

Modélisation de l'émergence de spécificités du langage humain

Bernard Victorri
Lattice-CNRS, ENS
Bernard.Victorri@ens.fr

Introduction

Les langues possèdent un certain nombre de propriétés qui sont spécifiques du langage humain : elles le distinguent à la fois des autres systèmes de communication animale, et des autres modes d'expression et de communication existant dans les sociétés humaines. Ces propriétés relèvent de tous les niveaux linguistiques : phonologie, morphologie, syntaxe, lexique, etc. Comment ont-elles pu émerger, et pourquoi ?

Notons d'abord qu'il est peu vraisemblable que ces propriétés soient de nature accidentelle, au sens où elles seraient le résultat fortuit d'une histoire particulière qui aurait pu tout aussi bien faire émerger des propriétés très différentes. En effet, les langues évoluent à un rythme relativement rapide, et ce depuis plusieurs dizaines de milliers d'années. Toute propriété accidentelle, qui ne correspondrait pas à un besoin essentiel du langage, n'aurait aucune raison de s'être maintenue dans l'ensemble des langues humaines au cours de ce processus.

On peut donc à bon droit supposer que toute propriété « universelle », que l'on retrouve dans toutes les langues, est en même temps « essentielle », autrement dit déterminée par les contraintes générales dans lesquelles s'est produite l'émergence du langage en imposant de manière nécessaire l'apparition de ces propriétés.

Quelle est la nature de ces contraintes ? Sont-elles principalement d'ordre « fonctionnel », c'est-à-dire liées à l'utilisation du langage comme mode de communication, ou principalement d'ordre « cognitif », c'est-à-dire liées aux capacités et au fonctionnement du cerveau humain ? Ces questions sont directement en prise avec les débats théoriques actuels en linguistique sur la place du langage dans les activités cognitives humaines. Ainsi les approches « cognitivistes » classiques (Fodor, 1986, Pinker 1994, Chomsky 1995, et, dans une moindre mesure, Jackendoff 1997) font-elles l'hypothèse d'un système cognitif spécifique du langage, « organe du langage », qui doit rendre compte à lui seul des propriétés des langues. A l'opposé, les théories « fonctionnalistes » (Dik 1997, Givón 1995, Halliday 1994, Lambrecht 1994) mettent de l'avant les contraintes informationnelles et communicationnelles imposées par l'activité langagière. Entre ces deux extrêmes les grammaires cognitives (Langacker 1987-1991, Talmy, 2000, Fauconnier 1997) insistent sur des mécanismes cognitifs généraux, non spécifiques du langage, tandis que les linguistiques énonciatives (de Benveniste 1974 à Ducrot 1984 et Culioli 1990-1999, cf. aussi Victorri, *à paraître*) font jouer un rôle fondamental aux aspects discursifs et intersubjectifs de la parole... Pour aborder ce problème, un certain nombre de chercheurs se sont lancés dans des entreprises de modélisation de l'émergence de propriétés précises du langage. La modélisation informatique permet de réaliser des systèmes simples d'interactions entre agents, dans lesquels on introduit un certain nombre de contraintes et l'on observe les propriétés du système de communication qui se stabilisent au cours des échanges. On dispose ainsi de modèles expérimentaux, modifiables à volonté, qui représentent de manière très simplifiée les interactions langagières entre agents et les processus d'acquisition d'une langue par ces agents. L'objectif essentiel de ces travaux n'est pas de modéliser de façon « réaliste » ces phénomènes hautement complexes, mais de rechercher les conditions minimales dans lesquelles peuvent émerger les propriétés linguistiques auxquelles on s'intéresse.

Le statut de ces modèles est donc essentiellement épistémologique : ils permettent de valider (ou d'invalider) une réflexion théorique, en fournissant des exemples de systèmes dans lesquels émergent ou non les propriétés étudiées. Ainsi, supposons que l'on veuille tester une

hypothèse théorique du type « la contrainte C est nécessaire et suffisante pour l'apparition de la propriété P ». De manière tout à fait « popperienne », on peut réfuter cette hypothèse en construisant des modèles qui font émerger la propriété P en l'absence de la contrainte C, ou qui ne la font pas émerger alors que la contrainte est présente. A l'inverse, de manière plus positive, on peut conforter cette hypothèse en montrant que, dans une famille assez large de modèles, l'introduction de la contrainte C est systématiquement corrélée avec la présence de la propriété P. Ce n'est bien sûr jamais une preuve stricto sensu que l'hypothèse est juste, mais l'argument sera d'autant plus convaincant que la famille de modèles sera importante, et qu'elle prendra en compte plus de facteurs dont on sait par ailleurs qu'ils correspondent à des conditions réalisées dans le langage.

Ainsi cette activité de modélisation peut se révéler extrêmement fructueuse dans les recherches sur l'origine et l'évolution du langage, à condition de bien mesurer ses limites : une fois de plus, ces modèles n'ont pas l'ambition de reconstruire les conditions exactes dans lesquelles le langage est apparu, mais, plus modestement, d'aider à évaluer le rôle potentiel de tel ou tel facteur, dans le cadre d'une réflexion théorique sur l'émergence des propriétés du langage. Comme nous allons le voir, les résultats obtenus sont déjà très significatifs, dans la mesure où ils aboutissent des conclusions non triviales, parfois même surprenantes, qui permettent à ces modèles de jouer effectivement le rôle d'aiguillon de la réflexion théorique pour lequel ils ont été conçus.

Etant donné le caractère foisonnant de ce domaine de recherche, il est pratiquement impossible d'en donner une vue exhaustive qui ne se réduise pas à un survol superficiel et plutôt frustrant. Nous avons donc choisi de nous centrer sur quelques modèles, représentatifs de l'ensemble du champ, de manière à mieux illustrer l'intérêt de ce type de recherches.

1. Émergence de propriétés lexicales

1.1. Problématique

Le lexique d'une langue est à la fois conventionnel et en constante évolution. Ce qui rend problématique ces propriétés, c'est qu'il n'existe pas d'instance de décision qui régisse le rapport entre la forme et le sens des mots (l'arbitraire du signe saussurien).

Cela constitue une singularité du langage par rapport aux autres modes de communication inventés par les humains, depuis la signalisation du code de la route jusqu'aux langages informatiques. Les conventions utilisées dans ces divers systèmes « artificiels » sont établies explicitement par des groupes d'humains qui décident du code à utiliser, et tout changement de ce code obéit au même processus de décision. Rien de tel pour le langage : l'évolution de la convention se produit « naturellement », sans qu'elle soit décidée à l'avance. Il existe bien, pour certaines langues, des dictionnaires, des grammaires, des écoles, et même, beaucoup plus rarement, des institutions comme l'Académie Française qui traitent de la langue et de son usage. Mais le rôle de ces ouvrages et de ces organisations consiste pour l'essentiel à décrire un état de fait de la langue à un instant donné, et, à de rares exceptions près (comme la décision prise à la création de l'État d'Israël de redonner à l'hébreu un statut de langue vivante), les institutions ne font qu'interférer à la marge avec le processus d'évolution des langues. De toute manière, ces phénomènes sont relativement récents, à l'échelle de l'histoire du langage, et ils ne touchent, même aujourd'hui, qu'une petite minorité de la dizaine de milliers de langues parlées de nos jours.

La « convention » qui relie le sens et la forme des unités lexicales d'une langue est donc, pour l'essentiel, un phénomène non prémédité, résultat émergent des interactions langagières entre individus d'une même communauté. Qui plus est, cette convention est en constante évolution, ce qui implique que le rapport entre la forme et le sens d'un mot est sujet à une perpétuelle renégociation entre les locuteurs d'une même langue.

Il faut aussi noter que cette convention possède deux propriétés « duales » très singulières, que l'on ne retrouve pas dans les divers autres codes inventés par les humains (cf. Victorri et Fuchs 1996). Ce sont d'une part la polysémie (capacité d'un mot à posséder plusieurs sens apparentés), et d'autre part la synonymie partielle (capacité de plusieurs mots à posséder au moins un sens en commun). Ces propriétés sont universelles (partagées par toutes les langues humaines) et essentielles : elles touchent la plus grande partie du lexique (notamment, les mots les plus fréquemment utilisés sont aussi les mots les plus polysémiques). De plus, ces propriétés s'appliquent de manière spécifique à chaque langue. L'ensemble des sens d'un mot polysémique d'une langue ne coïncide généralement pas avec l'ensemble des sens d'un mot d'une autre langue, comme en témoigne le périlleux exercice de la traduction. Il n'y a donc ni correspondance biunivoque entre forme et sens des mots d'une langue, ni correspondance biunivoque entre les lexiques de deux langues différentes.

Notons enfin que la diversité des langues au plan lexical a une conséquence importante sur les processus d'acquisition de ces lexiques. On sait que le lexique de la langue maternelle est acquis très tôt par l'enfant, bien avant son éventuel passage par l'école, et à un rythme très rapide. Cela a conduit un certain nombre d'auteurs (dans la lignée de Fodor 1975) à supposer que ce processus était entièrement sous contrôle génétique, l'enfant possédant des « concepts » innés, auxquels il lui suffirait d'associer l'étiquette fournie par le mot correspondant de la langue dans laquelle il est plongé. Cette thèse semble, telle quelle, difficilement défendable : elle ne peut rendre compte ni de la polysémie intralangue, ni la diversité interlangue des rapports forme-sens. Même si l'on admet l'hypothèse de mécanismes génétiquement programmés qui faciliteraient l'acquisition lexicale, il faut admettre que leur rôle est forcément limité. On doit faire une place plus importante à l'activité de langage elle-même dans les processus d'apprentissage.

Cet ensemble de faits amène donc à se poser les questions suivantes :

- Comment une convention lexicale peut émerger dans un groupe à partir des interactions entre agents ne possédant pas, au départ, une telle convention assurant l'intercompréhension ?
- Quels facteurs pourraient expliquer l'évolution d'une telle convention au cours du temps ?
- Y a-t-il un rapport de nécessité entre les conditions d'émergence de cette convention et les propriétés spécifiques de la relation forme-sens dans les langues (polysémie, synonymie partielle, diversité des langues) ?
- Dans quelles conditions l'acquisition de cette convention par un nouvel agent peut-elle posséder les caractéristiques que l'on observe pour l'acquisition par l'enfant du lexique de sa langue maternelle ?

Comme nous allons le voir, les travaux de modélisation menés depuis une dizaine d'années dans cette direction permettent d'éclairer ces questions : comme nous l'avons dit plus haut, ces modèles n'ont pas vocation à donner à eux seuls des réponses fermes et définitives, mais à aider à sérier les problèmes en apportant des éléments qui peuvent guider la réflexion.

1.2. Émergence d'un lexique par adaptation « génétique »

Parmi les premières recherches dans ce domaine, c'est sans doute le travail de Werner et Dyer (1991) qui a eu le plus grand impact. Ces chercheurs ont en effet montré, avec un dispositif assez simple, qu'un lexique rudimentaire pouvait émerger dans une population d'agents à la seule condition que ce lexique joue un rôle « vital » pour la perpétuation de cette population au cours du temps. Le système conçu par Werner et Dyer s'inscrit dans ce que l'on appelle les modèles de vie artificielle. Il s'agit de systèmes informatiques qui simulent un mécanisme de sélection naturelle : des agents évoluent dans un espace dans lequel ils interagissent et se reproduisent suivant un *algorithme génétique*. Chaque agent possède un « génome » qui régit son comportement, et tout agent « nouveau-né » hérite du patrimoine génétique de ses « parents » avec des mutations aléatoires qui engendrent en permanence de la diversité dans la

population. Ainsi, toute mutation qui rend un agent plus performant (c'est-à-dire qui augmente son succès reproductif) va se propager dans la population. Après un certain nombre de générations, seuls subsistent de façon stable des génomes qui confèrent aux agents un comportement adapté à la survie de la population.

La mise en scène de l'expérience de Werner et Dyer est la suivante. La population d'agents est composée de « mâles » et de « femelles » disposés sur les cases d'une grande grille carrée. Les femelles restent toujours immobiles alors que les mâles peuvent se déplacer (cf. figure 1). Si un mâle rencontre une femelle, ils se reproduisent, donnant naissance à deux nouveaux agents, un mâle et une femelle (on supprime aussi aléatoirement un mâle et une femelle de la grille, de manière à ce que la taille de la population reste constante). Les femelles sont dotées d'une capacité « visuelle » : elles perçoivent tout agent mâle qui se situe dans une case voisine (dans un périmètre de 5x5 cases autour d'elles). Elles peuvent alors émettre des sons qui sont perçus par les mâles qui passent à proximité. Les mâles, eux, ne voient rien, mais ils ont la capacité de choisir leur action parmi quatre mouvements possibles (aller tout droit, tourner à droite ou à gauche, rester immobile) en fonction des sons qu'ils perçoivent.

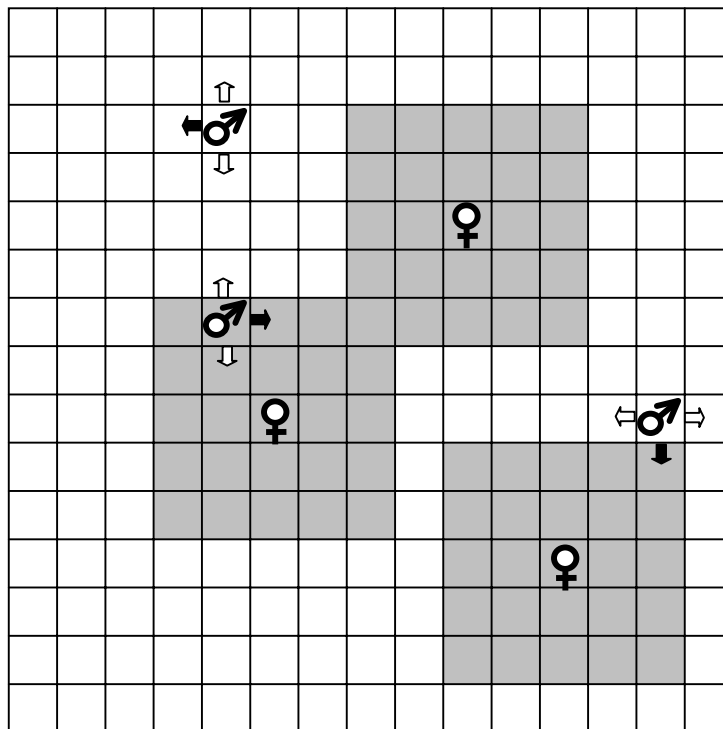


Figure 1 : L'expérience de Werner et Dyer

Les zones grisées représentent le champ de perception visuelle des femelles et les flèches l'orientation (en noir) et les déplacements possibles des mâles. L'expérience a été menée avec 1600 agents sur une grille torique de 200x200 cases.

Chaque agent est muni d'un génome complet, constitué de deux parties : une partie utilisée par les mâles, qui détermine la direction de leurs mouvements en fonction des sons perçus, et une partie utilisée par les femelles, qui détermine le type de son émis en fonction de la position des mâles dans leur champ visuel. Au départ de l'expérience, les génomes sont choisis aléatoirement pour chaque agent. Il n'y a donc aucune cohérence entre les sons émis par les femelles et les déplacements des mâles, et les rencontres entre mâles et femelles sont

entièrement fortuites. Mais au cours de la simulation on voit se mettre en place progressivement un comportement cohérent des agents. Les femelles, dans leur grande majorité, émettent des sons différenciés suivant la position et l'orientation du mâle dans leur champ visuel, et les mâles réagissent la plupart du temps de manière adaptée à ces sons, en se dirigeant vers la femelle émettrice. C'est donc un véritable code de communication, constitué de signes arbitraires et partagé par une majorité d'agents, qui a émergé grâce au mécanisme de sélection implémenté par l'algorithme génétique. Chaque son a pris la signification d'un ordre particulier (« tout droit ! », « à droite ! », « à gauche ! », « ne bouge plus ! ») qui est émis à bon escient par les femelles, et qui est correctement interprété par les mâles.

Ainsi cette expérience prouve bien qu'une convention peut effectivement s'établir au cours d'interactions individuelles dans une population, dans des conditions tout à fait minimales : il suffit en somme que le système de communication soit *potentiellement* utile à la survie des individus, ou plutôt de leur génome, pour que le mécanisme de sélection génétique aboutisse à son émergence.

Une deuxième expérience de Werner et Dyer met d'ailleurs bien en évidence le caractère arbitraire du code ainsi obtenu. On simule une « barrière » qui sépare l'espace en deux compartiments, chaque agent ne pouvant passer cet obstacle qu'avec une probabilité donnée p . Les interactions entre mâles et femelles ont donc lieu préférentiellement à l'intérieur d'un même compartiment. On voit alors apparaître deux codes distincts, un pour chaque compartiment. Autrement dit, bien que les deux compartiments ne soient pas complètement isolés, deux « dialectes » différents se sont stabilisés. Il est d'ailleurs tout à fait remarquable, et quelque peu contre-intuitif, que ce phénomène se produise même pour des barrières très « perméables » : en fait, il suffit que p soit inférieur à 0,8 (valeur pour laquelle la barrière laisse passer un agent 4 fois sur 5) pour que l'on observe l'apparition de deux dialectes différents.

Le modèle de Werner et Dyer présente bien sûr un certain nombre de caractéristiques qui ne conviennent pas pour la modélisation de l'émergence du langage humain, même si l'on fait abstraction de la « mise en scène » du modèle, forcément caricaturale, pour ne retenir que les principes d'interaction entre agents et les mécanismes d'adaptation mis en oeuvre.

- D'une part, le code obtenu est inscrit directement dans le génome des agents, ce qui ne saurait être le cas pour le lexique de nos langues¹.

- D'autre part, ce code ne possède pas les propriétés essentielles des lexiques des langues que sont la polysémie et la synonymie partielle, et surtout, une fois établi, ce code n'évolue plus, contrairement à ce qui se passe pour les langues humaines.

Mais il n'en reste pas moins que ce travail a joué un rôle fondateur en montrant tout l'intérêt potentiel de ce type de recherches.

1.3. Émergence d'un lexique par adaptation « culturelle »

A la suite de Werner et Dyer, de nombreux chercheurs ont proposé des modèles d'émergence d'un lexique dans une communauté d'agents, en utilisant différents mécanismes et les scénarios les plus divers². Nous allons nous centrer ici sur les travaux de Steels et Kaplan (Steels 1996, Steels et Kaplan 1999, 2001, Kaplan 2000, 2001), qui illustrent bien la démarche épistémologique que nous avons décrite en introduction.

¹. En un sens, ce modèle est plus à même d'expliquer l'émergence de systèmes de communication animale plus stéréotypés, comme le chant des oiseaux. C'est d'ailleurs dans cette direction que Werner a poursuivi ses travaux, en concevant un modèle de « sélection sexuelle » qui rend compte, sous certaines conditions, du maintien de la diversité des chants d'oiseaux au sein d'une même espèce (Werner et Todd 1997).

² On peut citer entre autres Hutchins et Hazlehurst 1995, Saunders et Pollack 1996, Oliphant et Batali 1996, Di Paolo 1997, Cangelosi et Parisi 1998, Livingstone et Fyfe 1999, Oudeyer 1999, etc.

Dans les modèles développés par Steels et Kaplan, les agents sont munis d'une mémoire associative, qui s'enrichit au cours des interactions. Autrement dit, contrairement au modèle de Werner et Dyer, les agents ne « naissent » pas avec un code langagier inscrit dans leur génome : ils « apprennent », tout au long de leur existence, à associer des sons avec des sens. Les interactions entre agents consistent en « jeux de dénomination » (*naming games*). Les détails précis du jeu varient d'une expérience à l'autre, mais typiquement ils se déroulent de la manière suivante : Un premier agent, le « locuteur », sélectionne un objet de son environnement et le nomme en prononçant un « mot ». Le deuxième agent, « l'interlocuteur », entend le mot émis, et doit désigner l'objet correspondant. Si l'objet désigné est bien celui qu'avait sélectionné le locuteur, le jeu est un succès, sinon c'est un échec. L'interlocuteur modifie alors sa mémoire associative en fonction du résultat du jeu.

Dans les premières expériences, tout le processus était entièrement simulé sur ordinateur. Par la suite, ces chercheurs ont construit de véritables robots (*talking heads*), munis de caméras orientables et d'un système de traitement d'image qui permettaient à ces robots de percevoir et de « pointer » (par l'orientation de la caméra) différentes formes géométriques sur un tableau. Comme nous le verrons dans la section suivante, ces conditions plus réalistes, outre leur aspect spectaculaire, présentent l'intérêt de faire apparaître des phénomènes nouveaux, difficilement simulables sur ordinateur.

Pour en revenir aux premières expériences, Kaplan a étudié très soigneusement les conditions dans lesquelles un lexique stable pouvait émerger dans un tel système, en testant divers mécanismes d'apprentissage par les agents. Nous allons présenter ici les principales étapes de cette recherche, en les simplifiant quelque peu (on trouvera tous les détails dans Kaplan 2000). Dans toutes ces expériences, les agents disposent d'un certain nombre d'objets (typiquement une dizaine) dans leur environnement, et d'un certain nombre de mots qu'ils peuvent prononcer. Le nombre de mots est supérieur ou égal au nombre d'objets. Au départ, il n'y a aucun lien privilégié entre objets et mots dans la mémoire associative des agents : les locuteurs choisissent donc au hasard un mot qui est décodé aussi au hasard par leur interlocuteur. Au fur et à mesure des interactions, les agents modifient les liens dans leur mémoire associative. La question qui se pose est de savoir quel type de modification est susceptible d'aboutir à la stabilisation d'un lexique commun entre les agents.

(1) Kaplan a d'abord testé un simple mécanisme d'*imitation*. Quel que soit le résultat du jeu, on augmente dans la mémoire associative de l'interlocuteur le lien entre le mot prononcé et l'objet désigné par le locuteur. En d'autres termes, l'interlocuteur « retient la leçon » du locuteur : il aura tendance à imiter le comportement de ce locuteur dans ses interactions futures. Les résultats obtenus montrent que ce mécanisme est insuffisant pour obtenir un lexique commun.

(2) Dans une deuxième expérience, Kaplan utilise un apprentissage par *essai et erreur*. Cette fois-ci, le résultat du jeu compte. S'il a été un échec, le lien entre le mot et l'objet désigné par l'interlocuteur est diminué. S'il a été un succès, ce lien est renforcé. En somme, l'interlocuteur se centre sur ses propres performances qu'il essaie d'améliorer en tenant compte uniquement du résultat du jeu. Là encore, les résultats sont décevants : il n'y a pas de convergence dès que le nombre d'objets à désigner est assez grand³.

³ Il faut noter cependant que deux éléments complémentaires permettent d'améliorer les résultats, sans cependant être suffisants (la convergence n'est pas systématique, ou alors avec des temps de convergence très longs) :

- si l'on utilise un nombre de mots beaucoup plus grand que le nombre d'objets (typiquement cinq fois plus grand) ;

- si l'on utilise un mécanisme d'*inhibition latérale* : lors d'un succès, en plus de renforcer positivement le lien pertinent, on diminue les liens que le mot entretenait avec d'autres objets, et les liens que l'objet entretenait avec d'autres mots.

(3) Enfin, Kaplan a combiné les deux mécanismes, en procédant de la manière suivante. En cas de succès du jeu, on procède comme dans l'expérience (2). Mais en cas d'échec, on ne se contente pas de diminuer le lien qui a provoqué l'erreur, on augmente aussi, comme dans l'expérience (1), le lien entre le mot prononcé par le locuteur et l'objet qu'il avait sélectionné. Autrement dit, l'interlocuteur utilise pour corriger ses erreurs l'indication fournie par le locuteur. Les résultats sont alors spectaculaires : on observe systématiquement la stabilisation d'un lexique commun en un temps très raisonnable⁴.

Kaplan a ensuite étudié, dans les conditions de l'expérience (3), les effets de l'arrivée de nouveaux agents en cours d'expérience. Pour ce faire, il introduit, de manière aléatoire au cours du temps, des agents « tout neufs » (c'est-à-dire dont la mémoire associative est vide) qui viennent remplacer des agents existants. Il montre alors que la stabilisation du lexique se maintient pour des valeurs raisonnables du flux de renouvellement. Cela signifie donc que le même mécanisme d'apprentissage qui fait émerger un lexique commun permet aussi l'acquisition de ce lexique par les nouveaux arrivants.

Ainsi ces expériences montrent que l'établissement d'une convention lexicale peut être obtenue de manière « culturelle », c'est-à-dire par apprentissage au cours des interactions entre agents, à condition de disposer d'un mécanisme d'acquisition appropriée, qui conjugue une faculté d'imitation et l'aptitude à corriger ses propres erreurs. Cette condition est tout à fait « réaliste » : ces capacités cognitives sont présentes chez un grand nombre d'animaux, et particulièrement développées chez les grands singes. Le premier « défaut » du modèle de Werner et Dyer (cf. fin du §1.2) peut donc être dépassé. Il reste cependant le second défaut : on n'observe dans ces premières expériences ni l'apparition de polysémie et de synonymie partielle⁵, ni d'évolution du lexique : une fois mis en place, le code reste invariable.

1.4. L'introduction du continu et de la communication « située »

L'absence de polysémie et d'évolution lexicale dans ces premières expériences est intimement liée au caractère entièrement discret du système de communication utilisé. En effet, il ne peut pas y avoir de modification graduelle de la forme d'un mot ou de son sens, ce qui semble une condition nécessaire pour obtenir ces caractéristiques.

Pour tester cette hypothèse, Kaplan a d'abord agrémenté son modèle d'une transmission « bruitée ». La forme sonore des mots est sélectionnée sur un intervalle gradué et elle est transmise à l'interlocuteur avec des modifications aléatoires de la valeur sélectionnée par le locuteur. L'interlocuteur interprète alors le son perçu en sélectionnant dans sa mémoire associative les mots dont la forme est la plus proche. Les agents peuvent donc communiquer même s'ils ne possèdent pas exactement les mêmes formes sonores dans leurs mémoires respectives. On observe alors, après l'émergence d'un lexique commun, une « dérive » lexicale continue, les mots changeant graduellement de forme sonore au cours de l'expérience, et cette dérive est d'autant plus marquée que le flux d'agents nouveaux est important.

De même, dans une autre série de simulations, Kaplan a introduit du continu dans l'espace des sens. Au lieu de nommer directement des objets, les agents doivent nommer une qualité qui peut varier graduellement (comme la température, par exemple). Les agents créent alors des catégories (glacial, froid, tiède, chaud, brûlant, ...) représentant des intervalles plus ou moins grands de valeurs possibles de la qualité en question. On observe alors l'apparition de

⁴ Là encore, l'utilisation d'un grand nombre de mots et/ou du mécanisme d'inhibition latérale (cf. note 3) accélère la convergence de manière sensible.

⁵ Dans le cas où le nombre de mots est supérieur au nombre d'objets, on observe des phénomènes de synonymie totale qui perdurent très longtemps après la stabilisation du lexique : en effet, plusieurs mots différents peuvent désigner concurremment un même objet sans nuire à la communication, dans la mesure où tous les agents ont mémorisé ce fait.

catégories « floues » dans le lexique, le sens d'un mot ne correspondant pas exactement au même intervalle pour les différents agents (polysémie) et plusieurs mots pouvant être associés à des intervalles qui se recouvrent en partie (synonymie partielle).

Mais c'est avec les expériences robotiques que Steels et Kaplan ont obtenu les résultats les plus probants sur ce point. Comme nous l'avons dit, leur dispositif, les *talking heads*, était constitué de deux caméras pouvant pointer sur les formes géométriques disposées sur un tableau. Les agents logiciels viennent tour à tour manipuler les caméras pour jouer à un jeu de dénomination plus réaliste, puisqu'il s'agit cette fois de désigner et de distinguer de « vrais » objets, différenciables par leur forme, leur couleur, leur taille et leur position sur le tableau. Les mots qui constituent le lexique émergent désignent ces diverses propriétés : rouge, vert, petit, en haut, tout à droite, etc. Dans ce type d'expérience robotique dite « située » ou « ancrée dans le réel », de nombreux facteurs d'imprécision interviennent qui rendent la communication plus incertaine, sans que l'on ait à introduire artificiellement du « bruit » : variations naturelles de luminosité, variations des positions des objets sur le tableau, mouvements approximatifs des caméras, imprécision du système de perception (erreurs de segmentation de l'image, par exemple), etc. De plus, la diversité des propriétés permettant de désigner les objets introduit aussi une source de confusion : un même objet peut être désigné par sa couleur par le locuteur et par sa position par l'interlocuteur... On se trouve donc dans des conditions de communication beaucoup plus réalistes qui rendent l'expérimentation bien plus intéressante.

L'une des expériences a été menée « en vraie grandeur » pendant plusieurs mois, avec le concours de centaines d'internautes. Plusieurs plate-formes robotiques ont été installées dans des villes différentes (Paris, Bruxelles, Tokyo, etc.). Un millier d'agents logiciels, créés par les internautes, pouvaient migrer de plate-forme en plate-forme, formant ainsi une vaste communauté interagissant 24 heures sur 24. Qui plus est, les internautes pouvaient enseigner des mots de leur langue à leurs agents, ce qui augmentait le caractère ludique de l'expérience. Cette expérience a constitué un succès assez spectaculaire. Comme le souligne Kaplan (2000, p. 211) :

« Malgré les erreurs causées par le caractère ancré et situé des interactions, malgré le flux perpétuel de nouveaux agents, malgré les scènes régulièrement renouvelées, malgré le caractère incohérent des enseignements divulgués par les utilisateurs à leur agent, un lexique a pu émerger. Ce lexique, mélange de mots inventés par les agents et de mots enseignés par des humains, s'est transmis culturellement de façon très stable. Le cœur de ce lexique est constitué par des mots correspondant à des sens qui optimisent la robustesse, la généralité, la facilité d'apprentissage et la réutilisabilité. Ils sont parfaitement adaptés aux scènes que les agents rencontrent dans les environnements qui leur sont présentés. »

En ce qui concerne les propriétés du lexique qui nous intéressent ici, cette expérience confirme le rôle moteur joué par le continu pour obtenir de la polysémie et une évolution du sens des unités lexicales. Kaplan donne en effet plusieurs exemples de modification du sens des mots au cours de l'expérience et de leur capacité à prendre simultanément des sens distincts et apparentés. On a représenté figure 2, les différents sens du mot *down* (introduit par un des internautes), qui a d'abord désigné la moitié inférieure du tableau (l'intervalle [0,5 ; 1] sur l'axe vertical normalisé et orienté vers le bas), bientôt concurrencé par un sens plus précis (l'intervalle [0,75 ; 1]), avant d'acquiescer un troisième sens, très spécialisé, signifiant « tout en bas » (intervalle [0,875 ; 1]). Kaplan cite aussi l'exemple du mot *bozopite* (inventé par un agent logiciel), qui a pris, pendant une très longue période, deux sens voisins : « de grande largeur » et « de grande surface »⁶.

⁶ Kaplan note la similitude avec les sens différents du mot *large* en français et en anglais.

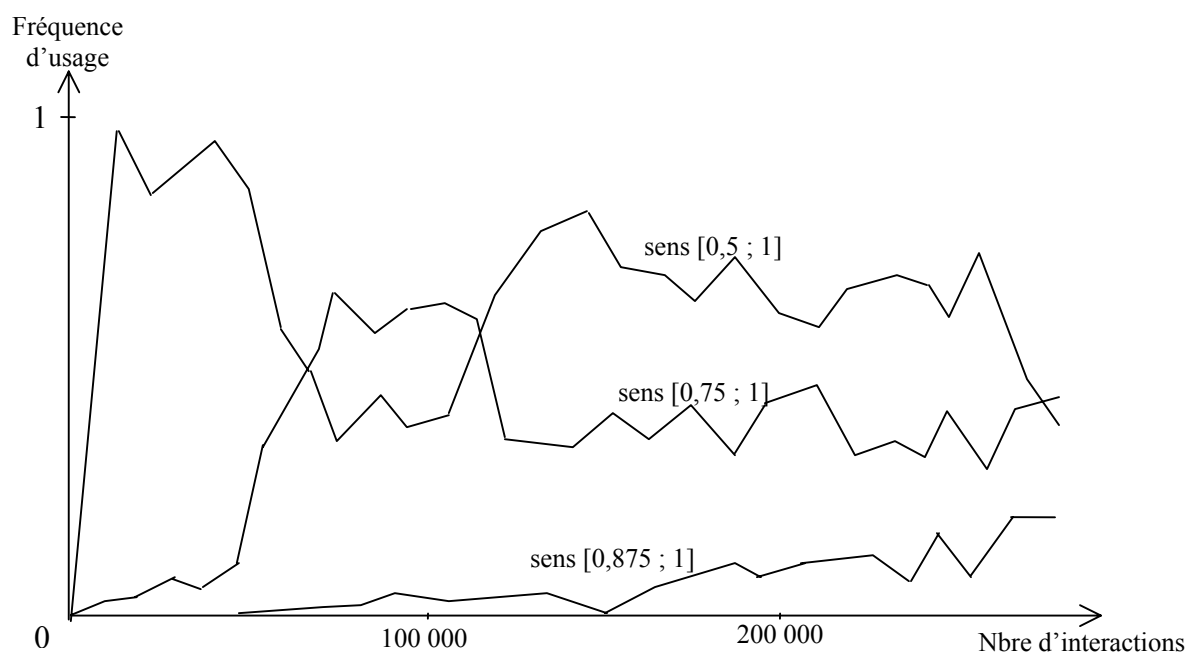


Figure 2 : Evolution des différents sens du mot *down* dans l'expérience des *talking heads*
(d'après Kaplan 2000, p. 209)

Ainsi les jeux de dénomination (*naming games*) fournissent un cadre dans lequel peut émerger un lexique conventionnel qui possède notamment des propriétés dynamiques d'apprentissage et d'évolution que l'on peut rapprocher de phénomènes observables dans le lexique des langues humaines. Ce modèles restent bien sûr très frustrés et limités, mais cela suffit à prouver que ces propriétés peuvent être acquises sans que l'on ait besoin de faire appel à des mécanismes cognitifs spécialisés, encore moins à des facultés innées.

On peut d'ailleurs envisager de complexifier ces modèles de manière à mieux reproduire certains aspects de l'évolution lexicale. Une des voies les plus intéressantes serait de les « spatialiser » en créant des sous-communautés, avec une organisation spatiale de leurs interactions, de manière à étudier les conditions dans lesquelles on peut observer des phénomènes de divergence lexicale. On pourrait ainsi mettre en évidence les conditions, sur les rapports entre démographie et dispersion des groupes d'agents, qui sont nécessaires pour obtenir le type d'évolution des langues que l'on a pu systématiser à partir des données sur les langues humaines (cf. par exemple Pagel 2000). On pourrait aussi modéliser les conditions d'apparition de phénomènes de diffusion lexicale (Wang 1979, Bybee 2001, Phillips 2001).

2. Émergence de propriétés structurelles

2.1. Problématique

Les chercheurs se sont aussi penchés sur la modélisation de l'émergence de propriétés structurelles des langues, notamment aux niveaux phonologique et syntaxique.

On sait qu'au delà l'extraordinaire diversité des langues on a mis en évidence un certain nombre de régularités auxquelles obéissent toutes les langues. Pour ne prendre qu'un

exemple, dans le domaine de la phonologie, les systèmes vocaliques peuvent être plus ou moins complexes, certaines langues ne possédant que trois voyelles, alors que d'autres en comptent plusieurs dizaines. Mais cette diversité est loin d'être totalement aléatoire. On peut en effet ordonner l'ensemble des voyelles de toutes les langues par leur fréquence d'apparition dans les langues : en règle générale, les langues n'ayant que peu de voyelles possèdent les premières de la liste, et plus une langue contient de voyelles, plus on doit descendre dans la liste. Autrement dit, on peut énoncer des lois du type : si une langue possède la voyelle de rang i dans la liste, alors elle possède aussi les $i-1$ voyelles qui la précèdent⁷. C'est ce que l'on appelle un *universal implicationnel* ou *hiérarchique*. On recense des propriétés linguistiques P_1, P_2, \dots, P_n , qui peuvent être présentes ou non dans une langue donnée, mais qui sont liées par une relation d'ordre d'apparition : la présence de la propriété P_i dans une langue implique nécessairement⁸ la présence dans cette même langue des propriétés P_1, P_2, \dots, P_{i-1} .

La recherche de tels universaux, initiée par Greenberg (1963, 1978, voir aussi Comrie 1981, Hawkins 1988 et Croft 1990) a permis de mettre en évidence de nombreux faits qui sont donc autant de problèmes pour les modélisateurs.

En ce qui concerne la phonologie, ces universaux (cf. Crothers 1978, Maddieson 1984, Schwartz, Boë, Vallée et Abry 1997a) ont fait l'objet de nombreux travaux de modélisation⁹. Ces modèles s'appuient sur les caractéristiques physiques des appareils articulatoires et perceptifs humains. Ils comportent une modélisation du conduit vocal et une décomposition du signal émis selon les trois premières harmoniques (les formants). Des principes d'optimisation sont alors mis en œuvre : maximum de contraste acoustique et minimum d'effort moteur. Les résultats montrent que l'on peut reconstruire, notamment, l'ordre d'apparition des voyelles tel qu'il a été observé.

Nous allons plutôt ici présenter des travaux de modélisation de l'émergence de propriétés syntaxiques. Comme pour le lexique, de nombreux modèles, mettant en œuvre des communautés d'agents ont été proposés¹⁰. Nous allons ici nous centrer sur les travaux de Kirby (1998, 1999, 2000), très représentatifs de ce type de modélisation.

2.2. Le principe des simulations

Nous allons illustrer le modèle¹¹ en prenant l'un des exemples d'universaux implicationnels choisi par Kirby, qui porte sur les propositions relatives. Les relatives se distinguent par la fonction du pronom relatif dans la subordonnée : sujet (noté ici Suj), complément d'objet direct (Cod), objet indirect (Coi), circonstanciel (Circ), complément de nom (Cnom), comparatif (Comp). L'anglais permet tous ces cas de figure, comme le montrent ces exemples de Kirby (1999, p. 63) :

⁷ En fait, les règles sont un peu plus complexes que cela : l'ordre dans la liste n'est qu'un ordre partiel, ce qui permet de nombreuses variantes.

⁸ Ces « lois » ne peuvent pas toujours être formulées de façon aussi rigoureuses. On n'observe souvent qu'une relation statistique, de la forme : si une langue possède la propriété P_i , il y a de fortes chances qu'elle possède aussi la propriété P_j pour $j < i$. Mais comme le souligne Kirby (1999, p. 5-6), de tels faits statistiques méritent autant une explication que les règles absolues.

⁹ cf. Lindblom 1986, 1998, McNeilage 1994, Carré, Lindblom et McNeilage 1994, Schwartz, Boë, Vallée, Abry 1997b, Kohler 1998, Maddieson 1999, de Boer 2000, Livingstone et Fyfe 2000, Carré 2002.

¹⁰ On peut citer entre autres Batali 1994, 1998, Steels 1998, 2002, Hurford 2000, Popescu-Belis 2002, Komarova, Niyogi et Nowak, 2001.

¹¹ Là encore, nous présentons les étapes essentielles de la démarche en n'hésitant pas à opérer des simplifications. On trouvera tous les détails des diverses expérimentations dans Kirby 1999.

- Suj : *the band that plays in the Jazz Joint*
- Cod : *the band that I saw in the Jazz Joint*
- Coi : *the band that I gave five pounds to*
- Circ : *the band that I play guitar in*
- Cnom : *the band whose songs are funky*
- Comp : *the band that few are bigger than*

Mais dans la plupart des langues, la fonction du pronom relatif est plus contrainte. Le français, par exemple, n'autorise pas les relatives du dernier type (Comp). Un certain nombre de langues limitent même le pronom relatif à la fonction sujet (Suj). En fait, Keenan et Comrie (1977) ont montré qu'il existait un universel implicationnel basé sur la hiérarchie suivante :

Suj > Cod > Coi > Circ > Cnom > Comp

L'universel correspondant s'énonce de la façon suivante :

- Si une langue admet des pronoms relatifs avec une fonction donnée, elle admet aussi toutes les relatives situées plus haut dans la hiérarchie
- Pour chaque position dans la hiérarchie, il existe des langues qui acceptent les pronoms relatifs de ce niveau, mais qui n'admettent pas de relatives situées plus bas dans la hiérarchie.

Le but du modèle est donc de trouver dans quelles conditions cet universel a pu émerger.

Le principe général des simulations est le suivant. On se donne une population composée de deux générations d'agents :

- La génération des locuteurs, munis chacun d'une « grammaire » qui leur permet de produire des phrases obéissant aux règles de cette grammaire. Dans notre cas, les grammaires servent à produire des relatives : elles ont donc la forme suivante : $Rel\{X_1, X_2, \dots, X_p\}$, où chacun des X_i est l'une des positions dans la hiérarchie. Par exemple, un agent muni de la grammaire $Rel\{Suj, Cod, Coi\}$ produira des relatives avec des pronoms sujets, compléments directs et compléments indirects, tandis qu'un agent muni de la grammaire $Rel\{Cod, Circ\}$ en produira avec des pronoms compléments d'objet direct et compléments de nom. Il faut noter que ce dernier agent possède donc une grammaire « déviante », au sens où aucune langue ne correspond à ce type de production (si la position Circ est possible, les positions Suj et Coi, plus hautes dans la hiérarchie, devraient aussi être incluses dans la grammaire).
- La génération des apprenants, qui doivent acquérir une grammaire. Pour ce faire, chaque apprenant est confronté à un certain nombre de productions de locuteurs, et il construit sa grammaire en fonction de cet échantillon. Ainsi un apprenant confronté à des relatives dont le pronom est en position sujet, complément d'objet direct et indirect construira la grammaire $Rel\{Suj, Cod, Coi\}$, tandis qu'un apprenant confronté à des exemples ne comportant que des relatives avec des pronoms compléments d'objet direct construira la grammaire déviante $Rel\{Cod\}$.

A chaque cycle évolutif, chaque locuteur produit donc des énoncés obéissant aux règles de sa grammaire et chaque apprenant sélectionne un échantillon parmi les énoncés produits pour acquérir sa propre grammaire. Les apprenants remplacent alors les locuteurs, une nouvelle génération d'apprenants est créée et un nouveau cycle peut commencer. Après un certain nombre de cycles, on observe quelles grammaires se sont stabilisées au cours du processus.

2.3. Un premier modèle de diffusion des innovations syntaxiques

Dans une première série de simulations, Kirby n'impose aucune contrainte particulière, ni sur les productions des locuteurs, ni sur la sélection d'un échantillon d'apprentissage par les apprenants. Dans ces conditions, une seule grammaire se stabilise : celle qui contient toutes les formes de relatives qui étaient présentes dans les productions initiales.

A titre d'exemple, supposons qu'au début de la simulation, la plupart des locuteurs soient dotés de la grammaire $Rel\{Suj\}$, et que seul un petit nombre d'entre eux possèdent la

grammaire Rel{Suj, Cod}. La population initiale va donc produire massivement des relatives avec pronom sujet, et seulement un très petit nombre de relatives avec pronom complément d'objet. Mais de génération en génération, le nombre de locuteurs munis de la grammaire Rel{Suj, Cod} va augmenter jusqu'à ce que cette grammaire soit adoptée par toute la population, suivant une courbe évolutive classique « en S », du type de celle présentée figure 3.

En d'autres termes, l'innovation linguistique des quelques locuteurs qui utilisaient des relatives d'un type nouveau se répand dans toute la population. On a donc modélisé un processus de diffusion d'une innovation linguistique, ce qui est intéressant en soi, mais cela ne peut pas rendre compte de l'universel hiérarchique que l'on cherche à obtenir. Si le processus réel concordait avec ce modèle, toutes les langues permettraient aujourd'hui tous les types de relatives, puisque tout nouveau type introduit aurait été adopté très rapidement au cours du processus évolutif.

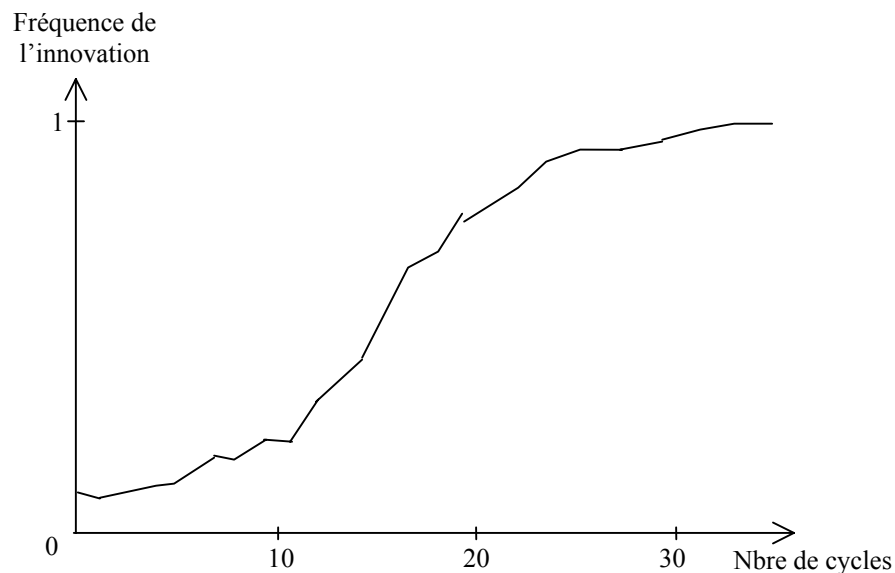


Figure 3 : Diffusion d'une innovation linguistique

2.4. Complexité structurelle et morphologique

Pour essayer de se rapprocher des conditions d'émergence de l'universel hiérarchique, Kirby introduit deux hypothèses essentielles qui vont modifier le comportement du modèle :

1. *Principe de complexité structurelle* :

Les différents types de relatives ne présentent pas la même difficulté en compréhension suivant la fonction du pronom : en termes syntaxiques, plus le rattachement du pronom à son régissant se situe à un niveau bas dans l'arbre syntaxique associé à la proposition relative, plus son traitement réclame un effort cognitif de la part de l'interlocuteur. Cette remarque, corroborée par des études psycholinguistiques (cf. Keenan et Hawkins 1987), conduit à

énoncer le principe suivant : la complexité structurelle des relatives croît dans l'ordre inverse de la hiérarchie (c'est-à-dire dans l'ordre : Suj < Cod < Coi < Circ < Cnom < Comp).

Kirby introduit donc un facteur de mesure de cette complexité qui se traduit dans le modèle par l'hypothèse que les apprenants sélectionnent moins volontiers les énoncés difficiles à analyser. L'échantillon d'apprentissage est donc biaisé : une relative de complexité structurelle élevée aura une probabilité moindre de figurer dans l'échantillon.

2. Principe de complexité morphologique

Inversement, l'absence d'un type de relative force le locuteur à utiliser des paraphrases, qui représentent, elles, un coût pour le locuteur, dans la mesure où elles sont plus « lourdes », du point de vue morphologique, que les relatives standards correspondantes. Ainsi, on peut comparer en français :

Cod : *L'équipe que je soutiens / L'équipe qui est soutenue par moi*

Coi : *L'équipe à qui j'ai remis le trophée / L'équipe qui s'est vu remettre le trophée par moi.*

Kirby introduit donc un deuxième facteur de complexité, morphologique cette fois, qui va biaiser les productions des locuteurs : plus un énoncé est morphologiquement coûteux, moins il aura de chance d'être produit par un locuteur. La complexité morphologique varie dans le sens opposé de la complexité structurelle : ce sont donc deux facteurs antagonistes.

Si l'on intègre ces deux conditions dans le modèle, avec des conditions initiales dans lesquelles des relatives de tout type peuvent être produites, le résultat des simulations commence à se rapprocher des données observées. En effet, le système converge vers l'une des grammaires suivantes : Rel{Suj}, Rel{Suj, Cod}, Rel{Suj, Cod, Coi}, ..., Rel{Suj, Cod, Coi, Circ, Cnom, Comp}. La grammaire effectivement obtenue parmi celles-ci dépend du poids relatif des paramètres antagonistes de complexité structurelle et morphologique.

Ainsi les seules grammaires stables sont les grammaires définies par l'universel implicationnel. Le modèle montre donc que, comme l'avait proposé Givón (1979), des universaux implicationnels peuvent résulter de la « compétition » entre deux pressions évolutives antagonistes (*competing motivations*).

2.5. Introduction de la spatialité et de variations temporelles

Le modèle que nous venons de présenter est néanmoins insuffisant : en effet, le système ne converge que vers *une seule* grammaire, partagée par toute la population. Cette grammaire obéit, certes, à l'universel implicationnel, mais le modèle ne permet pas d'expliquer la coexistence de grammaires distinctes, telle qu'on l'observe au travers de la diversité des langues. Pour surmonter cette limitation, Kirby introduit deux nouveaux éléments dans son modèle :

- D'une part, il met en place une *dimension spatiale* dans les interactions entre agents. La population est répartie sur une grille, chaque case contenant un locuteur et un apprenant. Les apprenants ne choisissent plus leur échantillon parmi les productions de toute la population, mais uniquement parmi les énoncés produits par les locuteurs les plus proches (typiquement, le locuteur qui occupe la même case et les quatre locuteurs qui occupent les cases adjacentes. Cette localisation des apprentissages peut ainsi permettre une diversité spatiale des grammaires apprises.- D'autre part, il introduit au cours du temps des *variations aléatoires localisées* dans le poids relatifs des paramètres de complexité structurelle et morphologique. Ce dernier facteur est destiné à tenir compte des variations au cours de l'évolution des langues (introduction de variantes morphosyntaxiques, phénomènes de grammaticalisation, etc.), qui peuvent effectivement modifier le rapport entre les deux sources de complexité. Par exemple, en anglais, on peut penser que les variantes suivantes :

The band in which I play guitar

The band that I play guitar in

The band I play guitar in

n'impliquent pas des coûts équivalents, ni du point de vue de l'économie de production pour le locuteur, ni du point de vue de la charge cognitive pour l'interlocuteur.

En prenant en compte ces deux nouveaux facteurs, les simulations donnent le résultat escompté. Différentes grammaires obéissant à l'universel implicationnel coexistent tout au long de la simulation en occupant chacune une ou plusieurs régions de l'espace, comme cela est représenté figure 4, où l'on s'est limité aux trois premières grammaires de la hiérarchie (la couleur d'une case indique la grammaire de l'occupant de cette case). La configuration spatiale évolue, les frontières entre deux grammaires se déplaçant progressivement. Dans ces zones-frontières, qui correspondent à des situations de « bilinguisme » (les apprenants sont exposés aux productions de locuteurs de deux grammaires différentes), on voit apparaître de temps en temps une grammaire déviante (cf. les cases noires de la figure 4), mais uniquement de façon transitoire : les seules grammaires stables correspondent bien aux grammaires attestées.

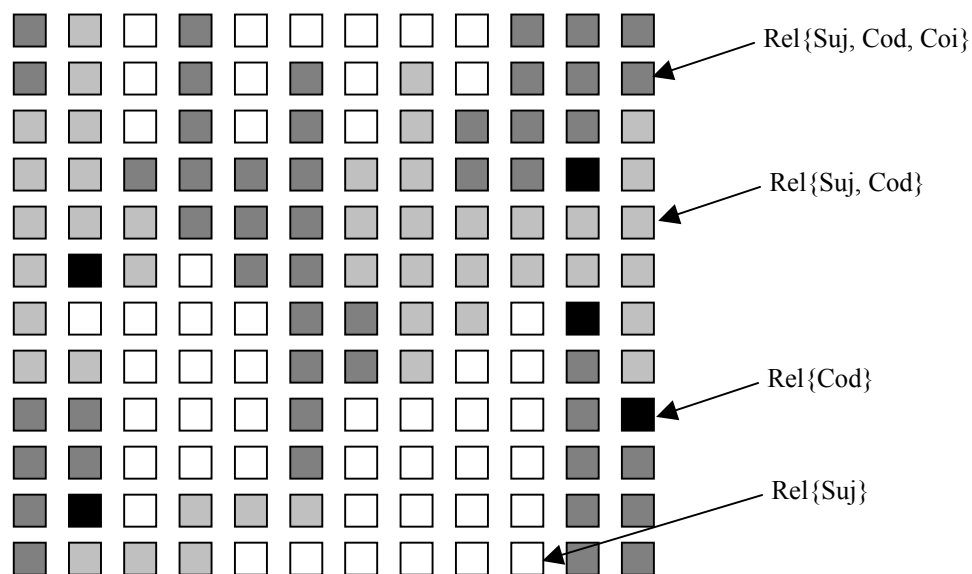


Figure 4 : Stabilisation de l'universel implicationnel

En résumé, Kirby a montré que l'émergence d'universaux implicationnels dans le domaine de la syntaxe était possible si les quatre conditions suivantes étaient satisfaites :

- l'existence d'une pression de sélection par les apprenants qui privilégie les productions langagières de complexité structurelle plus faible (la complexité structurelle croît avec la difficulté d'analyse syntaxique d'une phrase) ;
- l'existence d'une pression antagoniste de sélection par les locuteurs de formulations de complexité morphologique plus faible (la complexité morphologique croît avec le nombre de morphèmes nécessaires présents dans une phrase) ;
- la prise en compte d'une répartition spatiale des agents dans laquelle chaque apprenant n'interagit qu'avec un petit nombre de locuteurs voisins ;
- l'introduction de facteurs de variation (variantes syntaxiques, réductions morphologiques, grammaticalisations, etc.) qui changent le poids relatif des deux types de complexité.

Sous ces quatre conditions, on peut modéliser non seulement l'émergence d'universaux implicationnels, mais aussi un certain nombre de caractéristiques intéressantes de l'évolution des langues (notamment le rôle du bilinguisme à la frontière entre deux aires de répartition de langues de propriétés différentes). Il faut noter que ce travail, comme dans le cas du lexique, ouvre une voie de recherche intéressante, qui permettrait de confronter de manière plus quantitative des modèles de ce type avec les données que nous possédons (cf. par exemple Nichols 1992) sur la typologie et la répartition géographique des langues.

Conclusion

Les deux modèles que nous avons présentés, celui de Steels et Kaplan sur le lexique et celui de Kirby sur la syntaxe, vont, d'un point de vue théorique, dans le même sens. Ils montrent que les spécificités du langage humain sont compatibles avec l'hypothèse d'une faculté d'acquisition du langage reposant sur des mécanismes cognitifs généraux, à l'œuvre dans d'autres activités cognitives que le langage. Cette hypothèse s'oppose à la thèse classique des grammaires génératives (théorie chomskyenne des « principes et paramètres »), qui stipule que les langues ne peuvent être acquises que par un module spécifique, un « organe du langage », dont les propriétés seraient radicalement différentes de celles du reste du système cognitif humain.

Bien entendu, nous avons déjà insisté sur ce point, ces modèles ne sauraient à eux seuls « prouver » que l'émergence de ces spécificités est due à ces mécanismes généraux. Mais ils montrent que cette hypothèse est plausible, et à ce titre, ils apportent des éléments consistants de discussion dans un débat trop souvent dominé par des arguments d'autorité.

Ces travaux, qui n'en sont qu'à leurs débuts, constituent donc un domaine de recherche prometteur appelé à prendre une place de plus en plus importante dans les prochaines années dans les débats sur les problèmes passionnants et difficiles que pose l'origine du langage et des langues.

Références

- Batali J., Innate biases and critical periods: combining evolution and learning in the acquisition of syntax, in R.A. Brooks, P. Maes (éds.), *Artificial Life IV*, MIT Press, p. 160-171, 1994.
- Batali J., Computational simulations of the emergence of grammar, in J.R. Hurford, M. Studdert-Kennedy, C. Knight, *Approaches to the Evolution of Language*, Cambridge University Press, p. 405-426, 1998.
- Benveniste E., 1974. *Problèmes de linguistique générale II*, Paris, Gallimard.
- Bybee J., *Phonology and Language Use*, Cambridge University Press, 2001.
- Cangelosi A., Parisi D., The Emergence of a "Language" in an Evolving Population of Neural Networks, *Connection Science*, 10(2), p. 83-97, 1998.
- Carré R., Emergence des systèmes phonologiques, *Langages*, 146, p. 70-79, 2002
- Carré R., Lindblom B., MacNeilage P., Rôle de l'acoustique dans l'évolution du conduit vocal humain, *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, 30/IIb, p. 471-476, 1994
- Chomsky N., Language and Nature, 1995. *Mind*, 104, pp. 1-61.
- Comrie B., *Language Universals and Linguistic Typology*, Oxford, Blackwell, 1981.
- Croft W., *Typology and Universals*, Cambridge University Press, 1990.
- Crothers J., Typology and universals of vowel systems, in J.H. Greenberg, C.A. Ferguson, E.A. Moravcsik (éds.), *Universals of Human Language, 2: Phonology*, Stanford University Press, p. 93-152, 1978.
- Culioli A., *Pour une linguistique de l'énonciation*. Ophrys (volume 1, 1990, volumes 2 et 3, 1999).
- De Boer B., Emergence of Sound Systems Through Self-Organisation, in C. Knight, M. Studdert-Kennedy, J.R. Hurford, *The Evolutionary Emergence of Language*, Cambridge University Press, p. 177-198, 2000

- Di Paolo E., Social coordination and spatial organisation: Steps towards the evolution of communication, in P. Husbands, I. Harvey (eds.), *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life*, MIT Press, p. 434-443, 1997.
- Dik S., *The theory of Functional Grammar*, Mouton De Gruyter, 1997 (2 tomes : *Part 1 : The structure of the clause* et *Part 2 : Derived and complex constructions*).
- Ducrot O., *Le dire et le dit*, Paris, Editions de Minuit, 1984.
- Fauconnier G., *Mappings in Thought and Language*, Cambridge University Press, 1997.
- Fodor J., *The Language of Thought*, New York, Cromwell, 1975.
- Givón T., *On Understanding Grammar*, Academic Press, 1979.
- Givón T., *Functionalism and Grammar*, Benjamins, 1995.
- Greenberg J., Some Universals of Grammar with Particular Reference to the Order of Meaningful Elements, in J. Greenberg (éd.), *Universals of Language*, MIT Press, p. 73-113, 1963.
- Greenberg J., Diachrony, Synchrony, and Language Universals, in J. Greenberg (éd.), *Universals of Human Language, 1: Method and Theory*, Stanford University Press, p. 61-91, 1978.
- Halliday M.A.K., *An introduction to Functional Grammar*, Edward Arnold, 1994.
- Hawkins J.A., Explaining Language Universals, in J.A. Hawkins (éd.), *Explaining Language Universals*, Oxford, Blackwell, p. 3-28, 1988
- Hurford J.R., Social Transmission favours Linguistic Generalisation, in C. Knight, M. Studdert-Kennedy, J.R. Hurford, *The Evolutionary Emergence of Language*, Cambridge University Press, p. 324-352, 2000.
- Hutchins E., Hazlehurst B., How to invent a lexicon : the development of shared symbols in interaction, in B. Gilbert, R. Conte (éds.), *Artificial Societies : The Computer Simulation of Social Life*, p. 157-189, Londres, UCL Press, 1995.
- Jackendoff R., *The Architecture of the Language faculty*, MIT Press, 1997.
- Kaplan, F. *L'émergence d'un lexique dans une population d'agents autonomes*, Ph.D thesis, Université Paris VI, 2000.
- Kaplan, F., *La naissance d'une langue chez les robots*, Hermès, 2001.
- Keenan E., Comrie B., Noun Phrase Accessibility and Universal Grammar, *Linguistic Inquiry*, 8, p. 63-99, 1977.
- Keenan E., Hawkins S., The Psychological Validity of the Accessibility Hierarchy, in E. Keenan (éd.), *Universal Grammar: 15 Essays*, Croom Helm, p. 60-85, 1987
- Kirby S., Fitness and the selective adaptation of language, in J.R. Hurford, M. Studdert-Kennedy, C. Knight, *Approaches to the Evolution of Language*, Cambridge University Press, p. 359-383, 1998.
- Kirby S., *Function, Selection and Innateness: The Emergence of Language Universals*, Oxford University Press, 1999.
- Kirby S., Syntax without Natural Selection: How compositionality emerges from vocabulary in a population of learners, in C. Knight, M. Studdert-Kennedy, J.R. Hurford, *The Evolutionary Emergence of Language*, Cambridge University Press, p. 303-323, 2000
- Kohler K.J., The development of sound systems in human language, in J.R. Hurford, M. Studdert-Kennedy, C. Knight, *Approaches to the Evolution of Language*, Cambridge University Press, p. 265-278, 1998
- Komarova, N.L., Niyogi, P., Nowak, M.A., Evolutionary dynamics of grammar acquisition. *Journal of Theoretical Biology*, 209(1), p. 43-59, 2001
- Lambrecht K., *Information structure and sentence form*, Cambridge University Press, 1994.
- Langacker R.W., *Foundations of Cognitive Grammar*, Stanford University Press (2 tomes : vol. 1 : *Theoretical Prerequisites*, 1987 et vol. 2 : *Descriptive Application*, 1991).
- Lindblom B., Phonetic Universal in Vowels Systems, in J.J. Ohala, J.J. Jaeger (éds.), *Experimental Phonology*, Academic Press, p. 13-43, 1986
- Lindblom B., Systemic constraints and adaptive change in the formation of sound structure, in J.R. Hurford, M. Studdert-Kennedy, C. Knight, *Approaches to the Evolution of Language*, Cambridge University Press, p. 242-264, 1998.
- Livingstone D., Fyfe C., Modelling the evolution of linguistic diversity, in D. Floreano, J-D. Nicoud, F. Mondada F. (éds.), *Advances in Artificial Life*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, p. 704-708, Berlin, Springer-Verlag, 1999.
- Livingstone D., Fyfe C., Modelling Language-Physiology Coevolution, in C. Knight, M. Studdert-Kennedy, J.R. Hurford, *The Evolutionary Emergence of Language*, Cambridge University Press, p. 199-215, 2000.

- MacNeilage P.F., Prolegomena to a theory of the sound pattern of the first language, *Phonetica*, 51, p. 184-194, 1994.
- Maddieson I., *Patterns of sounds*, Cambridge University Press, 1984.
- Maddieson I., In search of universal, *International Conference on Phonetics Sciences*, San Francisco, p. 2521-2528, 1999.
- Nichols J., *Linguistic Diversity in Space and Time*, University of Chicago Press, 1992.
- Oliphant M., Batali J., Learning and the Emergence of Coordinated Communication, *Center for research on language Newsletter*, 11(1), 1996.
- Oudeyer P-Y., Self-organization of a lexicon in a structured society of agents, in P. Husbands, I. Harvey (eds.), *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life*, MIT Press, p. 726-729, 1997.
- Pagel M., The History, Rate and Pattern of World Linguistic Evolution, in C. Knight, M. Studdert-Kennedy, J.R. Hurford, *The Evolutionary Emergence of Language*, Cambridge University Press, p. 391-416, 2000.
- Phillips B., Lexical diffusion, lexical frequency, and lexical analysis, in J. Bybee, P. Hooper (éds.) *Frequency and the Emergence of Linguistic Structure*, Johns Benjamins, p. 123-136, 2001.
- Pinker S., *The Language Instinct*, William Morrow and Company, 1994.
- Popescu-Belis A., Theory and Experimentation in the Modeling of Language Emergence. *Fourth International Conference on the Evolution of Language*, Harvard University, Cambridge, MA, p.100, 2002
- Saunders G.M., Pollack J.B., The evolution of communication schemes over continuous channels, *Proceedings of the SAB'96 Conference on the Simulation of Adaptive Behavior*, MIT Press, 1996.
- Schwartz J.L., Boë L.J., Vallée N., Abry C., Major Trends in vowel system inventories, *Journal of Phonetics*, 25, p. 233-253, 1997a.
- Schwartz J.L., Boë L.J., Vallée N., Abry C., The dispersion-focalization theory of vowel systems, *Journal of Phonetics*, 25, p. 255-286, 1997b.
- Steels L., Self-organizing vocabularies, in C. Langton, T. Shimohara (éds.) *Artificial Life V*, MIT Press, 1996.
- Steels L., Synthesizing the origins of language and meaning using coevolution, self-organization and level formation, in J.R. Hurford, M. Studdert-Kennedy, C. Knight, *Approaches to the Evolution of Language*, Cambridge University Press, p. 359-383, 1998.
- Steels L., Computer simulations of the origins of case grammar, *Fourth International Conference on the Evolution of Language*, Harvard University, Cambridge, MA, 2002.
- Steels L., Kaplan F., Collective learning and semiotics dynamics, in D. Floreano, J-D. Nicoud, F. Mondada F. (éds.), *Advances in Artificial Life*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, p. 704-708, Berlin, Springer-Verlag, 1999.
- Steels L., Kaplan F., Bootstrapping Grounded Word Semantics, in T. Briscoe (éd.) *Linguistic evolution through language acquisition: Formal and Computational Models*, Cambridge University Press, 2001.
- Talmy L., *Towards a Cognitive Semantics*, MIT Press, 2000.
- Van Valin R.D. et LaPolla R.J., *Syntax - Structure, meaning and function*, Cambridge University Press, 1997.
- Victorri B., Langage et cognition : le malentendu cognitiviste, *Des lois de la pensée au constructivisme*, in M.J. Durand Richard (éd.), Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme, à paraître.
- Victorri B., Fuchs C., *La polysémie - construction dynamique du sens*, Paris, Hermès, 1996.
- Wang W. S-Y, Language change - a lexical perspective, *Annual Review of Anthropology*, 8, p. 353-371, 1979.
- Werner, G., Dyer M., Evolution of Communication in Artificial Organisms, in C.Langton, et.al. (ed.) *Artificial Life II*. Addison-Wesley, p. 659-687, 1991.
- Werner, G.M., Todd, P.M., Too many love songs: Sexual selection and the evolution of communication, in P. Husbands, I. Harvey (eds.), *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life*, MIT Press, p. 434-443, 1997.