Belpaeme, T. (2002). *Factors influencing the origins of colour categories*. Thèse de doctorat, Artificial Intelligence Lab, Vrije Universiteit Brussel.
- Berlin, B., Breedlove, D. E., & Raven, P. (1966). Folk taxonomies and biological classification. *Science*, 154, 273–275.
- Berlin, B., Breedlove, D. E., & Raven, P. (1973). General principles of classification and nomenclature in folk biology. *American Anthropologist*, 75, 214–242.
- Berlin, B., Breedlove, D. E., & Raven, P. (1974). *Principles of tzeltal plant classification*. New-York : Academic.
- Blank, A. (1999). Why do new meanings occur ? a cognitive typology of the moti-

- vations for lexical semantic change. In A. Blank & P. Koch (Eds.), *Historical semantics and cognition* (p. 61-89). Berlin : Mouton de Gruyter.
- Blank, A. (2001). Words and concepts in time : Towards diachronic cognitive onomasiology. In R. Eckardt, K. v. Heusinger, & C. Schwarze (Eds.), *Words in time diachronic semantics from different points of view*. Berlin ; New York : Mouton de Gruyter.
- Bollobás, B., & Riordan, O. (2004). The diameter of a scale-free random graph. *Combinatorica*, 24, 5-34.
- Boroditsky, L. (2000). Metaphoric structuring : Understanding time through spatial metaphors. *Cognition*, 75(1), 1-28.
- Boroditsky, L. (2001). Does language shape thought ? english and mandarin speakers' conceptions of time. *Cognitive Psychology*, 43(1), 1–22.
- Boroditsky, L., & Ramscar, M. (2002). The roles of body and mind in abstract thought. *Psychological Science*, 13, 185–189.
- Bowden, D., & Dubach, M. (2003). Neuronames 2002. *Neuroinformatics*, 1(1), 43–59.
- Bowden, D. M., & Martin, R. F. (1995, Mar). NeuroNames Brain Hierarchy. *Neuroimage*, 2(1), 63-83.
- Bréal, M. (1924). *Essai de sémantique (science des significations)* (7 ed.). Paris : Hachette. (Original work published 1897)
- Bréal, M. (1995). In P. Desmet & P. Swiggers (Eds.), (chap. Les lois intellectuelles du langage. Fragments de sémantique). Peeters. (Reprinted from *Annuaire de l'Association pour l'encouragement des études grecs en France*, 1883)
- Brighton, H. (2002). Compositional syntax from cultural transmission. *Artificial Life*, 8(1), 25–54.

- Broder, A., Kumar, R., Maghoul, F., Raghavan, P., Rajagopalan, S., Stata, R., et al. (2000). Graph structure in the web. *Computer Networks*, 33(1–6), 309–320.
- Bruner, J., Goodnow, J., & G., A. (1956). *A study of thinking*. New York : John Wiley.
- Buck, C. D. (1949). *A dictionary of selected synonyms in the principal indo-european languages*. Chicago : The University of Chicago Press.
- Chomsky, N. (1957). *Syntactic structures*. The Hague : Mouton.
- Chung, F., & Lu, L. (2001). The diameter of random sparse graphs. *Advances in Applied Math*, 26(4), 257–279.
- Clark, H. (1973). Cognitive development and the acquisition of language. In T. E. Moore (Ed.), (chap. Space, time semantics, and the child). New York : Academic Press.
- Clauset, A., Newman, M. E. J., & Moore, C. (2004, August). Finding community structure in very large networks. *Physical Review E*, 70.
- Clausner, T. C., & Croft, W. (1999). Domains and image schemas. *Cognitive Linguistics*, 10(1), 1–31.
- Cornips, L., & Corrigan, K. P. (Eds.). (2005). *Syntax and variation : Reconciling the biological and the social*. John Benjamins.
- Dahl, . (1995). When the future comes from behind : Malagasy and other time concepts and some consequences for communication. *International Journal of Intercultural Relations*, 19, 197–209.
- Damasio, A. (1994). *Descartes' error : Emotion, reason, and the human brain*. New York : Grosset.
- Danon, L., Díaz-Guilera, A., Duch, J., & Arenas, A. (sous presse). Comparing community structure identification. *Journal of Statistical Mechanics : Theory*

and Experiment.

- Darmesteter, A. (1887). *La vie des mots étudiée dans leurs significations*. Paris.
- De Jong, E. (1998). The development of a lexicon based on behavior. In H. La Poutré & J. van den Herik (Eds.), *Proceedings of the tenth netherlands/belgium conference on artificial intelligence naic'98* (pp. 27–36). Amsterdam : CWI.
- De Jong, E. (2000). *Autonomous formation of concepts and communication*. Thèse de doctorat, Artificial Intelligence Lab, Vrije Universiteit Brussel.
- Dryden, I., & Mardia, K. (1998). *Statistical shape analysis*. Chichester : John Wiley.
- Duanmu, S. (1999). Stress and the development of dysyllabic words in chinese. *Diachronica*, 16(1), 1–35.
- Dubois, D., & Prade, H. (1978). Operations on fuzzy numbers. *International Journal of Systems Science*, 9, 613-626.
- Edelman, G. (1992). *Bright air, brilliant fire : On the matter of the mind*. New York : : Basic Books.
- Eguíluz, V. M., Chialvo, D. R., Cecchi, G. A., Baliki, M., & Apkarian, A. V. (2005, Jan). Scale-free brain functional networks. *Phys Rev Lett*, 94(1), 018102.
- Erdős, P., & Rényi, A. (1959). On random graphs. *Publicationes Mathematicae Debrecen*, 6, 290–297.
- Erdős, P., & Rényi, A. (1960). On the evolution of random graphs. *Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences*, 5, 17–61.
- Euler, L. (1736). Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis. *Commetarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae*, 8, 128–140.
- Evans, N., & Wilkins, D. (2000). In the mond's ear : The semantics extensions of the perception verbs in australian languages. *Language*, 76(3), 546–592.

- Faloutsos, M., Faloutsos, P., & Faloutsos, C. (1999). On power-law relationships of the internet topology. In *SIGCOMM* (p. 251-262).
- Fellbaum, C. (Ed.). (1998). *Wordnet : An electronic lexical database*. Cambridge : MIT Press.
- Felleman, D., & Van Essen, D. (1991). Distributed hierarchical processing in primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 1, 1–47.
- Ferrer i Cancho, R., Solé, R. V., & Köhler, R. (2004). Patterns in syntactic dependency networks. *Physical Review E*, 69.
- Ferrer i Cancho, R., & Sole, R. V. (2001). (2001) the small world of human language. *Proceedings of The Royal Society of London*, 268(1482), 2261–2265.
- Fillmore, C. J. (1982). Frame semantics. In *Linguistics in the morning calm* (p. 111-137). Seoul : Hanshin Publishing Company.
- Fodor, J. (1975). *The language of thought*. New York : Thomas Y. Crowell.
- Fontoura Costa, L. da. (2004). What's in a name ? *International Journal of Modern Physics C*, 15(1), 371-379.
- Friston, K. J. (1994). Functional and effective connectivity in neuroimaging : A synthesis. *Human Brain Mapping*, 2(1 and 2), 56–78.
- Gardner, H. (1993). *Histoire de la révolution cognitive. la nouvelle science de l'esprit*. Paris : Payot. (Original work published 1985)
- Gaume, B. (2005). Balades aléatoires dans les petits mondes lexicaux. *Information – Interaction – Intelligence*, 4(2).
- Gaume, B., Hathout, N., & Muller, P. (2004). Word sense disambiguation using a dictionary for sense similarity measure. In *Coling 2004* (p. 1194-1200). Genève : Association for Computational Linguistics.
- Geeraerts, D. (1991). Grammaire cognitive et sémantique lexicale. *Communica-*

- tions, 53, 17–50.
- Geeraerts, D. (1997). *Diachronic prototype semantics – a contribution to historical lexicology*. Clarendon Press.
- Gentner, D., Imai, M., & Boroditsky, L. (2002). As time goes by : Evidence for two systems in processing space-time metaphors. *Language and Cognitive Processes*, 17(5), 537–565.
- Glenberg, A., & Kaschak, M. (2002). Grounding language in action. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(3), 558–565.
- Gombocz. (1926). *Jelentéstan*. Pécs.
- Gordon, T. (1982). *A history of semantics* (Vol. 30). Amsterdam : John Benjamins Publishing Compagny.
- Grady, J. (1997). Theories are buildings revisited. *Cognitive Linguistics*, 8, 269–290.
- Gärdenfors, P. (2000). *Conceptual spaces : The geometry of thought*. The MIT Press.
- Grice, P. (1975). Speech acts, syntax and semantics iii. In P. Cole & J. Morgan (Eds.), (pp. 41–58). New York : Academic Press.
- Guillaume, J.-L., & Latapy, M. (2004). Bipartite graphs as models of complex networks. *Information Processing Letters*, 90(5), 215–221.
- Gulli, A., & Signorini, A. (2005). The indexable web is more than 11.5 billion pages. In *Www 2005*.
- Györi, G. (2002). Semantic changes and cognition. *Cognitive Linguistics*, 13(2), 123–166.
- Haser, V. (2003). Metaphor and metonymy at the crossroads – a cognitive perspective. In A. Barcelona (Ed.), (pp. 171–194). Berlin : Mouton de Gruyter.

- Haspelmath, M. (2004). Up and down the cline – the nature of grammaticalization. In O. Fischer, M. Norde, & H. Perridon (Eds.), (Vol. 59, pp. 19–44). Amsterdam : John Benjamins Publishing Compagny.
- Hauk, O., Johnsrude, I., & Pulvermuller, F. (2004). Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex. *Neuron*, 41(2), 301–307.
- Hjelmslev, L. (1968). *Prolégomènes à une théorie du langage*. Paris : Les éditions de minuit. (Original work published 1943)
- Holmes, J. (1994). Inferring language change from computer corpora : Some methodological problems. *ICAME*, 18, 27-40.
- Hurford, J. (2000). The evolutionary emergence of language : Social function and the origins of linguistic form. In J. R. H. Chris Knight & M. Studdert-Kennedy (Eds.), (p. 324-352). Cambridge : Cambridge University Press.
- Jeong, H., Neda, Z., & Barabasi, A. (2003). Measuring preferential attachment for evolving networks. *Europhysics Letter* 61, 61, 567–572.
- Jeong, H., Tombor, B., Albert, R., Oltvai, Z. N., & Barabási, A. L. (2000). The large-scale organization of metabolic networks. *Nature*, 407, 651–654.
- Johansson, C., & Lansner, A. (2004). Towards cortex sized attractor ann. *Lecture Notes in Computer Science*, 3141.
- Johnson, M. (1987). *The body in the mind : The bodily basis of meaning, imagination, and reason*. Chicago : University of Chicago Press.
- Kan, I. P., Barsalou, L. W., Solomon, K. O., Minor, J. K., & Thompson-Schill, S. L. (2003). Role of mental imagery in a property verification task : fmri evidence for perceptual semantic representations. *Cognitive Neuropsychology*, 20, 525–540.
- Kaplan, F. (2000). *L'émergence d'un lexique dans une population d'agents auto-*

- nomes*. Thèse de doctorat, Université Paris VI. (chapitre 5)
- Kaufmann, A., & Gupta, M. (1985). *Introduction to fuzzy arithmetic : Theory and applications*. New York : Van Nostrand Reinhold.
- King, R., Nadasdi, T., & Butler, G. R. (2004). First-person plural in prince edward island acadian french : The fate of the vernacular variant je. . .ons. *Language Variation and Change*, 16(3), 237-255.
- Kirby, S. (2000). The evolutionary emergence of language : Social function and the origins of linguistic form. In C. Knight, M. Studdert-Kennedy, & J. Hurford (Eds.), (chap. Syntax without Natural Selection : How compositionality emerges from vocabulary in a population of learners). Cambridge : Cambridge University Press.
- Kirby, S. (2002a). Linguistic evolution through language acquisition : Formal and computational models. In (pp. Briscoe, Edward). Cambridge : Cambridge University Press.
- Kirby, S. (2002b). Natural language from artificial life. *Artificial Life*, 8(2), 185–215.
- Klatzky, R. L., Pellegrino, J. W., McCloskey, B. P., & Doherty, S. (1989). Can you squeeze a tomato ? the role of motor representations in semantic sensibility judgments. *Journal of Memory and Language*, 28, 56–77.
- Kleiber, G. (1990). *La sémantique du prototype : Catégorie et sens lexical*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Klein, H. E. M. (1987). The future precedes the past : time in toba. *Word*, 38, 173–185.
- Koch, P. (2004). Metonymy between pragmatics, reference and diachrony. *Metaphorik.de*, 7.

- Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information : evidence from studies of image scanning. , 4, 47-60. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 4, 47–60.
- Krapivsky, P. L., Redner, S., & Leyvraz, F. (2000, November). Connectivity of growing random networks. *Phys Rev Lett*, 85(21), 4629–4632.
- Kumar, R., Raghavan, P., Rajalopagan, S., & Tomkins, A. (1999). In *Proceedings of the 9th acm symposium on principles of database systems*.
- Kurath, H. (Ed.). (1939-1943). *Linguistic atlas of new england*. Providence : Brown University.
- Labov, W. (1963). The social motivation of a sound change. *Word*, 19, 273–309.
- Labov, W. (1966). *The social stratification of English in New York City*. Washington, DC : Center for Applied Linguistics.
- Labov, W. (1972). *Sociolinguistics patterns*. Philadelphia : University of Pennsylvania Press.
- Labov, W. (1973). The boundaries of words and their meanings. In C. J. Bailey & R. Shy (Eds.), *New ways of analysing variation in english* (p. 340-373). Washington, D.C.
- Labov, W. (1994). *Principles of linguistic change – internal factors*. Oxford : Blackwell.
- Lakoff, G. (1987). *Women, fire, and dangerous things : What categories reveal about the mind*. University of Chicago Press.
- Lakoff, G. (1993). Metaphor and thought. In A. Ortony (Ed.), (pp. 202–251). Cambridge : Cambridge University Press.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago : University of

Chicago Press.

Lakoff, G., & Johnson, M. (1999). *Philosophy in the flesh : The embodied mind and its challenge to western thought*. New York : Basic Books.

Lakoff, G., & Núñez, R. E. (2000). *Where mathematics comes from : How the embodied mind brings mathematics into being*. New York : Basic Books.

Lakoff, G., & Turner, M. (1989). *More than cool reason : A field guide to poetic metaphor*. Chicago : The University of Chicago Press.

Langacker, R. W. (1987). *Foundations of cognitive grammar. vol 1 : Theoretical prerequisites*. Stanford : Stanford University Press.

Langacker, R. W. (1993). Reference-point constructions. *Cognitive Linguistics*, 4(1), 1–38.

Lehmann, W. P. (1992). *Historical linguistics : an introduction* (3rd ed.). London : Routledge. (Chap. 13 uniquement : semantic change and changes in the lexicon)

Magué, J.-P. (2005). Evolutionary epistemology, language and culture : A non-adaptationist, systems theoretical approach. In N. a. v. B. J. P. Gontier & D. Aerts (Eds.), (Vol. 39, pp. 169–194). Springer.

Manning, C., & Schütze, H. (1999). *Foundations of statistical natural language processing*. Cambridge : MIT Press.

Marconi, D. (1997). *La philosophie du langage au xxème siècle*. Paris : l'éclat.

Mareš, M. (1994). *Computation over fuzzy quantities*. Boca Raton : CRC Press.

McMahon, A. M. S. (1994). *Understanding language change* (C. U. Press, Ed.). Cambridge.

Meillet, A. (1905). Comment les mots changent de sens ? *Année Sociologique*.

Merleau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Paris : Gallimard.

- Milgram, S. (1967). The small world problem. *Psychology Today*, 67(1).
- Miller, G. A. (1995). Wordnet : a lexical database for english. *Communications of the ACM*, 38(11), 39–41.
- Milroy, L., & Gordon, M. (2003). *Sociolinguistics : Method and interpretation*. Oxford : BLACKWELL PUBLISHERS.
- Miracle, A. W. J., & Dios Yapita Moya, J. d. (1981). .the aymara language and its social and cultural context. In M. J. Hardman (Ed.), (pp. 33–56). Gainesville : University Presses of Florida.
- Montague, R. (1970). English as a formal language. 188–221.
- Moore, C. C., Romney, A. K., & Hsia, T. L. (2000, Apr). Shared cognitive representations of perceptual and semantic structures of basic colors in Chinese and English. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(9), 5007–5010.
- Motter, A. E., Moura, A. P. S. de, Lai, Y.-C., & Dasgupta, P. (2002). Topology of the conceptual network of language. *Physical Review E*, 65.
- Nelson, D. L., McEvoy, C. L., & Schreiber, T. A. (1999). *The university of south florida word association, rhyme, and word fragment norms*. (<http://www.usf.edu/FreeAssociation/>)
- Nerlich, B. (1992). *Semantics theories in europe 1830–1930. from etymology to contextuality*. (Vol. 59). Amsterdam : John Benjamins Publishing Compagny.
- Newell, A., & Simon, H. (1972). *Human problem solving*. Engelwodd Cliffs : Prentice-Hall.
- Newman, M. E. J. (2001a). Clustering and preferential attachment in growing networks. *Physical Review E*, 64.
- Newman, M. E. J. (2001b). The structure of scientific collaboration networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(2), 404–409.

- Newman, M. E. J. (à paraître). Power laws, pareto distributions and zipf's law. *Contemporary Physics*.
- Newman, M. E. J., Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (2002). Random graph models of social networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 2566–2572.
- Núñez, R., & Sweetser, E. (à paraître). Aymara, where the future is behind you : Convergent evidence from language and gesture in the cross-linguistic comparison of spatial construals of time. *Cognitive Science*.
- Norman, J. (1988). *Chinese*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Oliphant, M., & Batali, J. (1997). Learning and the emergence of coordinated communication. *The newsletter of the Center for Research in Language*, 11(1).
- Parisi, D. (1997). An artificial life approach to language. *Brain and Language*, 59(1), 121-146.
- Pastor-Satorras, R., Vazquez, A., & Vespignani, A. (2001). Dynamical and correlation properties of the internet. *Physical Review Letters*, 87(25).
- Ploux, S., & Victorri, B. (1998). Construction d'espaces sémantiques à l'aide de dictionnaires informatisés des synonymes. *Traitement Automatique des Langues*, 39(1), 161–182. (<http://dico.isc.cnrs.fr>)
- Ponson du Terrail, P. (1859). *Rocamboles t. 4*.
- Pulvermuller, F., Harle, M., & Hummel, F. (2001). Walking or talking ? behavioral and neurophysiological correlates of action verb processing. *Brain and Language*, 78(2), 143–168.
- Pulvermuller, F., Hauk, O., Nikulin, V., & Ilmoniemi, R. (2005). Functional links between motor and language systems. *21(3)*, 793–797.
- Putnam, H. (1973). Philosophy and our mental life. In *Foerster symposium on*

computer and the mind.

- Radden, G. (2004). Übersetzen, interkulturelle kommunikation, spracherwerb und sprachvermittlung – das leben mit mehreren sprachen : Festschrift für juliane house zum 60. geburtstag. In N. Baumarten, C. Böttger, M. Motz, & J. Probst (Eds.), (p. 225-238). Bochum : AKS-Verlag.
- Radden, G., & Kövecses, Z. (1999). Metonymy in language and thought. In K.-U. Panther & G. Radden (Eds.), (p. 17-60). Amsterdam and Philadelphia : Benjamins.
- Rao, C. R., & Suryawanshi, S. (1996, Oct). Statistical analysis of shape of objects based on landmark data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(22), 12132–12136.
- Reisig, C. K. (1839). *Vorlesungen über lateinische sprachwissenschaft*. Berlin : Calvary.
- Rey, A. (Ed.). (1992). *Dictionnaire historique de la langue française*. Dictionnaires Le Robert.
- Roget, P. (1911). *Roget's thesaurus of english words and phrases*.
- Romney, A. K., Boyd, J. P., Moore, C. C., Batchelder, W. H., & Brazill, T. J. (1996). Culture as shared cognitive representations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(10), 4699-4705.
- Romney, A. K., Moore, C. C., Batchelder, W. H., & Hsia, T. L. (2000). Statistical methods for characterizing similarities and differences between semantic structures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(1), 518–523.
- Romney, A. K., Moore, C. C., & Rusch, C. D. (1997). Cultural universals : measuring the semantic structure of emotion terms in English and Japanese. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(10), 5489–5494.

- Rosch, E. (1973). Natural categories. *Cognitive Psychology*, 4, 328–350.
- Rosch, E. (1975a). Cognitive reference points. *Cognitive Psychology*, 7, 532–547.
- Rosch, E. (1975b). Cognitive representations of semantic categories. *Journal of Experimental Psychology : General*, 103, 192-233.
- Rosch, E. (1977). Studies in cross-cultural psychology. In N. Warren (Ed.), (chap. Human Categorization). London : Academic.
- Rosch, E. (1978). Principles of catégorization. In E. Rosch & B. B. Lloyd (Eds.), *Cognition and categorization* (p. 27-48). Erlbaum : Hillsdale, N.J.
- Rosch, E., & Mervis, C. (1975). Family resemblances : Studies in the internal structure of categories. *Cognitive psychology*, 7, 573–605.
- Rosch, E., Mervis, C., David Johnson, W. G. ans, & Boyes-Braem, P. (1976). Basic objects in natural categories. *Cognitive Psychology*, 8, 382–439.
- Rosch, E., Simpson, P., & Miller, R. (1976). Structural bases of typicality effects. *Journal of Experimental Psychology : Human perception and performance*, 2, 491–502.
- Roudet, L. (1921). Sur la classification psychologique des changements sémantiques. *Journal de Psychologie*, 18, 676–692.
- Saussure, F. de. (1995). *Cours de linguistique générale* (C. Bailly & A. Séchehaye, Eds.). Payot and Rivages. (Original work published 1916)
- Scannel, J., Blakemore, C., & Young, M. (1995). Analysis of connectivity in the cat cerebral cortex. *Journal of Neuroscience*, 15, 1463–1483.
- Scannell, J., Burns, G., Hilgetag, C., O’Neil, M., & Young, M. (1999). The connectional organization of the cortico-thalamic system of the cat. *Cerebral Cortex*, 9(3), 277–299.
- Schüle, S. (2000). *Perception verb complements in akatek, a mayan language*. Thèse

- de doctorat, Neuphilologischen Fakultät der Universität Tübingen.
- Shepard, R., & Meltzer, J. (1971). Mental rotations of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701–703.
- Sigman, M., & Cecchi, G. A. (2002). The global organisation of the wordnet lexicon. *Proceedings of the National Academy of Science*, 99(3), 1742–1747.
- Smith, A. (2003a). *Evolving communication through the inference of meaning*. Thèse de doctorat, Theoretical and Applied Linguistics, School of Philosophy, Psychology and Language Sciences, University of Edinburgh.
- Smith, A. (2003b). Intelligent meaning creation in a clumpy world helps communication. *Artificial Life*, 9(2), 175–190.
- Solé, R. V., & Montoya, J. M. (2002). Small world patterns in food webs. *Journal of Theoretical Biology*, 214, 405–412.
- Solomon, K. O., & Barsalou, L. W. (2001). Representing. properties locally. *Cognitive Psychology*, 43, 129-169., 43, 129–169.
- Sperber, D., & Wilson, D. (1986). *Relevance : Communication and cognition*. Cambridge : Harvard University Press.
- Sperber, H. (1923). *Einführung in die bedeutungslehre*. Leipzig.
- Spivey, M., & Geng, J. (2001). Oculomotor mechanisms activated by imagery and memory : Eye movements to absent objects. *Psychological Research*, 65, 235–241.
- Sporns, O. (2003). Network analysis, complexity, and brain function. *Complexity*, 8(1), 56–60.
- Sporns, O., Chialvo, D. R., Kaiser, M., & Hilgetag, C. C. (2004). Organization, development and function of complex brain networks. *Trends in Cognitive Science*, 8(9), 418–425.

- Sporns, O., & Zwi, J. (2004). The small world of the cerebral cortex. *Neuroinformatics*, 2, 145–162.
- Steels, L. (1996). Perceptually grounded meaning creation. In M. Tokoro (Ed.), *Proceedings of the second international conference on multi-agent systems* (pp. 338–344). Menlo Park, CA : AAAI Press.
- Steels, L. (1997a). Constructing and sharing perceptual distinctions. In M. van Someren & G. Widmer (Eds.), *Proceedings of the ninth european conference on machine learning* (pp. 4–13). Berlin : Springer-Verlag.
- Steels, L. (1997b). Self-organizing vocabularies. In C. Langton & T. Shimohara (Eds.), *Artificial life v : Proceeding of the fifth international workshop on the synthesis and simulation of living systems* (pp. 179–184). Cambridge, MA : The MIT Press.
- Steels, L. (1997c). The synthetic modeling of language origins. *Evolution of Communication*, 1(1), 1-34.
- Steels, L. (1998). The origins of syntax in visually grounded robotic agents. *Artificial Intelligence*, 103(1-2), 133-156.
- Steels, L. (2000, September). Language as a complex adaptive system. In M. Schoenauer (Ed.), *Proceedings of ppsn vi : Lectur notes in computer science* (pp. 17–26). Berlin : Springer-Verlag.
- Steels, L., & Belpaeme, T. (2005). Coordinating perceptually grounded categories through language. a case study for colour. *Behavioral and Brain Sciences*. (Target Paper)
- Steels, L., & Kaplan, F. (1998). Spontaneous lexicon change. In *Coling-acl 1998* (p. 1243-1249). Montreal.
- Steels, L., & Kaplan, F. (1999). Situated grounded word semantics. In T. Dean (Ed.),

- Sixteenth international joint conference on artificial intelligence ijcai'99* (p. 862-867). San Francisco, CA : Kaufmann Publishers.
- Steels, L., & Kaplan, F. (2002). Bootstrapping grounded word semantics. In T. Briscoe (Ed.), *Linguistic evolution through language acquisition : formal and computational models*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Steels, L., & Vogt, P. (1997). Grounding adaptive language games in robotic agents. In I. Harvey & P. Husbands (Eds.), *Proceedings of the 4th european conference on artificial life* (pp. 474–482). Cambridge, MA : The MIT Press.
- Stern, G. (1931). *Meaning and change of meaning. with a special reference to the english language*. Göteborg : Elanders Boktryckeri Aktiebolag.
- Steyvers, M., & Tenenbaum, J. B. (2005). The large-scale structure of semantic networks : Statistical analyses and a model of semantic growth. *Cognitive Science*, 29, 41–78.
- Stross, B. (1969). *Language acquisition by tenejapa tzeltal children*. Thèse de doctorat, University of California, Berkeley.
- Sweetser, E. E. (1990). *From etymology to pragmatics : metaphorical and cultural aspects of semantic structure*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Talmy, L. (2000). The relation of grammar to cognition. In L. Talmy (Ed.), *Toward a cognitive semantics* (Vol. 1 : Concept Structuring Systems). Cambridge : MIT Press.
- Taylor, J. R. (1989). *Linguistics categorization : Prototypes in linguistics theory*. Oxford : Clarendon.
- Traugott, E. (1978). Universals of human language : Word structure. In J. H. Greenberg (Ed.), (Vol. 3, pp. 369–400). Stanford : Stanford University Press.
- Traugott, E., & Dasher, R. (2002). *Regularity in semantic change* (Vol. 96). Cam-

- bridge : Cambridge University Press.
- Trier, J. (1931). *Der deutsche wortchatz im sinnbezirk des verstandes*. Heidelberg : Winter.
- Tucker, M., & Ellis, R. (2001). The potentiation of grasp types during visual object categorization. *Visual Cognition*, 8(6), 769–800.
- Tversky, A., & Gati, I. (1978). Cognition and categorization. In E. Rosch & B. Lloyd (Eds.), (pp. 79–98). Lawrence Erlbaum Associates.
- Tversky, B. (1977). Features of similarity. *Psychological Review*, 84, 327–352.
- Ullmann, S. (1957). *The principles of semantics* (2 ed.). Oxford : Blackwell. (Original work published 1951)
- Ullmann, S. (1965). *Précis de sémantique française* (2 ed.). Berne : A. Francke S.A. (Original work published 1952)
- Ullmann, S. (1967). *Semantics. an introduction to the science of meaning* (2 ed.). Oxford : Blackwell. (Original work published 1962)
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodied mind : Cognitive science and human experience*. Cambridge : MIT Press.
- Venant, F. (2004). Géométriser le sens. In *Recital 2004*.
- Viberg, A. ke. (1983). The verb of perception : a typological study. *Linguistics*, 21, 123–162.
- Vogt, P. (2000). *Lexicon grounding on mobile robots*. Thèse de doctorat, Artificial Intelligence Lab, Vrije Universiteit Brussel.
- Wagner, A., & Fell, D. A. (2001). The small world inside large metabolic networks. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, 268, 1803–1810.
- Wagner, K., Reggia, J. A., Uriagereka, J., & Wilkinson, G. S. (2003). Progress in the simulation of emergent communication and language. *Adaptive Behavior*,

11(1), 37-69.

Watts, D., & Strogatz, S. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393(6), 440–442.

Weiss, S., Indurkha, N., & Damerou, F. (2004). *Text mining : Methods for analyzing unstructured information*. Springer.

White, S., & Smyth, P. (2003). Algorithms for estimating relative importance in networks. In *Kdd '03 : Proceedings of the ninth acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining* (pp. 266–275). New York, NY, USA : ACM Press.

Wilkins, D. P. (1996). The comparative method reviewed : Regularity and irregularity in language change. In O. U. Press (Ed.), (pp. 264–304). New York : M. Durie and M. Ross.

Williams, J. M. (1976). Synaesthetic adjectives : A possible law of semantic change. *Language*, 52(2), 461–478.

Wittgenstein, L. (1921). *Tractatus logico-philosophicus*.

Wittgenstein, L. (1953). *Philosophical investigations*. New York : Macmillan.

Wu, L., & Barsalou, L. (2003). *Grounding concepts in perceptual simulation : I. evidence from property generation*.

Wundt, W. (1900). *Völkerpsychologie. i : Die sprache*. Leipzig.

Yamamoto, W. S., & Achacoso, T. B. (1991). *Ays neuroanatomy of c elegans for computation*. Hardcover.

Yook, S.-H., Jeong, H., & Barabási, A.-L. (2002). Modeling the internet's large-scale topology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(21), 13382–6.

Young, M. (1993). The organization of neural systems in the primate cerebral

cortex. *Proceedings of the Royal Society : Biological Sciences*, 252, 13–18.

Yu, N. (1998). *The contemporary theory of metaphor : A perspective from chinese*.
Amsterdam : Benjamin.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, 338–358.

Zipf, G. K. (1949). *Human behavior and the principle of least-effort*. Cambridge :
Addison-Wesley.

Zola, E. (1887). *La terre*.

ANNEXE 1

Questionnaire

Age :

Sexe :

Evaluation du nombre de pages de français que vous lisez par jour :

Cette enquête a pour but d'établir dans quelle mesure vous pensez que deux mots ont des sens proches ou non. Sur les pages suivantes, des paires de mots vous seront proposées, et vous devrez évaluer la proximité des sens de ces mots.

A coté de chaque paire de mot figure un axe sur lequel vous devrez placer une marque. Placer la marque tout à gauche signifie que les deux mots ont des sens complètement différents, tandis que placer la marque tout à droite signifie que les deux mots sont des synonymes parfaits.

Voici quelques exemples :

Exemple 1 :

chien valise |-----|

Ces deux mots ont des sens complètement différents, la marque devrait donc être placée tout à gauche.

Exemple 2 :

livre bouquin |-----|

Ces deux mots sont parfaitement synonymes, même si le mot « bouquin » appartient à un registre de langage plus familier que le mot « livre ». La marque devrait donc être placée tout à droite.

Exemple 3 :

couteau poignard |-----|

Ces mots ne sont pas des synonymes parfaits, mais ont néanmoins des sens assez proches. La marque devrait donc se trouver ni tout a fait a gauche, ni tout a fait a droite, mais quelque part sur l'axe.

Exemple 4 :

couteau épée |-----|

Ces mots ont des sens éloignés, mais ne sont pas sans rapport l'un avec l'autre. La marque ne doit pas être tout a fait a gauche. En revanche, elle sera quand même plus a gauche que celle de l'exemple précédent.

Exemple 5 :

fourchette gamme |-----|

On peut penser que les sens de ces mots sont très éloignés, mais il faut bien penser à tous les sens que peuvent avoir les mots. Si l'on considère le sens que prend le mot « fourchette » dans l'expression « une fourchette de prix », il est très proche du sens que prend le mot « gamme » dans l'expression « une gamme de prix ». L'encoche ne doit donc pas être placée tout à gauche sur l'axe, mais au contraire plutôt à droite.

Essayez d'utiliser la totalité de l'axe d'évaluation, c'est-à-dire les deux extrêmes mais également les points intermédiaires.

Par ailleurs, ne réfléchissez pas trop ! Vous n'avez pas à passer plus de 5 secondes pour chaque paire de mots.

Bon courage et merci !

construction	entreprise	-----
entreprise	réduit	-----
propriété	intérieur	-----
manoir	clinique	-----
manoir	hôpital	-----
intérieur	résidence	-----
intérieur	logement	-----
résidence	château	-----
propriété	case	-----
habitation	hôpital	-----
établissement	case	-----
établissement	masure	-----
clinique	intérieur	-----
masure	résidence	-----
maison	entreprise	-----
établissement	habitation	-----
chalet	résidence	-----
clinique	chaumière	-----
établissement	manoir	-----
masure	hôpital	-----
logement	masure	-----
réduit	intérieur	-----
construction	propriété	-----
immeuble	réduit	-----
logis	chaumière	-----
logis	propriété	-----
habitation	clinique	-----
intérieur	construction	-----
hôpital	résidence	-----
maison	manoir	-----
masure	chalet	-----
propriété	établissement	-----
château	manoir	-----
immeuble	habitation	-----
réduit	construction	-----
chalet	case	-----
chalet	chaumière	-----
résidence	établissement	-----
entreprise	établissement	-----
intérieur	immeuble	-----
case	construction	-----

immeuble	logis	-----
chalet	château	-----
logement	manoir	-----
logis	maison	-----
résidence	logement	-----
firme	réduit	-----
résidence	chaumière	-----
logement	chaumière	-----
immeuble	case	-----
propriété	résidence	-----
chaumière	case	-----
firme	hôpital	-----
entreprise	immeuble	-----
chaumière	immeuble	-----
hôpital	établissement	-----
logis	logement	-----
maison	masure	-----
chalet	construction	-----
manoir	chalet	-----
firme	chalet	-----
masure	habitation	-----
réduit	chalet	-----
maison	immeuble	-----
résidence	logis	-----
case	intérieur	-----
propriété	clinique	-----
manoir	entreprise	-----
établissement	construction	-----
masure	propriété	-----
maison	intérieur	-----
logement	établissement	-----
habitation	logis	-----
entreprise	logement	-----
chaumière	maison	-----
firme	immeuble	-----
château	masure	-----
construction	résidence	-----
construction	hôpital	-----
chaumière	intérieur	-----
château	construction	-----
hôpital	château	-----

construction	logis	-----
chalet	intérieur	-----
réduit	hôpital	-----
maison	logement	-----
château	établissement	-----
propriété	château	-----
habitation	maison	-----
résidence	maison	-----
chaumière	construction	-----
masure	manoir	-----
logis	clinique	-----
résidence	firme	-----
manoir	habitation	-----
logis	entreprise	-----
immeuble	établissement	-----
clinique	réduit	-----
hôpital	intérieur	-----
résidence	habitation	-----
immeuble	propriété	-----
masure	logis	-----
construction	manoir	-----
manoir	immeuble	-----
clinique	logement	-----
manoir	chaumière	-----
logement	habitation	-----
intérieur	habitation	-----
logement	château	-----
habitation	château	-----
entreprise	résidence	-----
logis	réduit	-----
intérieur	entreprise	-----
intérieur	firme	-----
chaumière	entreprise	-----
case	hôpital	-----
établissement	chaumière	-----
réduit	résidence	-----
case	firme	-----
firme	entreprise	-----
habitation	chaumière	-----
clinique	construction	-----
firme	maison	-----

château	logis	-----
hôpital	logement	-----
hôpital	immeuble	-----
clinique	château	-----
firme	logis	-----
résidence	manoir	-----
construction	immeuble	-----
entreprise	hôpital	-----
habitation	propriété	-----
habitation	case	-----
réduit	propriété	-----
établissement	firme	-----
chalet	logis	-----
propriété	chaumière	-----
case	réduit	-----
logement	firme	-----
hôpital	chalet	-----
entreprise	propriété	-----
firme	construction	-----
résidence	clinique	-----
construction	habitation	-----
établissement	maison	-----
château	immeuble	-----
construction	masure	-----
intérieur	château	-----
logis	hôpital	-----
logement	case	-----
masure	réduit	-----
immeuble	clinique	-----
château	case	-----
case	logis	-----
manoir	case	-----
chalet	établissement	-----
clinique	établissement	-----
masure	entreprise	-----
logement	construction	-----
case	entreprise	-----
maison	clinique	-----
château	réduit	-----
case	masure	-----
intérieur	masure	-----

manoir	réduit	-----
entreprise	clinique	-----
chaumière	masure	-----
propriété	firme	-----
case	résidence	-----
maison	chalet	-----
hôpital	propriété	-----
logement	immeuble	-----
habitation	entreprise	-----
hôpital	maison	-----
logis	intérieur	-----
clinique	case	-----
chalet	logement	-----
clinique	firme	-----
masure	clinique	-----
château	firme	-----
construction	maison	-----
habitation	chalet	-----
firme	masure	-----
propriété	logement	-----
maison	propriété	-----
réduit	chaumière	-----
château	maison	-----
immeuble	masure	-----
hôpital	clinique	-----
chaumière	château	-----
réduit	logement	-----
établissement	intérieur	-----
chaumière	firme	-----
case	maison	-----
immeuble	résidence	-----
entreprise	chalet	-----
clinique	chalet	-----
chaumière	hôpital	-----
établissement	logis	-----
firme	habitation	-----
manoir	firme	-----
réduit	établissement	-----
propriété	manoir	-----
logis	manoir	-----
réduit	habitation	-----

intérieur	manoir	-----
maison	réduit	-----
immeuble	chalet	-----
chalet	propriété	-----
entreprise	château	-----

ANNEXE 2

From changes in the world to changes in the words

From Changes in the World to Changes in the Words

Jean-Philippe Magué

Laboratoire Dynamique Du Langage, Université Lyon 2

Jean-Philippe.Mague@etu.univ-lyon2.fr

Jean-Philippe Magué
Laboratoire Dynamique Du Langage
Institut des Sciences de l'Homme
14 avenue Berthelot
69 363 Lyon cedex 07 - France

This paper deals with the evolution of the lexicon in a changing environment. We adopt Mufwene's (2001) metaphor of "language as species" that explains evolution of languages as differential selection of features in languages' feature pools. We propose a multi-agent model and use it to explore the role of different constraints on the feature selection process. We show that constraints are indeed competing and that one of them is the major constraint in natural selection, viz., fitness to the environment.

Keywords: language evolution, feature pool, evolutionary linguistics, conceptual spaces.

1. Introduction

According to the myth of Babel, diversity in human languages is due God's anger toward the arrogance of humans that were trying to build a tower high enough to reach heaven. Such defiance against divine power being unacceptable, God broke mankind's linguistic unity. Unable to understand each other and thus divided, humans gave up with their tower project and populations spread over the world, leaving intact the domination of God on heaven.

This myth broke down in favor of evolutionary views of language as early as the mid-18th century, decades before the diffusion of evolutionarism into natural sciences and thus long before Darwin's theory (Tort 1980). This anteriority had a double consequence: on the one hand biologists, aware of linguists' interests in evolution, used the language metaphor to explain natural evolution of species (Darwin 1859), while on the other, linguists, seeking a formalization of language evolution, followed developments of the biological theory (Schleicher 1863; see Ben Hamed *in press* for a review).

When one mentions the evolution of language, a distinction has to be made between the evolution of the language faculty and the evolution of languages. The evolution of the language faculty is a field of research seeking to ascertain when, how and why our species has developed this unique and complex communication system, viz., Language. This field is growing rapidly and relies strongly on neo-Darwinism since Pinker and Bloom (1990) argued for the necessity of referring to natural selection in explanations of language origin. This biological evolution has nothing to do with the evolution of languages, which is a cultural process taking place on timescales which are insignificant to natural evolution. Nevertheless, parallels between biological and cultural evolutions may be drawn and metaphors formulated since similar mechanisms drive both evolutions. This use of a biological metaphor for language evolution can be found in Mufwene (2001) who considers languages as species and idiolects as individuals. Each language has a feature pool similar to species' gene pool in which idiolects pick out their characteristics. Language evolution is then due to the selection by learners of features in competition from the feature pool (learners may modify features, providing then new features to the pool, with the consequence that this evolution falls into the Lamarckian paradigm). Selection criteria proposed by Mufwene are primarily frequency of the features and cognitive and structural constraints. The main thesis of this paper is that when we look at lexical items, there is a very specific constraint on the selection: selected items are items that best fit speakers' environment.

The rest of the paper is organized into four sections: in the following section we describe the semantic framework upon which our work is grounded. Then we describe the model we developed in order to study dynamics of the lexicon. The next section relates four simulations run with the model, and in the final section the results obtained are discussed.

2. Semantics, categories and concepts

2.1 Semantics

Providing an account of how words get their meaning is a problem far from trivial. The 20th century has seen broadly three attempted solutions coming from three different fields: philosophy, linguistics and psychology.

The philosophical account of semantics, called formal semantics or veri-conditional semantics, is due to the revolution of logic that happened at the end of 19th and the beginning of the 20th centuries when Frege and others realized that Aristotle did not say all that can be said about logic. Assimilating formal and natural languages, they faced the problem of how the symbols of their expressions refer to something. The answer that formed the groundwork for formal semantics was provided by Wittgenstein (1922): the meaning of an expression is its truth conditions, *i.e.* how the world should be so that the expression is true. This semantic

tradition is still very active and its most achieved proposition is probably Montague's semantics (Montague 1973).

Linguists' interest in semantics is clearly natural. The Saussurian structural wave (de Saussure 1915) that flooded linguistics and more generally humanities (at least in Europe) reached semantics and inspired structural semantics. According to the structural account, a language is a closed system and a sign, composed of a *signifié* and a *signifiant*, receives its meaning from the relations the *signifiant* maintains with the other *signifiants* of the language.

The psychological account of semantics, viz., cognitive semantics, has also been proposed by linguists. It is much more recent since the pioneering contributions are only a quarter of a century old (Fillmore 1982; Langacker 1987; Lakoff 1987). It is psychological in the sense that meaning of words and expressions are mental entities. Cognitive semantics belongs to the more general stream of cognitive linguistics that rules out the independency of language and embeds it firmly into cognition. Our cognitive apparatus allows us to form mental representations of the world which may serve as meaning of words and expressions. This approach is summarized in Sweetser (1989: 1): "*Language is systematically grounded in human cognition and cognitive linguistics seeks to show exactly how. The conceptual system that emerges from everyday human experience has been shown [...] to be the basis for natural-language semantics [...]*". This is the line of semantics which we adopt here. The notions of categories and concepts are thus critical for us, and consequently the following section aims at detailing them.

2.2 Categories and concepts

2.2.1 The Classical view

Grouping things together is an activity that we cannot avoid doing. We cannot see a bed without thinking that it is a bed, we cannot write with a pen without knowing that we are using a pen. Categorization is one of our basic cognitive skills and is used in most (if not all) of our activities.

Our ability to recognize objects of the world as members of categories is so automatic and unavoidable, that people have long thought that objects really belong to categories which somehow exist independently of us. This view is known as the classical view and can be traced back to Aristotle. Aristotle's conception of the world was hierarchical: things belong to categories, which are in turn grouped into supercategories, and so on, with the category "Being" at the top of the hierarchy. At any level of this taxonomy, categories are mutually exclusive and they sum up together to form the universe: an object belongs to one and only one category. It follows that given an object and a category, either this object belongs to this category, or it does not. A category is defined in term of the characteristics that all of its members have in common. Each of these characteristics is necessary for an object to belong to the category, and they are all together sufficient to provide the membership to the category.

2.2.2 The Roschian revolution

This view of categories prevailed for almost 23 centuries. The first major claim against the classical view came from philosophy with Wittgenstein (1953). Wittgenstein noticed that it is not always the case (almost never in fact), that membership is due to a set of common characteristics shared by all the members of a category and only them. He illustrated this fact with the famous example of the category GAME. If we look at the characteristics of games, we find that many of them are shared by many games, but none is present in all the games. Most games involve different players, but not all; some games rely on particular skills, others on chance and others on both; many games finish with a winner, but for others the notion of "winning" is meaningless. Rather than a set of common characteristics, what characterizes the

members of a category is what Wittgenstein called *family resemblances*. Members of a category are similar to each other in many ways, but none of these ways make them similar all together. As a consequence of the Wittgensteinian view of the categories, we are no longer provided with a criteria (a set of necessary and sufficient conditions) to decide whether an object belongs to a category or not. It follows that the boundaries of the categories are not clear as in the classical view but fuzzy and extendable. An illustration of the fuzziness of boundaries can be found in the beginnings of surrealism which was accepted as art by some, while strongly refused by others. And to illustrate the extendableness of boundaries, it is interesting to note that the debate of membership of surrealism to art is long over and is now considered a typical art form of the first half of the 20th century. One fundamental implication of Wittgenstein's conception of categories is that they are no longer seen as abstract entities that exist independently of us. The fuzziness of their boundaries and the impossibility to define objective means to make judgment about membership clearly establish categories as psychological entities.

The next major attack against the classical view (and probably the most important) marked the shift of categorization from philosophy to psychology with the empirical work of Eleanor Rosch (Rosch 1975). Rosch's contribution to categorization, known as *prototype theory*, addresses both the status of certain members within categories and the status of certain categories within the taxonomy. In Aristotle's hierarchy of categories, no level is given particular consideration. A dog is equally a Dalmatian, a dog, a mammal, an animal, and so on. What Rosch pointed out, is that it is not the case at all. Before being a Dalmatian or a mammal, a dog is a dog. The category DOG has a special cognitive status. It is a *basic level* category. These categories, like CHAIR, TREE, are more naturally used when we categorize things. They are learned and remembered more easily, we have motor actions associated with them and we can form mental images of them. A theory of categorization must account for that, but the classical view cannot.

Rosch also established that we do not treat all the members of a given category equivalently: some of them are more representative of the category than others; members differ in their *typicality*. For example, in the category BIRD, *robin* is a better example than *chicken*, which is a better example than *penguin*. Best examples of a category are called *prototypes*. Effects of prototypicality have been shown in many different kinds of tasks (direct rating, mental chronometry, and so on, cf. Lakoff 1987: ch. 2, for a review). The classical view cannot give any account for these prototype effects, given that the set of necessary and sufficient conditions which defines membership does not give a special status to any member.

One consequence of abandoning the classical view is that categories have to be attributed a new ontological status. Categories are not objective and external entities, but subjective and internal. There is no objective category BIRD that exists independently of cognitive organisms (which does not mean that the world has no structure). Cognitive organisms create concepts, *i.e.* representations of the world, which capture the similarities of the world they live in. The world is continuous and concepts try to give a discrete account of it. Objects more or less match the concepts, causing the prototype effect.

Let us consider an entity that we categorize as BIRD; we would categorize the parents of that entity as BIRD too, as we would do with the parents of the parents, and with the parents of the parents of the parents, and so on. But if we consider the ancestors of that entity that lived 200 millions years ago, we would categorize them as DINOSAUR. There is a continuum between the entity that lives now and its ancestors. There is no necessary and sufficient condition for being a bird that one entity would not have verified (and hence been a dinosaur) and that its child would have verified (and hence been a bird). Instead of one absolute and objective category, there are as many subjective categories as cognitive

organisms are able to develop. These categories represent the world in which the organism does live, and that is why Archaeopteryx is a rather non typical bird.

3. Model of lexical evolution

In this section, we present our model of lexical evolution which falls into the evolutionary linguistics framework. Evolutionary linguistics aims to explain language origin and evolution by simulating community of interacting speakers. From their interactions, emerge and evolve particular aspects of language such as lexicon (e.g. Steels 1998), phonology (e.g. de Boer 2000), syntax (e.g. Kirby 2000), ... (See Cangelosi and Parisi 2001 for general introduction to evolutionary linguistics.) In particular, our model is related to works of Steels (1998), Vogt (2003) and Smith (2003). (See Discussion for details).

In order to fully describe the model, we have to specify how the speakers, their interactions, their social relationships, and their environment are modeled.

3.1 Cognitive architecture of the speakers

3.1.1 Conceptual spaces

Let us take four balls, two blue, a big one and a small one, and two red, a small one and a big one as well. When we turn to the relations of similarity between these 4 objects, we face a dilemma: would we judge the similarity according to the size, grouping together the big balls on the one hand and the small ones on the other? Or would we group according to the color, having the two red balls in one group and the two blue in the other?

This example reveals the (trivial) fact that there are many ways of judging similarity between objects. Gärdenfors (2000) has named these different ways *quality dimensions*. We have seen that shape and color are quality dimensions¹, but we could cite many others: weight, time, and so on. Quality dimensions may vary on their topological structure: weight is isomorphic with the nonnegative real numbers, while the hue dimension of colors is isomorphic with a circle. Some quality dimensions are innate (*i.e.* biology based), others are acquired (*i.e.* culture based): perception and representation of colors are universal (Berlin and Kay 1969), while representation of time is linear in some cultures but circular in others.

Together, quality dimensions form *conceptual spaces*. The conceptual spaces framework allows us to define some crucial notions for our problem. Perception of an object is defined as the act of determining the value of that object on each quality dimension, *i.e.* forming a point in the conceptual space that represents the object. A concept (*i.e.* a mental representation that determines the categorization of a perceived object) is a region of a conceptual space. Learning is creating a new concept, or modifying an existing one.

3.1.2 Concepts

In this section, we review the technical details of concept modeling in a conceptual space, which differ from Gärdenfors (2000). In the rest of this paper, all quality dimensions are isomorphic to the real numbers, and thus conceptual spaces are multi-dimensional Euclidian spaces.

As we have seen in section 2, categories are not clear cut sets of objects. Members of categories vary in their typicality, ranging from objects that are prototypes of the category, to objects for which membership is not an easy question. Mathematics provides us with a very useful tool for handling this kind of set: the fuzzy sets theory. More precisely, fuzzy arithmetic will be our scalpel to shape concepts in conceptual spaces. Fuzzy numbers have been introduced to model expressions such as “about 50” (Dubois and Prade 1978; Kaufman

¹ Color is actually composed of three dimensions: hue, saturation and brightness.

and Gupta 1984; Mareš 1994). 50 is certainly “about 50”, 49 and 51 are very likely to be “about fifty”, but -65 and 842 are probably not “about 50” (what exactly is “about 50” depends on what we are talking about). In fuzzy arithmetic, a fuzzy number F is defined by its characteristic function $\mu_F : \mathfrak{R} \rightarrow [0;1]$. In our case, we will consider an extension of fuzzy numbers in n -dimensional spaces, *i.e.* we will consider fuzzy vectors. The characteristic function of a fuzzy vector has to verify the following properties:

- (i) $\exists x_0 \in \mathfrak{R}^n, \mu_F(x_0) = 1$,
- (ii) $\forall x_1, x_2 \in \mathfrak{R}^n, \forall \lambda \in [0;1], \mu_F(\lambda \cdot x_1 + (1-\lambda) \cdot x_2) \leq \max(\mu_F(x_1), \mu_F(x_2))$,
- (iii) $\{x \in \mathfrak{R}^n, \mu_F(x) \neq 0\}$ is bounded.

In the framework of concept modeling, the μ_F function indicates the membership of objects. If for an object $x, \mu_F(x) = 1$, x is then a prototype of the category. If $\mu_F(x) = 0$, x does not belong to the category. Intermediate values indicate the degree of typicality. Property (i) may be interpreted by the fact that each concept has a prototype which is an object with a certain membership. Property (ii) expresses that if an object x_1 is more similar to the prototype than an object x_2 , then x_1 is more typical than x_2 . Property (iii) expresses that if an object is dissimilar enough from the prototype, it does not belong to the concept. Figure 1 illustrates a characteristic function in \mathfrak{R} .

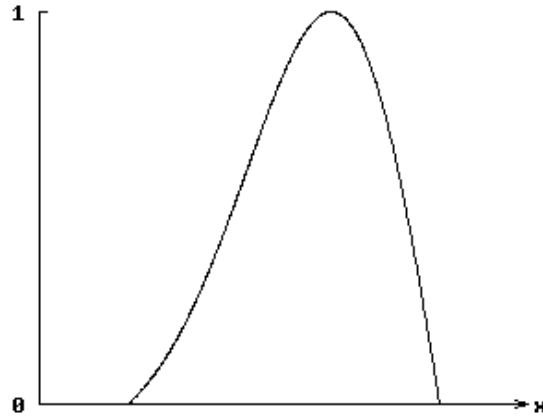


Figure 1: A characteristic function of a fuzzy number.

Directly handling or modifying the characteristic function of a fuzzy number is not very practical. For that reason many ways of representing fuzzy numbers have been introduced. Here, we will use an approach proposed by Kaufman and Gupta (1984), which relies on the notion of α -cut. F_α is the α -cut of F if and only if $F_\alpha = \{x \in \mathfrak{R}, \mu_F(x) \geq \alpha\}$. A fuzzy number F can be defined by the set $\{F_\alpha, \alpha \in]0;1]\}$. Moreover, any set of N pairs:

$$\{([x_n; x'_n], \alpha_n), 0 \leq n < N, [x_{n-1}; x'_{n-1}] \subset [x_n; x'_n], 0 < \alpha_{n-1} < \alpha_n \leq 1, \alpha_{N-1} = 1\},$$

define a fuzzy number F which step-shaped characteristic function is (see figure 2):

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \notin [x_0; x'_0] \\ 1 & \text{if } x \in [x_{N-1}; x'_{N-1}] \\ \alpha_n & \text{if } x \in [x_n; x'_n] \quad \& \quad x \notin [x_{n+1}; x'_{n+1}] \end{cases}$$

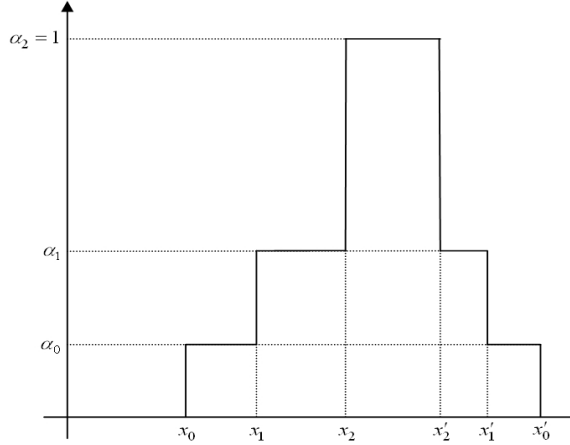


Figure 2: Characteristic function μ_F of a fuzzy number F defined by

$$\{([x_0; x'_0], \alpha_0), ([x_1; x'_1], \alpha_1), ([x_2; x'_2], \alpha_2)\}.$$

Fuzzy numbers defined by the mean of α -cut can easily be generalized to fuzzy vectors in N-dimensional spaces by using N-dimensional hyperspheres instead of intervals. Each α -cut is then defined by a center and a radius. This is how concepts are represented in our model. The number of α -cuts used for representing the concept is a parameter of the model (in subsequent simulation, α is set to 10). Each concept C is given a confidence degree, $U_C \in [0;1]$, which represents the confidence of the speaker in the usefulness of the concept. Each concept is also tagged with a word, w_C , and stands for the meaning of that word. We will use the term “conceptual structure” to refer to a speaker’s conceptual space and concepts together. In all the simulations presented in this article, speakers are endowed with a two dimensional conceptual space.

3.2 Interactions

In our model speakers communicate about the objects around them and from their interactions emerges and evolves a lexicon. This is made possible because after each interaction, speakers modify their conceptual space in order to take into account the result of the interaction. Let us first describe the protocol of communication between speakers, and then how they modify their concepts.

3.2.1 Protocol

Interactions take place between two members of the population. When two of them are chosen to interact, they are given specific roles. One of them is designated as the teacher, while the other is the learner. The teacher chooses one of the objects of the world, and indicates its choice to the learner by pointing to the object. The learner’s goal is then to perceive, categorize and name the object indicated by the teacher.

Once the object is placed in the learner’s conceptual space, she² must categorize it. A concept C may be used to categorize an object O if $\mu_C(O) \geq 0$. The learner can thus have many concurring concepts during the categorization process. The concept C_k that results of the categorization is stochastically determined with the probability:

$$p(C_k) = \frac{\mu_{C_k}(O) \cdot U_{C_k}}{\sum_i \mu_{C_i}(O) \cdot U_{C_i}}$$

The more the object is prototypical of the category represented by the concept and the more the learner has confidence in the usefulness of the concept, the more likely is the

² Speakers are asexual entities. We nevertheless choose to refer to them with the pronoun *she*.

concept to be the result of the categorization process. The last step for the learner is to name the object, and this is done with the word w_C associated with the concept.

The teacher has then to inform the learner whether she agrees with the word used to name the object. To achieve this, she just checks if one of her concepts is associated with the learner's word, and if this concept C is such that $\mu_C(O) > 0$. If she does agree, the interaction is successful. In that case, the learner refines the concept she used for the categorization in order to make the object more prototypical. She also increases her confidence in the concept (these two actions are described in the next section). But in several other scenarios the interaction fails.

The first problem that can occur is a failure on the part of the learner to categorize the object, because none of her concepts verifies $\mu_C(O) > 0$. In that case, if the teacher is able to give the learner a word for the object, then the learner acquires it. This learning can take different aspects. If the learner does not know the word used by the teacher, she creates a new concept on the basis of the object, and tags it with the teacher's word. If she already knows the teacher's word, either the associated concept was one of the concurring concepts during the categorization process ($\mu_C(O) > 0$), or it was not ($\mu_C(O) = 0$). In the first case, the learner refines her concept, and in the second she expands it in order to make its characteristic function such that $\mu_C(O) > 0$. But it might be the case that the teacher is unable to name the object. When this happens, they both create a new concept, and tag it with a word that the teacher invents. When a teacher invents a new word, it is always a completely new word: no other member of the population knows it.

When the learner manages to name the object, it is still possible that the teacher disagrees with that name. This disagreement can have two different causes: either the teacher does not have any concept C tagged with the learner's word such that $\mu_C(O) > 0$, or she simply cannot categorize the object. In both cases, the learner decreases the confidence of the concept she used. But in the first case, the teacher names the object and the learner learns the teacher's word (all the different cases of learning discussed in the previous paragraph are possible here too).

We have seen that in response to their interactions, speakers modify their conceptual structure. They may learn new words, extend or refine their concepts and/or modify the degrees of confidence toward their concepts. Let us examine how these operations are done.

3.2.2 Word acquisition

Acquiring a new word happens when the student is told by the teacher a word he had never heard before. Learning a new word means creating a new concept. The speaker does not know anything about the word but that it stands for the object chosen for the interaction. The concept created is defined as follow: all the α -cuts are centred on the object (it is the prototype of the new concept). The radius of the α -cut C_{α_n} is $\frac{R_{new}}{n+1}$, where R_{new} is a parameter of the model. The initial confidence degree of a new concept is another parameter of the model, U_{new} (in the rest of this paper, R_{new} is set to one thirtieth of the size of the conceptual spaces, and U_{new} to 0.5).

3.2.3 Concept extension

Speakers have to extend a concept when they are told that a word (which they already know) is usable for an object that is not in the scope of the concept yet. All of the α -cuts are modified. The different factors involved in the modification of C_{α_n} are the position of its center P , its radius r , the position of the object O , α_n and the concept degree of confidence U . When a member of the population is told about the association of a word she knows and an

object, she may consider this object rather peripheral according to the category associated with a word. It would be surprising if a new example of a category modified radically the prototype of the category. So the closer α_n is to 1, the less C_{α_n} is modified. It would also be surprising if a speaker modified a concept that has been very useful in the past and thus in which she has a high degree of confidence. So the more U is close to 1, the more the speaker is confident in her knowledge, and the less the concept is modified.

If d is the distance between the center of C_{α_n} and the object, the new radius r' of C_{α_n} is:

$$r' = r + \frac{d-r}{2} \cdot (1-U) \cdot (1-\alpha_n)$$

The center P is moved in the direction of the object in order not to generalize in the opposite direction of the object (see figure 3a). In vectorial notation, we have:

$$P' = \frac{\beta_1 \cdot P + \beta_2 \cdot O}{\beta_1 + \beta_2}, \text{ with } \beta_1 = r' - r = \frac{d-r}{2} \cdot (1-U) \cdot (1-\alpha_n),$$

$$\text{and } \beta_2 = d - \beta_1$$

In addition to this modifications, there is a constraint such that the radius cannot be increased nor the center be moved in a way such that $C_{\alpha_n} \not\subset C_{\alpha_{n-1}}$.

3.2.4 Concept refinement

Concept refinement occurs when a speaker has to tune a concept according to the information given by the position of an object that has already been categorized by this concept. When an object is categorized by a concept, the point that represents this object belongs to some of the α -cuts of the concept, maybe all, maybe not, depending on the typicality of the object. α -cuts are not modified in the same way when they contain the object or not. α -cuts that do not contain the object are modified in the same way than in the case of extension of concepts. α -cuts that do contain the object are recentered around the object. As in the case of extension, the higher the degree of confidence of a concept is, the less its α -cuts are modified. But the more the object is typical, *i.e.* the more the α -cuts in which it falls down have high α_n , the more it gives information to the category formation. So the higher α_n is, the more the α -cut is modified. If an α -cut C_{α_n} with center P and radius r is refined according to an object represented by the point O , its new centre P' is the barycenter of the points O and P with respective weights $\alpha_n \cdot (1-U_C)$ and $1-\alpha_n \cdot (1-U_C)$. The radius is then modified so that the α -cut after modification is included in what it was before: $r' = r - d_{PP'}$, where $d_{PP'}$ is the distance between the old position of the center and the new one (see figure 3b).

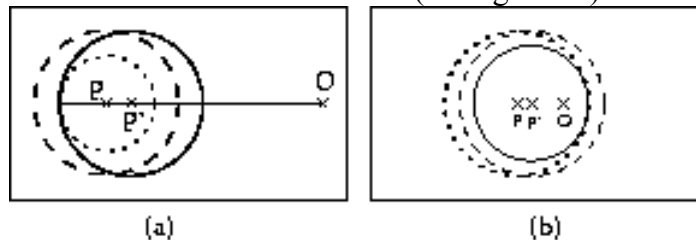


Figure 3: (a) α -cut C_{α_n} before extension (dotted line), after modification of the radius (dashed line) and after modification of the center (plain line); (b) α -cut C_{α_n} before refinement (dotted line), after modification of the center (dashed line) and after modification of the radius (plain line).

3.2.5 Modification of the degree of confidence

A speaker increases (decreases) the degree of confidence of a concept when an object has been successfully (unsuccessfully) named by the word associated with the concept. At the same time when a speaker increases (decreases) the weight of a concept, she decreases

(increases) the degree of confidence of all the concepts that were concurring in the categorization process for this object. The more the object is typical, the more the degree of confidence is modified. If a speaker has a high (low) degree of confidence in a concept, it will not decrease (increase) remarkably after one successful (failed) interaction.

When the degree of confidence U is increased given an object O it becomes U' :

$$U' = U + \min(U, (1-U)) \cdot \mu(O) \cdot \delta,$$

and when it is decreased:

$$U' = U - \min(U, (1-U)) \cdot \mu(O) \cdot \delta,$$

where δ is a parameter of the model. In all the following simulations, δ is set to 0.2.

If a speaker has a very low degree of confidence for a concept (under U_{min} , a parameter of the model set to .1), she forgets the concept (and the associated word).

3.3 Social relations

Our population is not an unstructured set of speakers. Not everybody can be the teacher of anybody. At each instant, the population is composed of two generations, an old one and a young one. Every T_{gen} interactions, the old generation disappears, the young generation becomes old, and a new young generation of speakers is created (T_{gen} is set to 15,000 for the rest of the paper). A newborn speaker does not have any knowledge, *i.e.* any concept. It then would not make any sense to have such a speaker as a teacher. The teacher is thus always from the old generation. The learner may be from one generation or the other. As a consequence, transmission of knowledge occurs both vertically and horizontally. In the simulations presented here, each generation is composed of 30 speakers.

3.4 Environment

The population's environment consists of the set of objects they can choose from for their interactions. The only thing they can do with these objects is to perceive them. As we explained in section 3.1.1, perception of an object consists in determining its coordinates in the conceptual space. We assume that all speakers have the same perceptual apparatus. So a given object has the same coordinates in every speaker's conceptual space. Objects are thus only defined by their coordinates in speakers' conceptual spaces.

As in the world in which we live in, the environment in the simulation we report here is not a simple pack of objects. It is on the contrary structured. Structured environments have been shown to increase communication (Smith 2003). The initial conditions of all the simulations are the following: 90 objects are distributed in 9 clusters. Figure 4 shows the repartition of the clusters in speakers' conceptual spaces. The size of the clusters is R_{new} (we suppose that speakers have phylogenetically evolved in such a way that they create new concepts with a size that matches their environment's regularities).

This world is not static: both the positions of the clusters and the positions of the objects within the clusters change. The evolution of the positions of the cluster is one of the parameters that will vary in the following simulations, and will be described when necessary. Within each clusters objects are changed every R_{obj} interactions. For the rest of the paper, R_{obj} is set to 500.

4. Simulations

4.1 Measurements

In order to describe the processes going on in the population, we need to define some informative quantities. The first that will be of interest is *success*. Success is simply the ratio of successful interactions over a fixed number of interactions (1,000 for all the simulations).

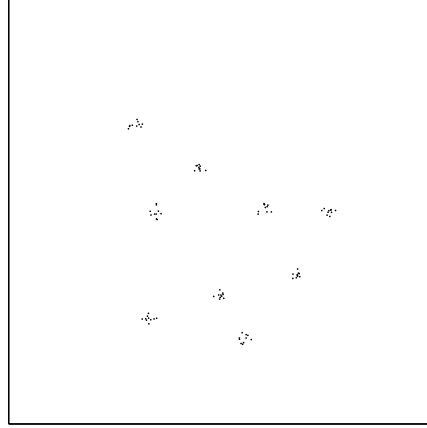


Fig.4: Initial positions of the clusters of objects as the speakers perceive them through their conceptual space.

Coherence and *stability* are also of important interest. These two measurements are computed when a generation dies. They are both defined with reference to speakers' similarity. The similarity $Sim_{1,2}$ between two speakers S_1 and S_2 , is computed as follow: for each word, we compute the volume of the intersection of the associated fuzzy vectors of the speakers (this intersection is null if one of the speakers does not know the word). The sum over all the words is the volume V_{\cap} of the intersection of their conceptual spaces. Let V_1 and V_2 be the volume of the conceptual space of S_1 and S_2 respectively (*i.e.* the sum of the volume of the fuzzy vectors). V_{\cap}/V_1 (respectively V_{\cap}/V_2) is that part of the knowledge of S_1 (respectively S_2) also known by S_2 (respectively S_1). We define the similarity $Sim_{1,2}$ between

$$S_1 \text{ and } S_2 \text{ as } Sim_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{\cap}}{V_1} + \frac{V_{\cap}}{V_2} \right).$$

When a generation dies, for each of its speakers S_i , we measure the mean similarity Sim_i^0 with all the speakers of its generation and the mean similarity Sim_i^{-1} with all the speakers of the previous generation (*i.e.* the generation that died T_{gen} before and that has transmitted its knowledge vertically to the dying generation). The mean over all the speakers of the dying generation of Sim_i^0 gives the coherence of the population, and the mean over all the speakers of Sim_i^{-1} gives the stability with respect to the previous generation.

4.2 Simulation 1, Emergence of a lexicon

In this first simulation, the positions of clusters do not vary. It is aimed to present the general dynamics of the model and to give an answer to the following problem: we said that the young generation does not provide teachers since when speakers arrive in the population they are without any knowledge. But what about the first generation? As it is the first one, there is no old generation from which to obtain knowledge. This simulation shows that if we make an exception to our rule for the first generation and permit teachers to be from the young generation (the only one at this point), a lexicon emerges from the interaction.

Figure 5 shows the evolution of the success, coherence and stability for 500,000 interactions. Several remarks can be made: after 100,000 interactions the plot of success oscillates around 0.95, with regular abrupt downfalls. These downfalls occur indeed every 15,000 interactions and correspond to generation replacement: as explained in section 3.3, newborn speakers do not have any knowledge and thus fail to communicate during their first interactions. But they learn very quickly, and subsequent interactions are generally successful. Coherence and stability have similar shape, oscillating around .45, except at the

beginning of the simulation, before success stabilizes, indicating that speakers always differ in their conceptual structure, and thus explaining why success never reach 1.

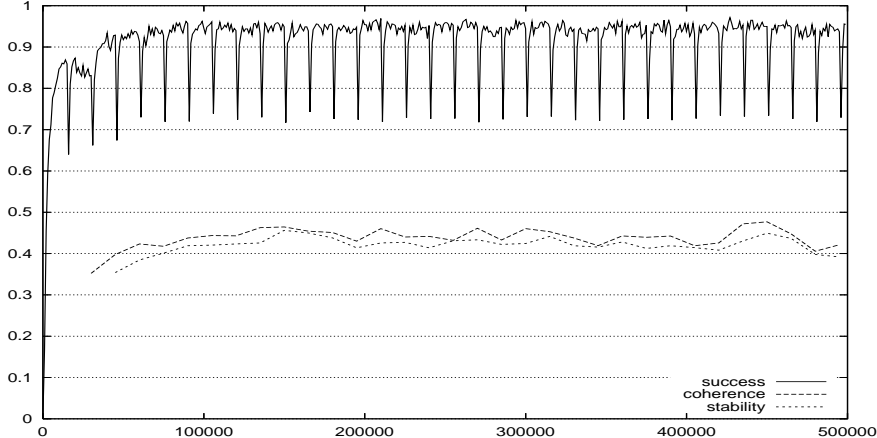


Fig. 5: Plots during 500,000 interactions of the success, the coherence and the stability of a population of 30 speakers per generation in a stable environment.

If we turn to the lexicon used by the population, we learn (see figure 6) that after an adjustment period, it oscillates between 40 and 60 words. Each word stands on average for 9.5 objects, all from the same clusters: speakers use words that refer to clusters of objects. Given that there are 9 clusters of objects in speakers’ environment, such a lexicon would imply a large amount of synonymy (more than 5 words on average per cluster). But this view is not very precise, and looking at each speaker’s private lexicon rather than at the pool of lexical items is more informative: the last generation of speakers only know 13.03 words out of the 49 spread in the population at this time, and while 9 words of the lexicon were created before the 500th interaction, the 40 others were created after the 440,000th one. Moreover, every speaker knows the 9 old base words with a high degree of confidence in the associated concept (*i.e.* in the meaning of the word), while degrees of confidence are always less than .5, their initial value, for the other words. The population uses in fact one word per cluster: speakers have on average between 1 and 1.5 different ways of categorizing the object of interactions (see figure 6). “Satellite” words are permanently created. They stay in the population for a few generations (a word created at the 440,000th interaction and still present at the 500,000th has been used for 6 generations), and then disappear. These words are not very widespread in the population since each speaker only knows 13.03 words including the 9 base words.

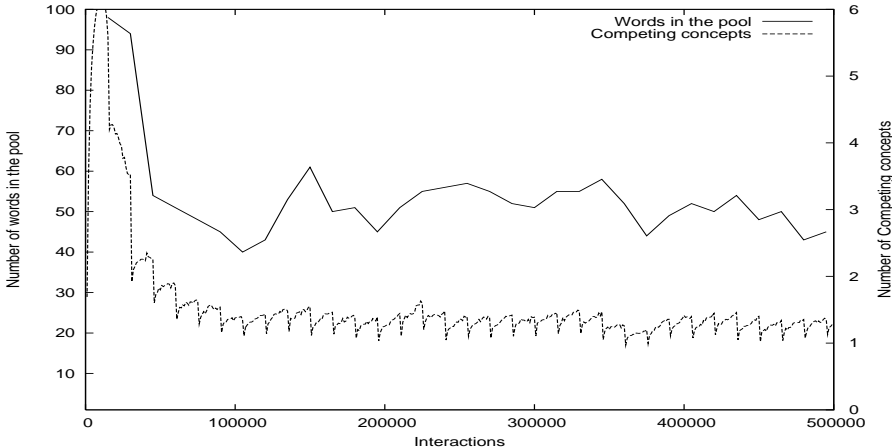


Figure 6: Plots during 500,000 interactions of the number of words in the pool and the number of competing concepts during the categorization process in a population of 30 speakers per generation in a stable environment.

One of the goals of this simulation was to investigate whether in our model the population is able to develop a lexicon from scratch. When looking at the results, no doubts can be cast on this. This “phylogenetic” acquisition of a lexicon is similar but nevertheless distinct from the ontogenic one which occurs when a new generation arrives in the population. Whereas a new generation acquires the conceptual structure and the associated lexicon very quickly, emergence of shared conceptual structure and lexicon is a longer process, lasting over several generations. Our model relies on the strength of cultural transmission of acquired knowledge from one generation to the following one.

4.3 Dynamics of the lexicon in a changing environment

Contrary to other aspects of language such as phonology or syntax that are constrained only by speakers’ physiological or cognitive structures, the lexicon is constrained by the environment it refers to through mental representations. Consequently, as the environment changes, speakers must modify their conceptual structures and thus their lexicon. This is the process to which we will now turn. As mentioned in section 3.4, the environmental evolutions that we will consider are changes in the position of clusters. In order to keep things tractable, the position of only one cluster will be changed here. The parameter we will vary is the speed of the transition from the initial to the final state which is represented in figure 7.

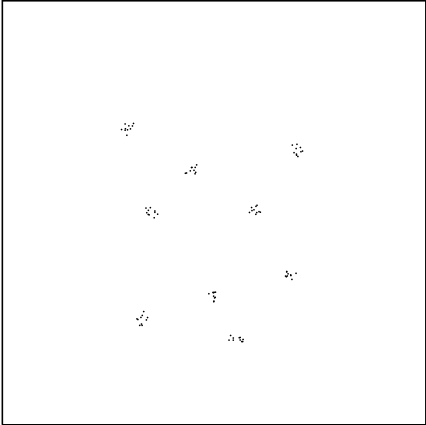


Figure 7: Final positions of the clusters after the change.

4.3.1 Simulation 2

In this simulation, the population is placed in an environment that will change from the initial to final conditions in 10,000 interactions, from the 100,000th to the 110,000th. Figure 8 shows the evolution of the success and the transmitted knowledge for 300,000 interactions.

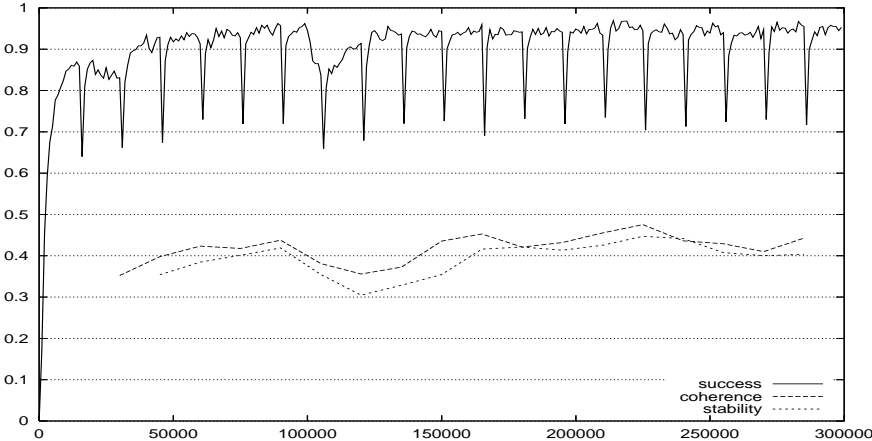


Figure 8: Plots during 300,000 interactions of the success, the coherence and the stability of a population of 30 speakers per generation in an environment changing in 10,000 interactions.

In these conditions success is perturbed during the cluster position transition but recovers its prior level just after the transition. Coherence drops from the 105,000th interaction to the 135,000th, as does stability from the 105,000th to the 150,000th. Coherence is low for the 3 generations that experienced the transition,

Figure 9 presents the mean conceptual space of the generations that died at the 90,000th, 105,000th, 120,000th, 135,000th and 150,000th interactions.

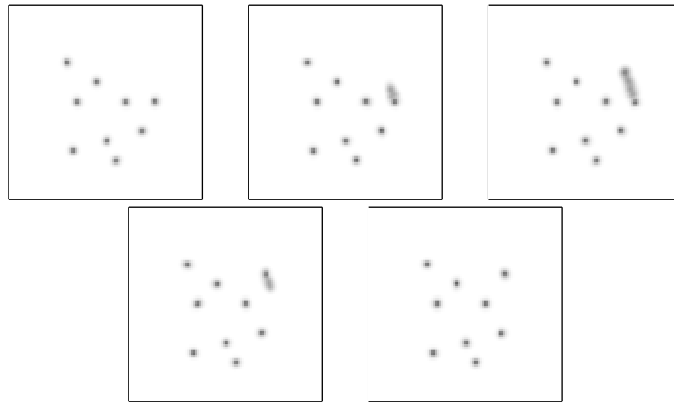


Figure 9: Mean conceptual space of the generation that died at the 90,000th, 105,000th, 120,000th, 135,000th and 150,000th interactions.

Even if the transition is shorter than a generation's lifetime, three of them have experienced it, and this perception has marked their conceptual structure. These marks of transition indicate the transition long after it ends, and much longer than the communicative success does. Because of these traces of an environment that does not exist anymore, speakers cannot develop a conceptual structure similar to their parent's, and this causes the stability to drop.

The lexicon of the population is again composed of 9 basic words shared by all the speakers, and a set of satellite words. The basic word used for the changed cluster at the end of the simulation is created between the 108,000th and 108,500th interactions. As long as the transition is going on the population invents new words, and lexicalizes one of them only after the transition it is over. Figure 10 shows the average number of competing concepts during categorization and the number of word in the pool. It indicates that this lexical innovation period is also characterized by a higher synonymy level, which is the cause of the low coherence.

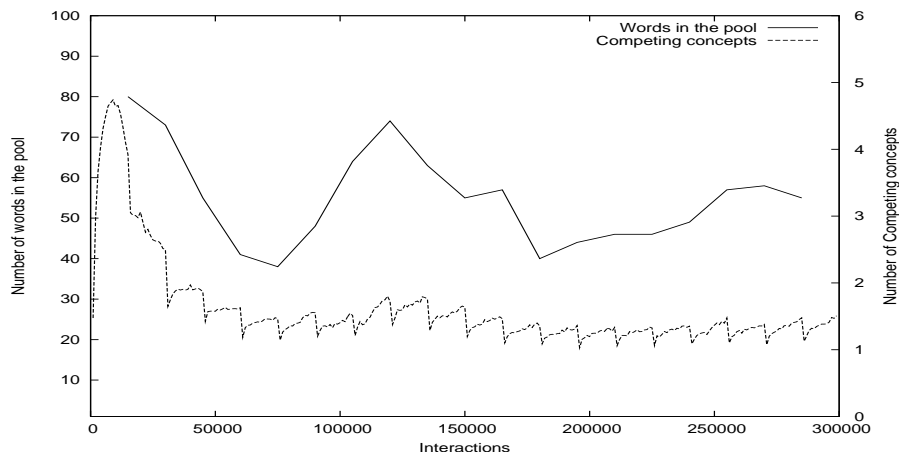


Figure 10: Plots during 300,000 interactions of the number of words in the pool and the number of competing concepts during the categorization process in a population of 30 speakers per generation in an environment changing in 10,000 interactions.

4.3.2 Simulation 3

The next simulation is exactly identical to the previous one, except that the transition between the initial and final position of the cluster is not as rapid. We still seek semantic change, *i.e.* changes of the representation associated with a word, and neither word loss nor lexical innovation as observed in the previous simulation fall into this category. The hypothesis behind this simulation is that if the transition is stretched over several generations, semantic change may occur. Figure 11 shows the evolution of the success and the knowledge transmission for 500,000 interactions with a transition occurring between the 100,000th and the 200,000th interactions.

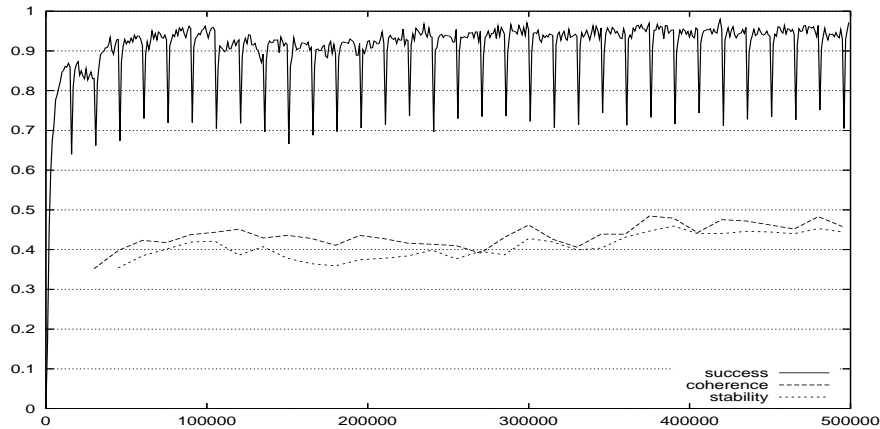


Figure 11: Plots during 500,000 interactions of the success, the coherence and the stability of a population of 30 speakers per generation in an environment changing in 100,000 interactions.

Success and stability are both lower than their normal level during transition. Coherence is less affected.

The lexicon at the end of the simulation has a similar pattern than in the previous: 9 basic words are shared by all the speakers. Figure 12 is a plot of the synonymy in the population. Again the transition induces more synonymy in the lexicon. The word for the changed cluster appears in the population between the 173,000th and 173,500th interaction, the population opting again for lexical innovation rather than changing the meaning of the word used for the cluster before the transition. Nevertheless, at the 173,500th interaction, the position of the cluster was not the final one, and thus representations associated to the word at this moment were different from these associated to it after the transition. This is a case of semantic change.

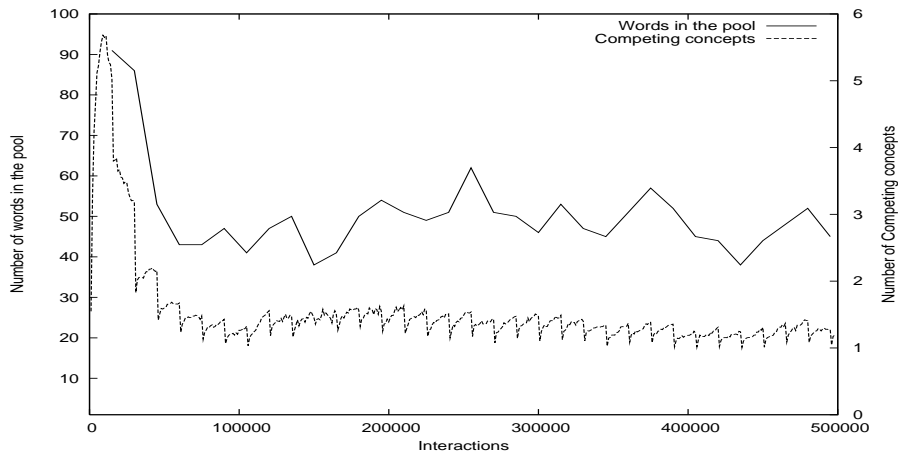


Figure 12: Plots during 500,000 interactions of the number of words in the pool and the number of competing concepts during the categorization process in a population of 30 speakers per generation in an environment changing in 100,000 interactions.

4.3.2 Simulation 4

This last simulation with simple environmental evolution is similar to the two previous in all respects, expect for the number of interactions needed for the transition, which is now set to 500,000. Figure 13 shows the evolution of the success and the transmitted knowledge for 700,000 interactions with a transition occurring between the 100,000th and the 600,000th interactions.

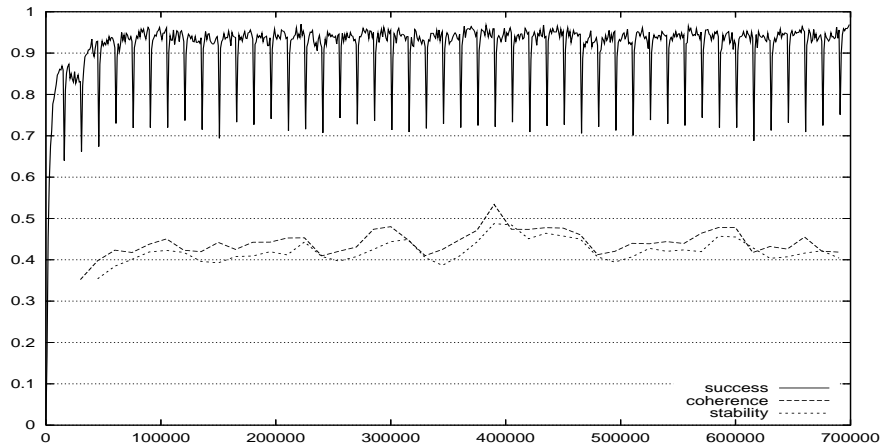


Figure 13: Plots during 700,000 interactions of the success, the coherence and the stability of a population of 30 speakers per generation in an environment changing in 500,000 interactions.

Success, coherence and similarity are not affected by the transition. The reason is that the change is so gradual that speakers are not aware of it. Figure 14 present the mean conceptual space of generations that died at the 105,000th, 300,000th and 600,000th interactions. Contrary to Figure 9, no traces of environmental changes are observed.

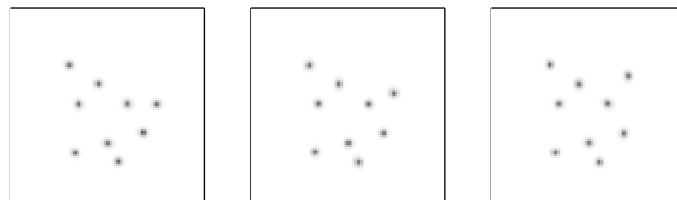


Figure 14: Mean conceptual space of the generation that died at the 105,000th, 300,000th and 600,000th interactions.

If we turn to the lexicon of the population at the end of the simulation, the situation differs from the previous simulation. There are still 9 basic words plus satellite words, but the basic word used for the changed cluster is created before the 500th interaction, *i.e.* at the very beginning of the simulation, simultaneously with the other basic words: the concepts associated with it in the successive generations represent the different stages of the evolution of the cluster, evolving with it. As figure 15 indicates, synonymy is not affected by this transition.

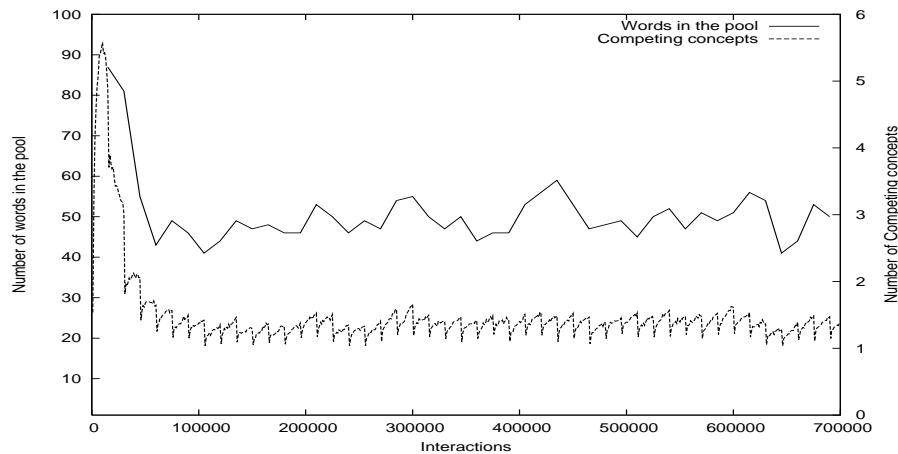


Figure 15: Plots during 700,000 interactions of the number of words in the pool and the number of competing concepts during the categorization process in a population of 30 speakers per generation in an environment changing in 500,000 interactions.

4. Discussion

4.1 The model itself

Evolutionary linguistics, *i.e.* computers simulations for the evolution of language, is an approach that has exponentially grown in the last few years. It uses the power of computers to allow us to build virtual labs in which we can test hypothesis that would have been only speculation otherwise.

Our model follows along the same lines as many others related models that include some semantics (Steels 1998; Hashimoto 1998; Hurford and Kirby 2001; Smith 2003; Vogt 2003). However, most of these models suffer from a double grave vice already mentioned by Smith (2003) and Vogt (2003): communication acts upon a predefined semantics and meanings are explicitly transmitted. However, as explained in section 2, not only meaning is grounded and then not predefined, but it is also private to speakers and cannot then be explicitly transmitted without some kind of mind reading or telepathy. This telepathical prerequisite is a hypothesis put in the models that obviously contradicts reality. Moreover, as noted by Smith (2003), if both the meaning and the signal are explicitly transferred in communication, then the signal does not convey the meaning anymore, and thus becomes useless.

According to Smith (2003), in order to obtain a communication without explicit meaning transfer

“there must be at least three separate levels of representation in the model: the external, public world, a private, agent-specific internal semantic representation, and a set of signals, which can again be publicly observed. The mapping between the public and the private sections of the model must be specific to each agent and unobservable to the others [...].”

Our model meets these requirements, and to our knowledge, only few models (Steels 1998; Smith 2003; Vogt 2003) do, exhibiting as in our case a co-evolution of lexicon and conceptual structure.

However, all these models build private meanings by successive division of the meaning space, leading to concepts that represent clear cut classical categories, without any possible way of exhibiting prototype effects. This drawback is not present in our model in which speakers build the semantics of their lexicon in a Roschian way.

We have here a model that both avoids the mind reading problem³ found in most of models and represents categories in a much more natural way than the models discussed above.

4.2 The simulations

The results from the simulations we ran with our model show that populations can build a lexicon from scratch and can transmit it from generation to generation. This lexicon is efficient and permits successful communicative interactions between the members of the population.

In all the simulations, the lexicon that is developed is composed of two sets of words: basic words, shared by all the speakers and transmitted through generations, and satellite words, used only by a part of the population and that have a limited lifetime in the lexicon. Together, all these words constitute a lexical pool in which new speakers select their vocabulary. Given that the concepts which are developed by speakers match clusters of objects, and given the number of words in the pool (typically 50) and the number of clusters (9), there is a considerable amount of synonymy in the pool, and thus considerable competition for the selection by the speakers.

Several factors can explain how this selection operates. First, it is worth noting that speakers select a limited number of words out of the pool. This is due to the cognitive architecture of the speakers, and more specifically to the *winner-takes-all* strategy of rewarding successful concepts. When an agent has many competing concepts for the categorization of an object, the winner, if the communication is successful, has its degree of confidence increased, while other competing concepts have their degree of confidence decreased. The winner is then more likely to win the next categorization, decreasing again the degree of confidence of others competitors, which may finally be forgotten by the speaker. Synonymy is thus rejected by the members of the population, who do not select all the words of the pool. A similar result has been obtained by Hurford (2003) who argued that synonymy is rare because of production constraints rather than on comprehension constraints.

Another factor that explains the selection of lexical items by speakers is their frequency. As soon as the set of basic words is established, since all speakers know them they are used much more frequently than satellite words with more restricted diffusions. This frequency bias toward basic words makes them much more likely to be learnt.

As mentioned in section 4.3, lexicon is not only shaped by structural, cognitive or even physiological constraints as phonology or syntax are, but also by the environment it refers to. As simulations 2 and 3 have shown, when the environment is changing, it may be the case that words in the pool are used by speakers with meanings that no longer represent the world appropriately. This fitness constraint can be strong enough to influence speakers so that they do not select those words, with the consequences that the basic vocabulary is not entirely transmitted across generations and that synonymy increases, overriding then both the cognitive constraint against synonymy and the frequency bias.

However, all these factors are in fact competing during selection, and simulation 3 and 4 give insights on this factor competition. In simulation 3, we saw that the word for the moved cluster is introduced in the lexicon at $\frac{3}{4}$ of the trajectory of the cluster. This means that during the last quarter of the trajectory, even if the meaning of this word never fits perfectly its referents that are still changing, it is still selected from the pool by the learners. The

³ Our model avoids mind reading in the sense that it evacuates explicit meaning transfer. But in fact, it faces the mind reading problem in the sense of Quine (1960): we assume that the learner automatically identifies the referent indicated by the teacher, while in real world this ambiguity about the referent is in fact present in many cases.

meaning they associate to this word is then different from their parents', adapting their conceptual structure to their environment. The word experiences then a semantic change.

In simulation 4, the change is so slow that the word that refers to the cluster always fits its referents quite well. The pressure of the fitness constraint is then very weak, and the frequency bias makes the learner select the basic word. They nevertheless build a meaning for it slightly different from their parents', the word experiencing then a semantic change too.

5. Conclusion

It seems that the universe is such that the complex entities which it harbors cannot be stable and have to evolve. These evolutionary processes are fascinating when we look at complex systems such as life, language or culture. It is amazing to see that even if these processes are definitely distinct, robust parallels can be drawn between them.

In this paper, using Mufwene's (2001) metaphor *language as species*, we have shown that the very cultural process of language evolution is affected by the major constraint in natural selection, viz., fitness to the environment. In the case of language, it is just one constraint among others, and all compete to drive language evolution.

The model we developed solves the explicit meaning transfer problem, speaker's concepts being completely private. Moreover their concepts have a structure that takes into account the Roschian insights about categorization. But this model is nevertheless far from perfect since it lacks important aspects of language such as polysemy or compositionality. It has its own features that now belong to the models' feature pool, and we hope that evolution will play its role and that future models will select the good ones.

References

- Ben Hamed, Mahé; and Darlu, Pierre. In press. "Gènes et langues : une longue histoire commune ? ". In: de Cheveigné, Suzanne ; and Joulain, Frédéric. (eds), *Les natures de l'homme ou comment sortir du partage nature/culture?* Paris: Odile Jacob.
- Berlin, Brent; and Kay, Paul. 1969. *Basic color terms*. Berkeley and Los Angeles: University of California Press.
- Cangelosi, Angelo; and Parisi, Domenico. 2001. "Computer simulation: a new scientific approach to the study of language evolution". In: Parisi, Domenico; and Cangelosi, Angelo (eds), *Simulating the evolution of language* 3-28. London: Springer Verlag.
- Darwin, Charles R. 1859. *On the origin of species by means of natural selection*. London: John Murray.
- de Boer, Bart. 2000. "Self organization in vowel systems". *Journal of Phonetics* 28(4): 441–65.
- de Saussure, Ferdinand. 1915. *Cours de linguistique générale*. Paris: Payot.
- Dubois, Didier; and Prade, Henri. 1978. "Operations on fuzzy numbers". *International Journal of Systems Science* 9: 613-26.
- Fillmore, Charles J. 1982. "Frame semantics". In: Linguistic society of Korea (ed.), *Linguistics in the morning calm* 111-137. Seoul: Hanshin Publishing Co.
- Gärdenfors, Peter. 2000. *Conceptual spaces: the geometry of thought*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Hashimoto, Takashi. 1998. "Dynamics of internal and global structure through linguistic interactions". In: Suchman, Jaime S., Conte, Rosario; and Gilbert, Nigel (eds), *Multi-agent systems and agent-based Simulations* 134-39. Berlin: Springer Verlag. [*Lecture Notes in Artificial Intelligence* 1534]

- Hurford, Jim. 2003. "Why synonymy is rare: fitness is in the speaker". In: Banzhaf, Wolfgang; Christaller, Thomas; Dittrich, Peter; Kim, Jan T.; and Ziegler Jens (eds), *Advances in artificial life: proceedings of the 7th European conference on artificial life (ECAL)* 442-51. Berlin: Springer Verlag. [Lecture Notes in Artificial Intelligence 2801]
- Hurford, Jim; and Kirby, Simon. 2001. "The emergence of linguistic structure: an overview of the iterated learning model". In: Parisi, Domenico; and Cangelosi, Angelo (eds), *Simulating the evolution of language* 122-47. Berlin: Springer Verlag.
- Kaufman, Arnold.; and Gupta, Madan M. 1984. *Introduction to fuzzy arithmetic: theory and applications*. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Kirby, Simon. 2000. "Syntax without natural selection: how compositionality emerges from vocabulary in a population of learners". In: Knight, Chris; Studdert-Kennedy, Michael; and Hurford, Jim (eds), *The evolutionary emergence of language: social function and the origins of linguistic form* 303-23. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lakoff, George, P. 1987. *Women, fire, and dangerous things: what categories reveal about the mind*. Chicago: University of Chicago Press.
- Langacker, Ronald W. 1987. *Foundations of cognitive grammar I: theoretical prerequisites*. Stanford: Stanford University Press.
- Mareš, Milan. 1994. *Computation over fuzzy quantities*. Boca Raton: CRC Press.
- Montague Richard. 1973. "The proper treatment of quantification in ordinary English". In: Hintikka, Jaakko., (ed.), *Approaches to natural language* 221-42. Dordrecht: Reidel.
- Mufwene, Salikoko. 2001. *The ecology of language evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Parisi, Domenico. ; and Cangelosi, Angelo (eds). 2001. *Simulating the evolution of language*. Berlin: Springer Verlag.
- Pinker, Steven; and Bloom, Paul. 1990. "Natural language and natural selection". *Behavioral and Brain Sciences* 13(4): 707-84.
- Quine, Willard. 1960. *Words and objects*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Rosch, Eleanor.; and Mervis, Carolyn. 1975. "Family resemblances: studies in the internal structure of categories". *Cognitive Psychology* 7: 573-605.
- Schleicher, August. 1863. "La théorie de Darwin et la science du langage: lettre ouverte à M. le Dr. Ernest Haeckel". In: Tort, Patrick. 1980. *Evolutionnisme et linguistique* 59-78. Paris: Librairie philosophique J. Vrin.
- Smith, Andrew. 2003. "Intelligent meaning creation in a clumpy world helps communication". *Artificial Life* 9(2): 559-74.
- Steels, Luc. 1998. "The origins of ontologies and communication conventions in multi-agent systems". *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 1(2): 169-94.
- Tort, Patrick. 1980. *Evolutionnisme et linguistique*. Paris: Librairie philosophique J. Vrin.
- Vogt, Paul. 2003. "Iterated learning and grounding: from holistic to compositional languages" In: Kirby, S. (ed.), *Language evolution and computation, proceedings of the workshop/course at ESSLLI*.
- Wittgenstein, Ludwig. 1922. *Tractatus logico-philosophicus*. London: Routledge and Kegan Paul.
- Wittgenstein, Ludwig. 1953. *Philosophical investigations*. New York: Macmillan.