

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)

¹signal 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

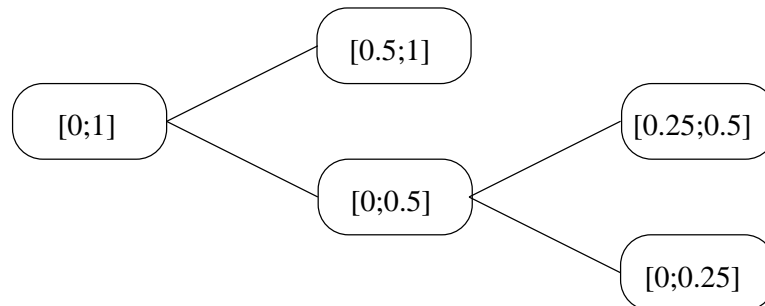


Figure 3.1 – Exemple d’arbre de discrimination. Chaque nœud représente un intervalle de la gamme de valeurs, et donc une catégorie.

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.

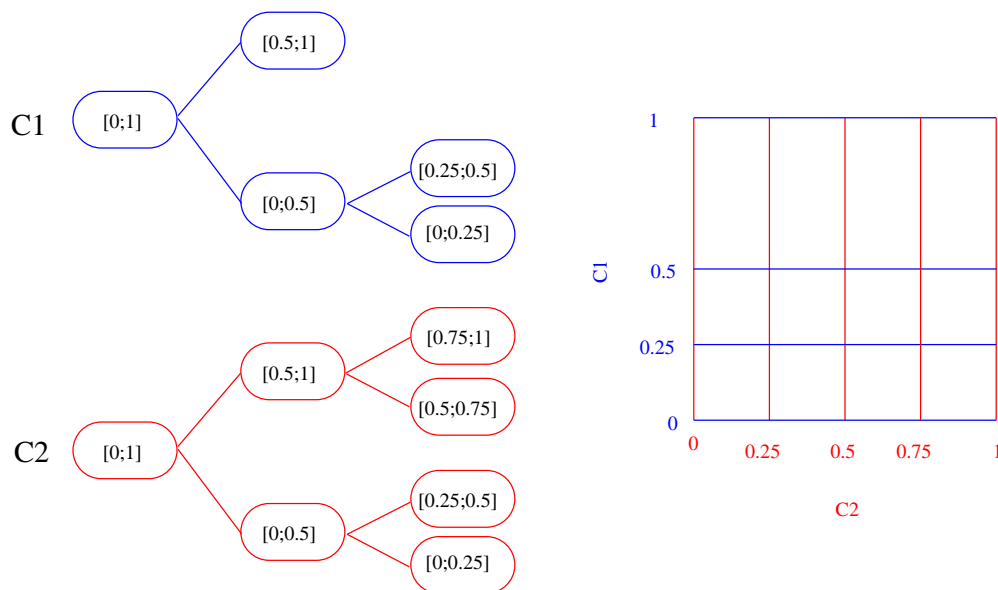


Figure 3.2 – Espace conceptuel bidimensionnel associé aux arbres de discrimination de deux canaux.

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

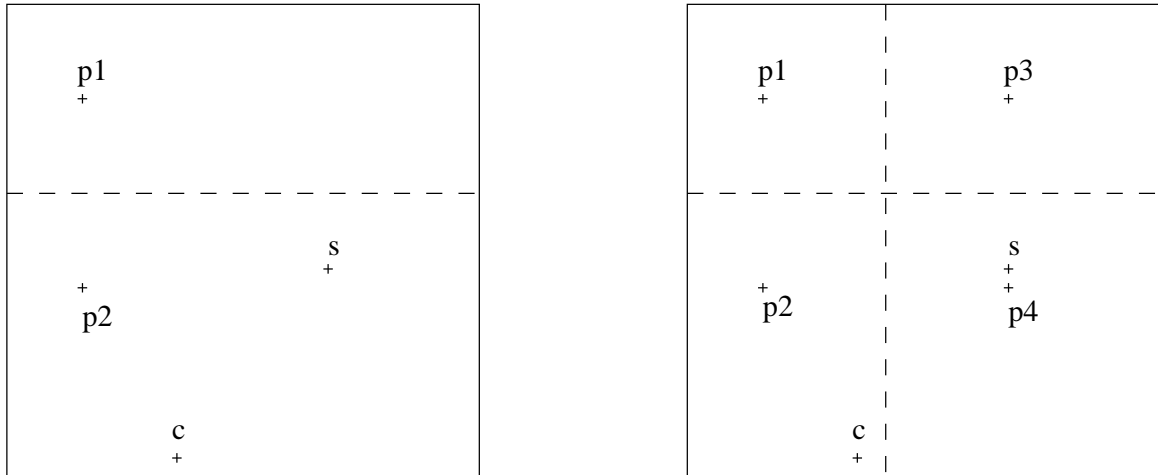


Figure 3.3 – Un espace conceptuel bidimensionnel avant la création de nouveaux prototypes (à gauche) et après (à droite). Initialement, l'espace comporte deux prototypes, $p1$ et $p2$ de coordonnées respectives $(0.16, 0.8)$ et $(0.16, 0.4)$. Le sujet de l'interaction s a pour coordonnées $(0.68, 0.44)$ 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.

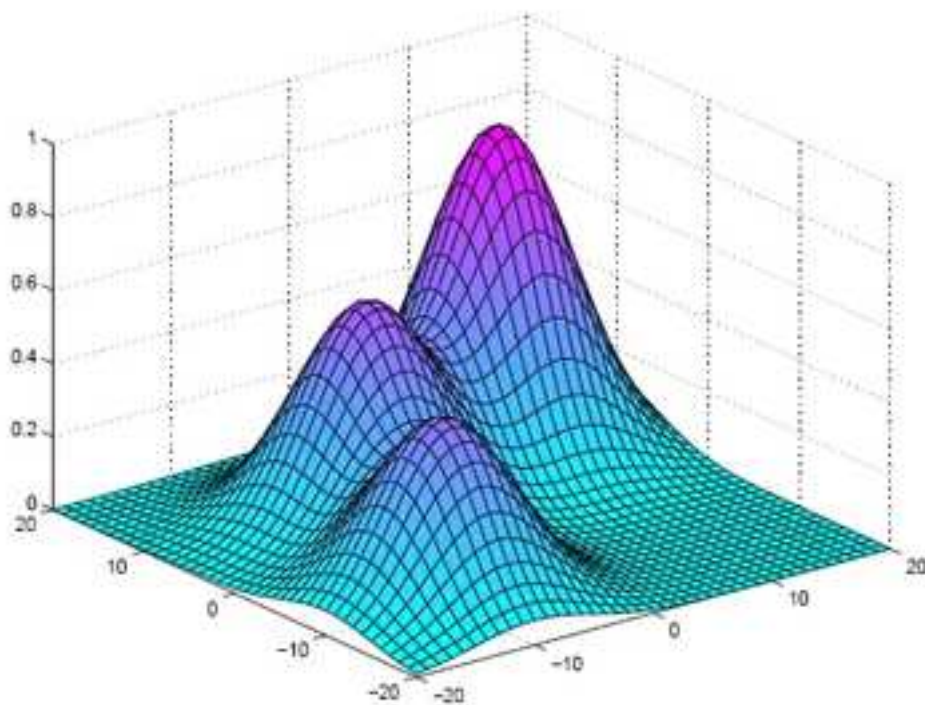


Figure 3.4 – Réponse d'un réseau à trois neurones à trois fonctions de base radiale définissant une catégorie dans un espace bidimensionnel. Chaque neurone répond préférentiellement en un point de l'espace et ce de manière décroissante en s'en éloignant. La réponse du réseau est obtenue par une somme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

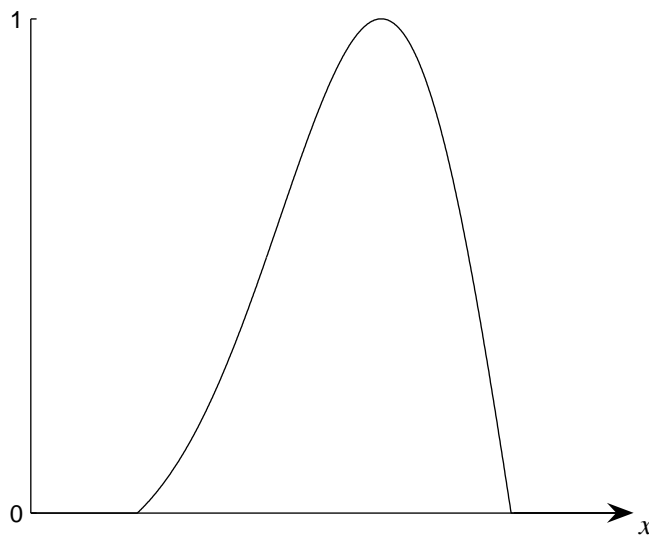


Figure 3.5 – Exemple de fonction caractéristique d'un nombre flou

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

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

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

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

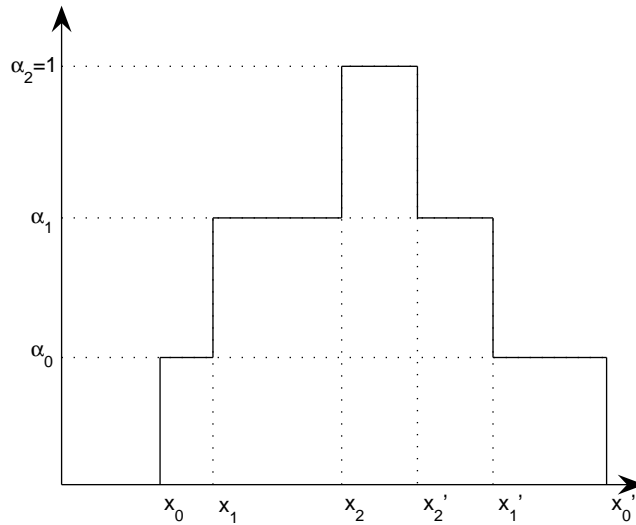


Figure 3.6 – Fonction caractéristique μ_F d'un nombre flou F définie par $\{([x_0; x'_0], \alpha_0), ([x_1; x'_1], \alpha_1), ([x_2; x'_2], \alpha_2)\}$

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 .

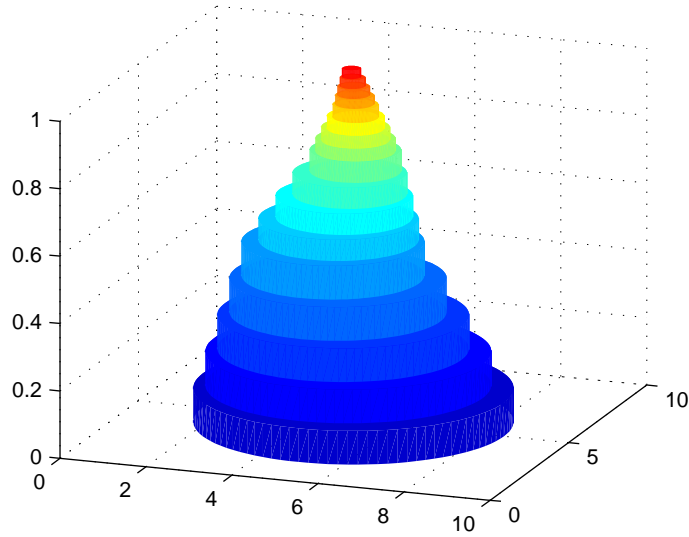


Figure 3.7 – Fonction caractéristique d’un nombre flou dans \mathbb{R}^2 définie par un ensemble d’ α -coupes

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

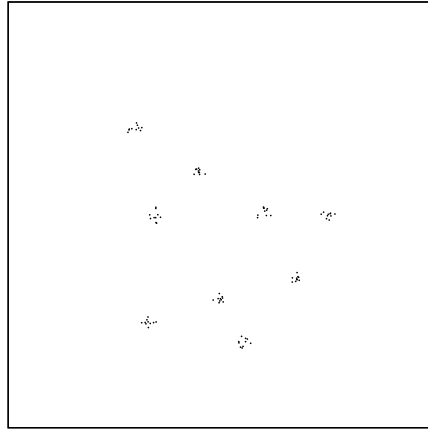


Figure 3.8 – Environnement des agents

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 $\beta_2 = d - \beta_1$.

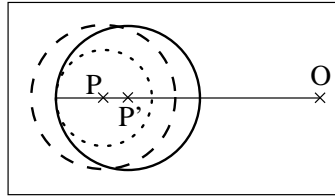


Figure 3.9 – α -coupe de centre P avant son extension vers l'objet O (pointillés), après modification de son rayon (tirets) et après modification de son centre (ligne pleine).

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.

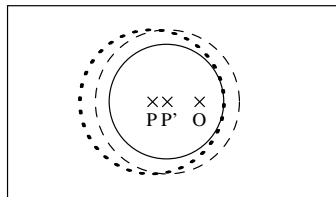


Figure 3.10 – α -coupe de centre P avant son affinement autour de l'objet O (poin-tillés), après modification de son centre (tirets) et après modification de son rayon (ligne pleine).

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.

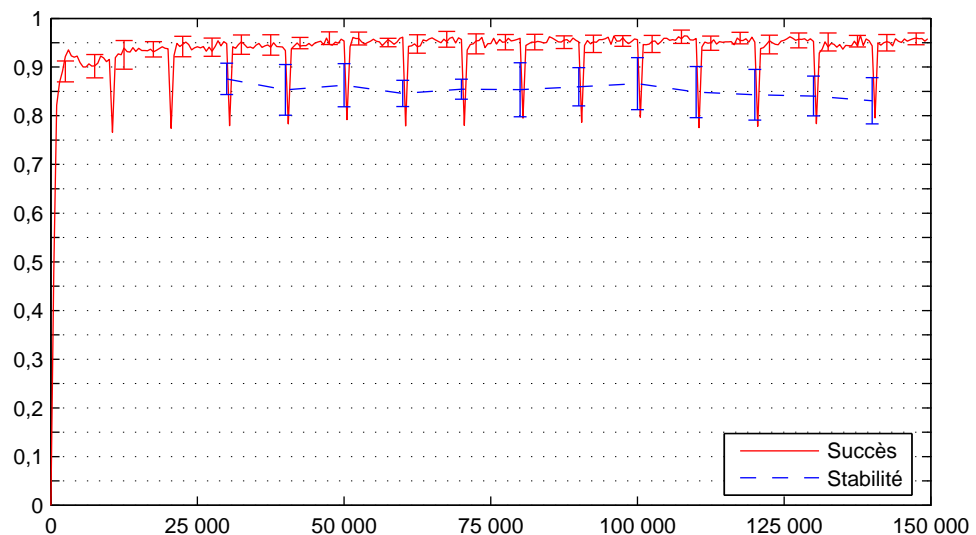


Figure 3.11 – Évolution des moyennes sur les 10 simulations du succès et de la stabilité au cours des 150000 interactions.

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.

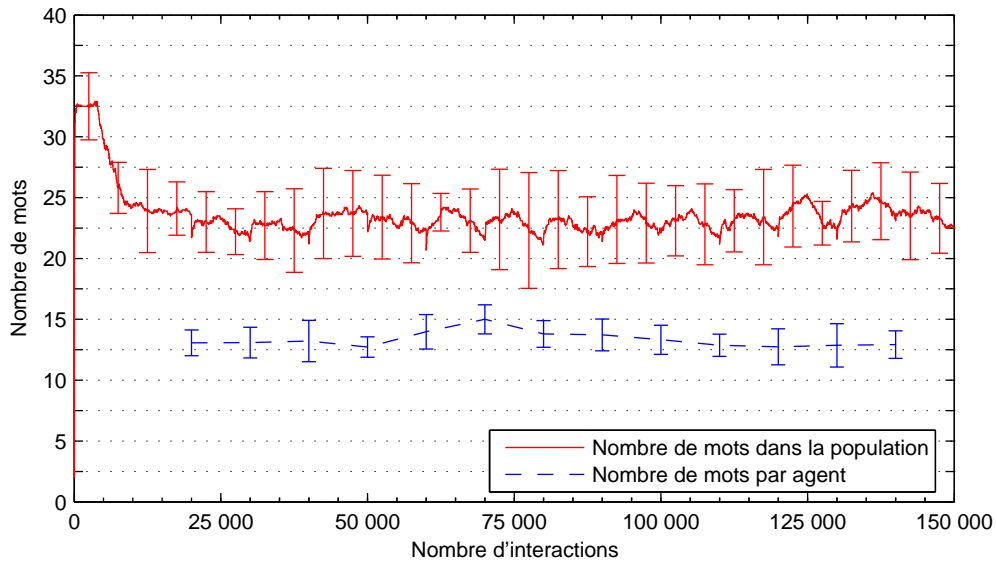


Figure 3.12 – Nombre de mots dans la population et nombre moyen de mots connus par chaque agent.

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.

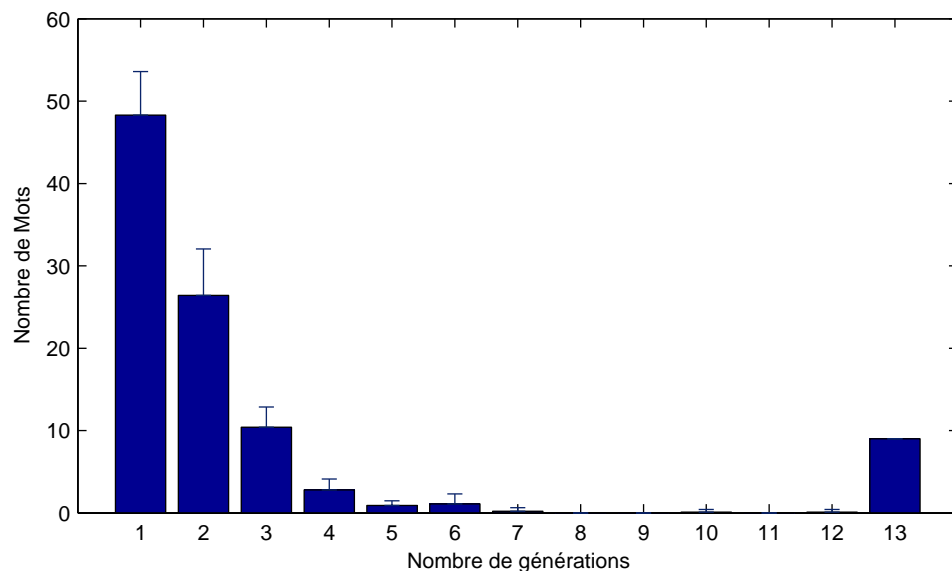


Figure 3.13 – Durée de vie des mots dans la population.

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.

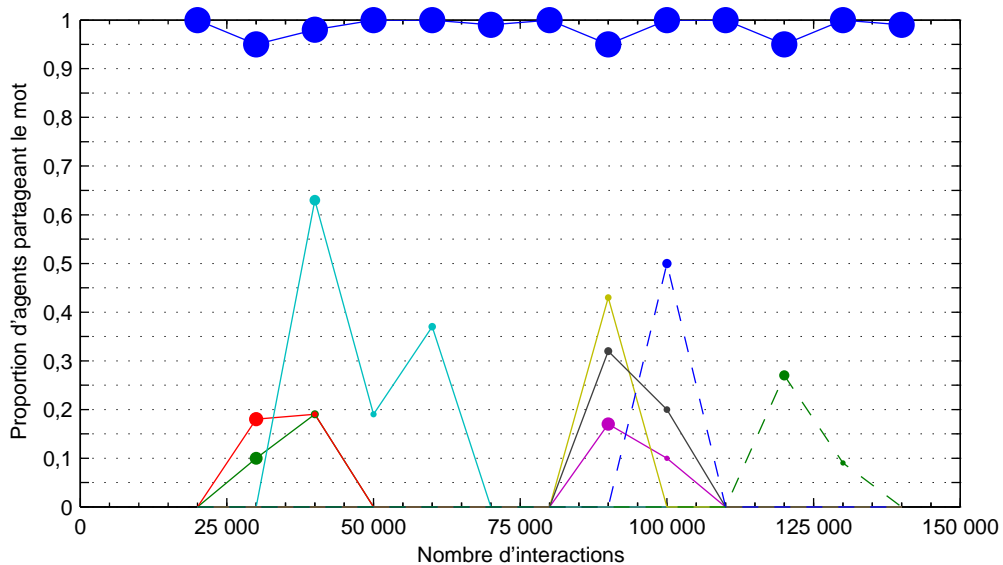


Figure 3.14 – Mots en compétition pendant une des 10 simulations pour désigner un des amas d'objets. Chaque courbe représente la diffusion d'un mot dans la population. Le diamètre des points est proportionnel au score de confiance moyen. La courbe du haut est celle du mot du vocabulaire de base, les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

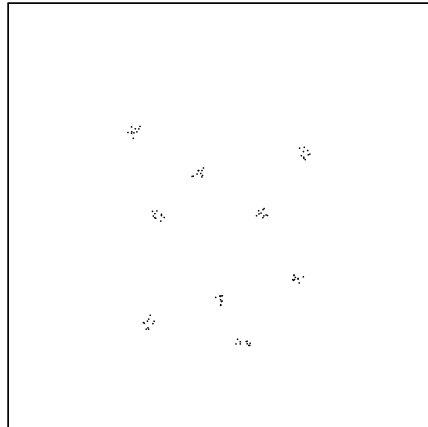


Figure 3.15 – État final de l'environnement des agents lors des expériences 2 à 8. L'amas en haut à droite s'est déplacé par rapport l'état initial (figure 3.8)

	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

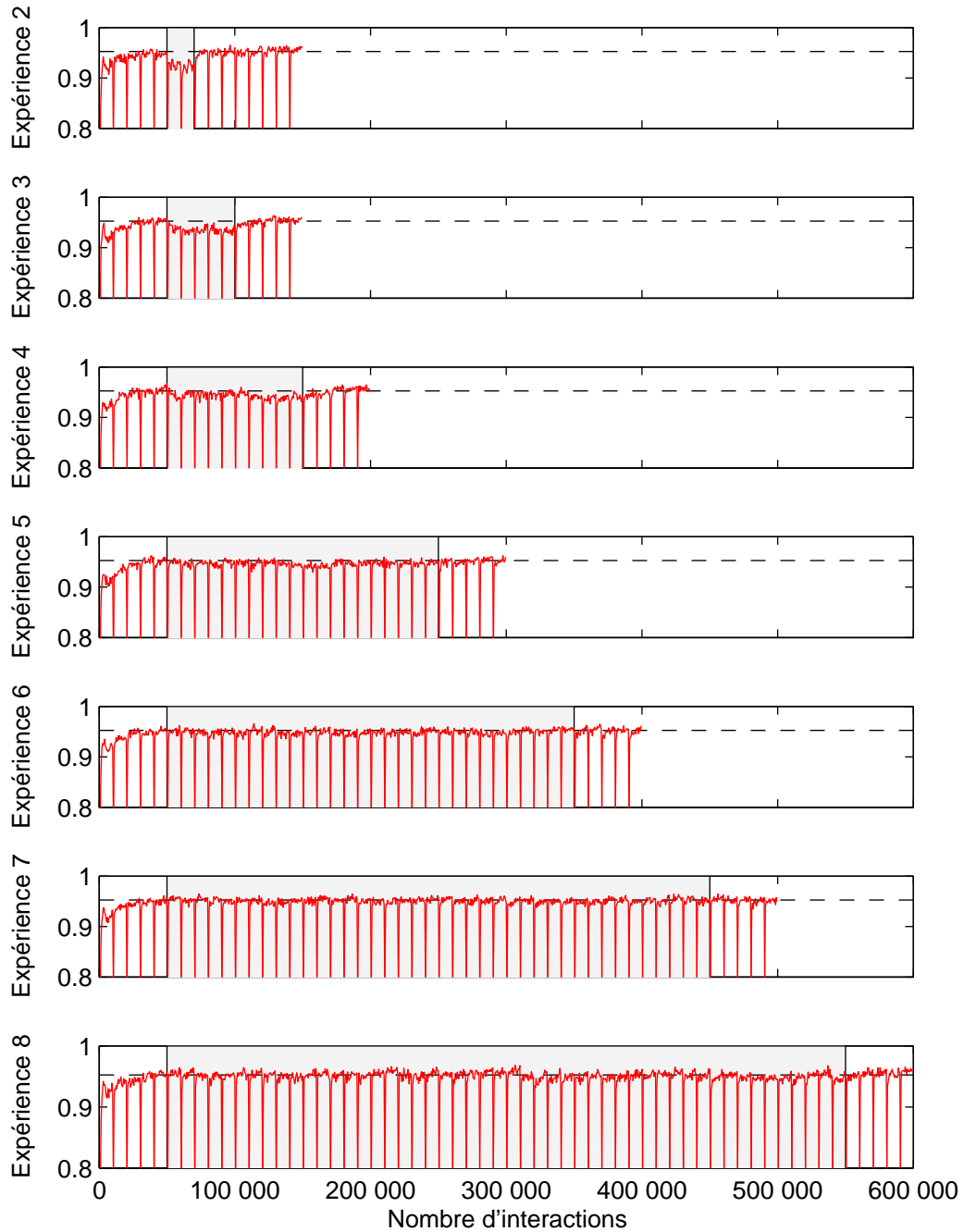


Figure 3.16 – Évolution du succès lors des expériences 2 à 8. La ligne en pointillé représente la valeur moyenne du succès (hors période de renouvellement) lors de l'expérience 1 : 0.952. Les changements dans l'environnement ont lieu dans les zones grisées. Les barres d'erreur ne sont pas indiquées pour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

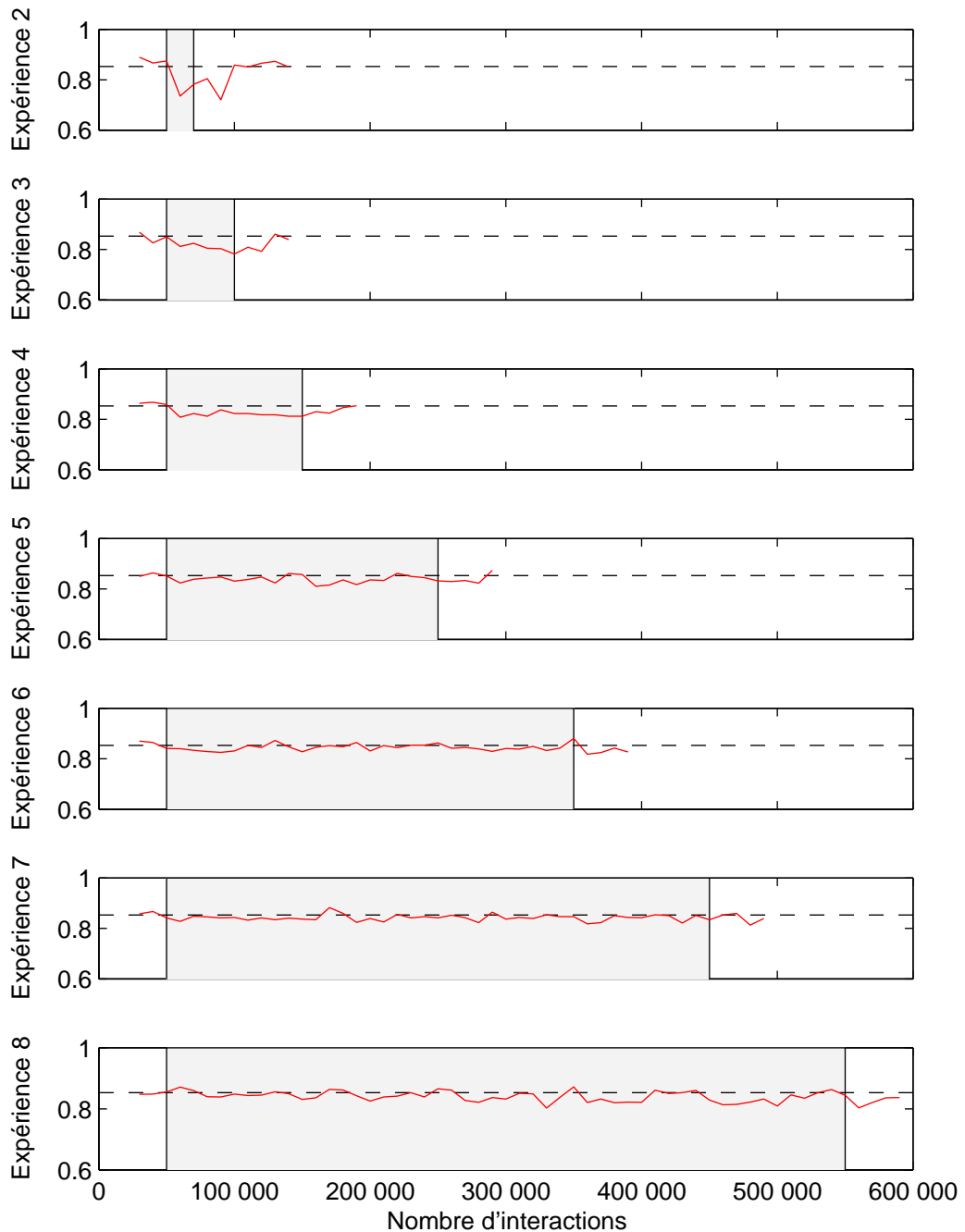


Figure 3.17 – Évolution de la stabilité lors des expériences 2 à 8. La ligne en pointillé représente la valeur moyenne de la stabilité lors de l'expérience 1 : 0.853. Les changements dans l'environnement ont lieu dans les zones grisées. Pour des raisons de lisibilité, les barres d'erreur ne sont pas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

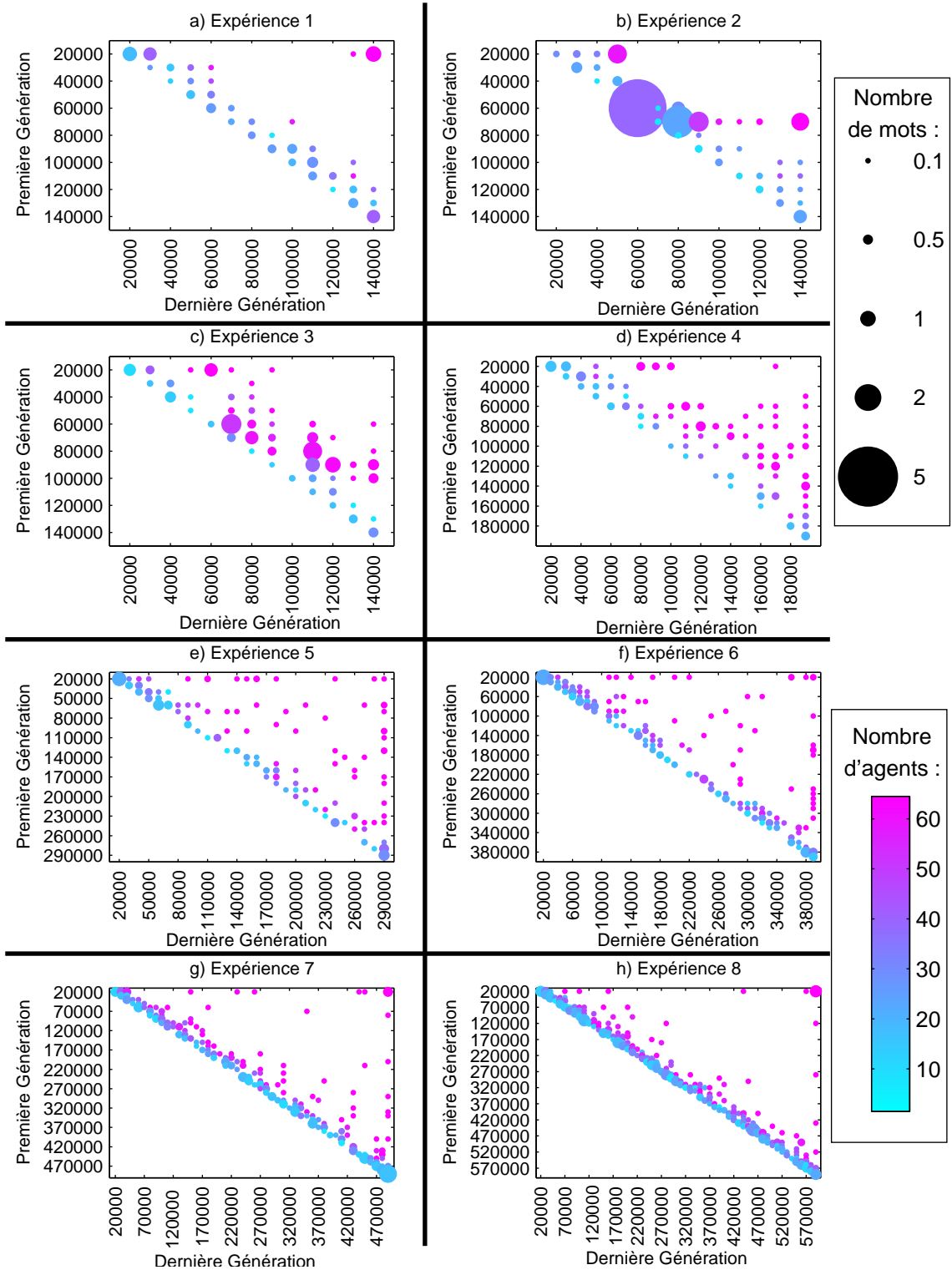


Figure 3.18 – Représentation de la dynamique des lexiques lors des expériences 1 à 8. Voir les explications section 3.2.2.

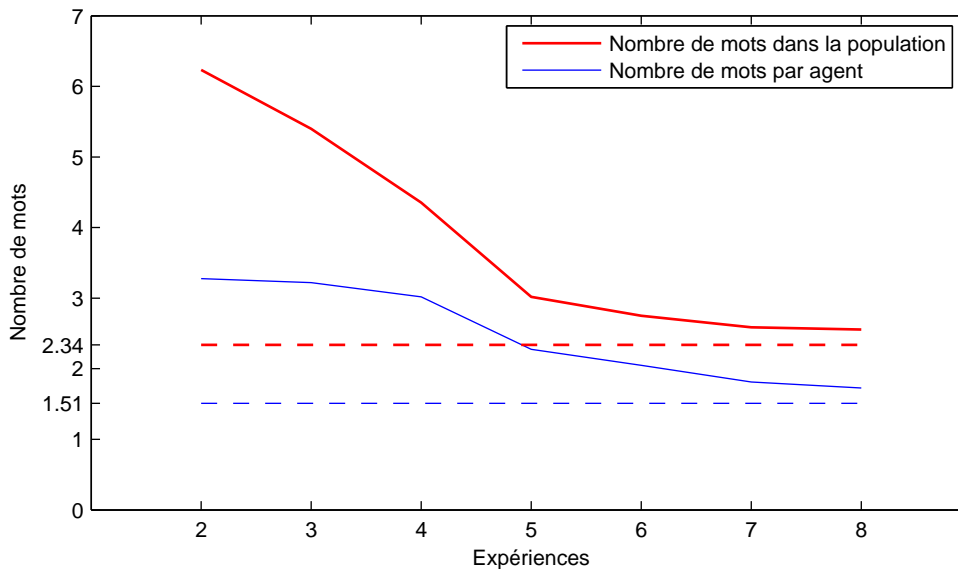


Figure 3.19 – Synonymie pour désigner l’amas d’objets en changement lors des expériences 2 à 8 pour les générations d’agents ayant vécu le changement. Les lignes en pointillé rouge et bleue représentent respectivement le nombre moyen de mots dans la population et le nombre moyen de mots par agent lors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