

**Modélisation informatique de la co-évolution  
de la sémantique et de la syntaxe**

STEELS Luc

# Action " Origine de l'Homme, du Langage et des Langues "

## A. FICHE ADMINISTRATIVE

### Titre du projet :

.....  
Modélisation informatique de la co-évolution de la sémantique et de la syntaxe.....

### Mots-clés :

- Problèmes : émergence du langage, évolution des langues, créolisation.
- Méthodes : simulation informatique, sociétés d'agents, réseaux neuronaux, robots.
- Domaines : linguistique, intelligence artificielle, sciences cognitives.

### Résumé du projet (10 lignes maximum) :

Ce projet propose des modèles de l'émergence du langage fondés sur les agents logiciels et sur les robots. L'objectif principal du projet est d'étudier l'émergence de la grammaire, à savoir le passage d'une communication utilisant des messages non structurés (protolangage) à une communication régie par la syntaxe. Pour ce faire, nous étudierons l'amorçage de la syntaxe par la capacité sémantique, à savoir l'émergence d'une structure d'arguments qui organise les mots pleins à l'aide des mots grammaticaux. Dans le cas du groupe nominal, cela conduira à l'étude de la désignation des objets par les agents, que nous appliquerons à un modèle de la créolisation. Nous étudierons également l'implémentation de ces capacités dans une architecture neuro-mimétique détectant la structure des messages. Enfin, notre projet souhaite promouvoir la modélisation multi-agents grâce à des ateliers et à la rédaction d'un ouvrage de synthèse.

## 1. Responsable scientifique du projet

Nom : STEELS ..... Prénom : Luc.....

Grade : Professeur, Directeur de laboratoire.....

Discipline du responsable scientifique : Intelligence artificielle.....

Établissement de rattachement : Laboratoire Sony d'Informatique, Paris (Sony CSL).....

Adresse professionnelle : 6, rue Amyot 75005.....

Code postal : 75005                      Commune : PARIS

Tél : 01.44.08.05.01                      Fax : 01.45.87.87.50

E-Mail : steels@arti.vub.ac.be

## 2. Laboratoire ou organisme de rattachement de l'équipe de recherche

Intitulé : Laboratoire Sony d'Informatique, Paris (Sony CSL).....

Type de formation (*cocher la case utile*)

- Unités CNRS :  unité propre du CNRS                       unité associée ou mixte du CNRS

Préciser le code unité .....

Préciser la délégation régionale : .....

- Unités hors CNRS :  unité universitaire (*Préciser l'université*)

Autre (*Préciser : EPST, Association, équipe étrangère...*)

Institut de recherche privé.....

Nom du directeur de l'organisme : Luc Steels.....

Adresse : 6, rue Amyot.....

Code postal : 75005      Commune : PARIS

Tél : 01.44.08.05.01      Fax : 01.45.87.87.50

Membres partenaires :

Nom : Steels.....Prénom : Luc.....

Grade : Professeur.....E-Mail : steels@arti.vub.ac.be.....

Nom : Kaplan.....Prénom : Frédéric.....

Grade : Chercheur, docteur en informatique.....E-Mail : kaplan@csl.sony.fr.....

### 3. Autre(s) laboratoires ou organisme(s) partenaires

Intitulé : University of California at San Diego (UCSD).....

Department of Cognitive Science.....

Nom du directeur du département : Gilles Fauconnier.....

Discipline(s) couverte(s) par l'équipe : sciences cognitives, modèles de l'émergence du langage

Nom du directeur de l'équipe : John Batali.....

Membres partenaires :

Nom : Batali.....Prénom : John.....

Grade : Professeur Associé.....E-Mail : batali@cogsci.ucsd.edu.....

Nom : Popescu-Belis.....Prénom : Andrei.....

Grade : Postdoctorant.....E-Mail : apopescu@cogsci.ucsd.edu..

Nom : Groppe.....Prénom : David.....

Grade : Doctorant.....E-Mail : dgroppe@cogsci.ucsd.edu....

Nom : Liebscher.....Prénom : Robert.....

Grade : Doctorant.....E-Mail : rliebsch@cogsci.ucsd.edu...

Adresse : 9500 Gilman Drive, Mailbox 515.....

Code postal : 92093-0515      Commune : La Jolla, CA      Pays : États-Unis

Tél : (1) 858.534.6770 (secre.)      Fax : (1) 858.534.1128

Intitulé : Institut des Sciences Cognitives, Lyon - CNRS UPR 9075.....

Nom du directeur de l'institut : Marc Jeannerod.....

Discipline(s) couverte(s) par l'équipe : réseaux de neurones temporels, modélisation, psycholinguistique, acquisition du langage.....

Membres partenaires :

Nom : Dominey.....Prénom : Peter Ford.....

Grade : CR1 au CNRS, sect. 29.....E-Mail : dominey@isc.cnrs.fr.....

Nom : Déprez.....Prénom : Viviane.....

Grade : CR1 au CNRS, sect. 34.....E-Mail : deprez@isc.cnrs.fr.....

Adresse : 67, bd. Pinel.....

Code postal : 69675      Commune : BRON Cedex

Tél : 04 37 91 12 12      Fax : 04 37 91 12 10

Intitulé : Vrije Universiteit Brussels (VUB).....  
.....Laboratoire d'Intelligence Artificielle.....

Disciplines couvertes par l'équipe : modèles de l'émergence du langage, robotique

Nom du directeur de l'équipe : Luc Steels.....

Membres partenaires :

Nom : Zuidema.....Prénom : Jelle.....  
Grade : Chercheur.....E-Mail : zuidema@arti.vub.ac.be.....

Nom : Van Looveren.....Prénom : Joris.....  
Grade : Chercheur.....E-Mail : joris@arti.vub.ac.be.....

Adresse : Avenue de la Plaine, 2 .....  
Code postal : 1050                      Commune : Bruxelles                      Pays : Belgique

Intitulé : Laboratoire de Linguistique Formelle -- CNRS URA 1028.....

Disciplines couvertes par l'équipe : linguistique, langues créoles.....

Nom du directeur du laboratoire : Jean Lowenstamm.....

Membre partenaire :

Nom : Kihm .....Prénom : Alain.....  
Grade : DR2 au CNRS .....E-Mail : alain.kihm@linguist.jussieu.fr ..

Adresse : 2, place Jussieu.....  
Code postal : 75251                      Commune : Paris Cedex 05

Tél : 01.44.27.36.22

## B. PROJET SCIENTIFIQUE

### Modélisation informatique de la co-évolution de la sémantique et de la syntaxe

#### I. Aperçu du domaine de recherche

La modélisation informatique des processus linguistiques dynamiques a connu une croissance significative au cours des dix dernières années. D'un intérêt particulier sont les simulations de l'émergence du langage même, qui éclairent les conditions dans lesquelles celui-ci est apparu, et fournissent des moyens pour tester les théories proposées pour ce phénomène. Nous nous intéressons ici aux modèles fondés sur les sociétés d'agents logiciels ou de robots qui utilisent un système de communication afin de véhiculer des informations et survivre dans leur environnement.

Les expériences existantes ont principalement abordé l'ancrage et la dynamique des conventions lexicales, et leur application aux robots réels (cf. I.1). Toutefois, afin de saisir à l'aide de ces modèles la structure des expressions linguistiques, une collaboration plus serrée avec des linguistes est nécessaire. En particulier, la relation entre la structure sémantique des situations et la structure des expressions correspondantes a un rôle central à jouer dans l'amorçage de la faculté de langage (cf. I.2). Les mécanismes de cette relation doivent aussi être fondés sur la structure interne des agents, qui devraient idéalement pouvoir intégrer la perception, la représentation, l'action et la capacité communicative (cf. I.3). Nous pensons enfin qu'un phénomène spécifique nous permettrait d'étudier *in vivo* l'apparition d'un langage et la reproduire dans un modèle informatique : il s'agit de la créolisation (cf. I.4). – Après un aperçu des domaines abordés (Section I), nous résumerons les

réalisations précédentes des participants (Section II), puis nous exposerons les objectifs de ce projet (Section III).

### **I.1. La modélisation par agents de l'émergence et de l'évolution du langage**

D'un point de vue linguistique, notre approche des *systèmes de communication émergents* apporte des éléments de réponse au problème de l'ancrage individuel et collectif du langage, et de l'apparition et évolution des conventions linguistiques. Ces systèmes partagent avec les langues une large gamme de propriétés, puisqu'ils sont conventionnels, émergents, et parfois ambigus et sujets à erreurs ; en échange, ces systèmes sont également adaptatifs et robustes. À l'inverse, les langages formels de communication entre agents (ACLs), développés pour les applications industrielles, possèdent une structure formelle prédéfinie, qui les prive de la robustesse et de la souplesse du langage humain, et les rend peu intéressants pour la modélisation linguistique.

L'intérêt croissant dont notre domaine bénéficie est signe que l'évolution du langage, et en particulier les modèles de son émergence, sont de légitimes sujets d'étude scientifique. La modélisation informatique a reçu une large place dans la récente série de conférences sur l'évolution du langage (1996, 1998, 2000), ainsi que dans la revue *Evolution of Communication*. Dans son article inaugural, Luc Steels décrit la notion de *système adaptatif complexe*, et entreprend une classification des modèles selon plusieurs critères. L'une de ses conclusions est ainsi (Steels 1997c:4, nous traduisons) :

*Le paradigme des systèmes adaptatifs complexes et la modélisation par agents sont clairement pertinents pour le langage, en particulier pour deux domaines : la compréhension des origines du langage, et celle de la dynamique évolutive des systèmes linguistiques.*

Les modèles multi-agents qui nous intéressent ne visent donc pas directement l'autonomie ou l'adaptabilité des agents, ni des capacités cognitives évoluées en soi, mais bien les capacités de *communication* et leur analogie avec les langues. À ce titre, nombre de simulations souffrent d'une double absence *d'ancrage*. Premièrement, elles utilisent des agents hautement symbolisés, souvent détachés de tout environnement. Puis, elles ne semblent pas prendre suffisamment en compte les théories du langage déjà existantes. Enfin, les conventions de communication mises en évidence ne se rapportent en général à aucune langue réelle, et on ne voit pour l'instant aucune tentative pour diriger le système émergent vers une langue existante.

### **I.2. Le niveau de complexité de la structure d'agent**

Un des idées centrales dans la modélisation par agents, selon l'approche *bottom-up*, est que la structure des agents doit être gardée aussi simple que possible, la complexité résultant en fait de leur interaction. Les résultats intéressants obtenus jusqu'ici avec des structures relativement simples tendent à confirmer cette idée. Toutefois, la plupart des modèles conçus jusqu'à présent fournissent aux agents une importante quantité d'information procédurale concernant le protocole de dialogue.

Les réseaux de neurones artificiels, déjà utilisés dans certaines simulations, permettent une implémentation incrémentale des facultés sensori-motrices, de représentation et de communication. Plusieurs tentatives ont été réalisées, visant à utiliser le paradigme sub-symbolique (ou neurosymbolique) pour donner aux réseaux de neurones des capacités linguistiques. Cependant, ces systèmes n'étaient pas conçus pour interagir avec d'autres agents, mais devaient seulement traiter une entrée et fournir une réponse après apprentissage.

Ainsi, J. Elman (1990) a proposé à l'UCSD une architecture connexionniste récurrente, permettant d'apprendre des structures séquentielles données en entrée, et de prévoir la suite d'une séquence. Le système DETE (Nenov et Dyer 1988a,b) apprend à associer des scènes visuelles se déroulant sur une matrice d'entrée, et des séquences lexicales ou phrases ; DETE est ensuite capable de décrire de nouvelles scènes présentées. Le système de T. Regier (1996) apprend des systèmes de prépositions à partir de scènes spatiales faisant intervenir un " mobile " et un " repère " (cinq systèmes provenant de cinq langues différentes ont été appris).

Une limitation importante de ces systèmes est leur incapacité à catégoriser des régularités structurelles d'ordre supérieur dans les données, par exemple rapprocher la séquence ABA de CDC et AAB de CCD. Ces systèmes ne peuvent donc pas généraliser les règles connues pour les appliquer aux séquences formées de mots nouveaux (cf. toutefois la discussion dans *Science*, 284, pp. 483 ff.). La capacité de catégoriser et de généraliser la structure abstraite des stimuli semble portant indispensable à la syntaxe, et l'on a effectivement montré que les bébés à partir de sept mois pouvaient extraire une structure abstraite des stimuli sonores présentés, et la reconnaître dans des stimuli formés d'éléments nouveaux (Marcus, Vijayan, Bandi Rao et Vishton 1999). Nous verrons au II.2 les réponses apportées par P.F. Dominey (ISC) à ce problème.

### I.3. La linguistique : inspiration et référence pour la modélisation multi-agents

#### I.3.1. Vers l'émergence de la grammaire : la structure des énoncés linguistiques

Faire émerger des structures grammaticales dans un système de communication entre agents est le principal problème actuel. Plusieurs éléments peuvent caractériser la "grammaire" : (1) l'organisation du vocabulaire des agents en classes recevant un traitement différent (Steels 1997b, 1998a) ; (2) le regroupement des mots reliés, dans des syntagmes contigus ; (3) l'utilisation de mots grammaticaux, mots qui n'ont pas de sens plein par eux-mêmes – (2) et (3) sont illustrés dans (Batali in press).

Une option qui n'a pas reçu suffisamment d'attention de la part des modélisateurs est l'évolution de la structure d'arguments du verbe, qui possède des origines sémantiques, vers une structure fonctionnelle plus rigide, partagée par des classes de verbes (dans les groupes verbaux) et de noms (dans les groupes nominaux). Cette transition, parfois appelée "grammaticalisation", possède une facette visible qui est le processus par lequel un item lexical acquiert un rôle purement grammatical – un mot de la "classe ouverte" passe dans la classe "fermée", devenant un mot ou bien un morphème de fonction.

Cette transition intervient à la fois dans l'évolution linguistique diachronique et dans la créolisation, mais présente des différences entre les deux domaines. Dans le premier cas, elle est graduelle et implique une évolution au sein d'une grammaire préexistante. Dans le second cas, elle peut être abrupte et impliquer l'emprunt direct d'un élément lexical du superstrat en tant qu'élément fonctionnel du créole sans aucun développement interne (Bruyn 1995). Les deux cas semblent toutefois présenter suffisamment de similarités pour motiver un traitement commun : tous deux sont unidirectionnels et recourent à une généralisation sémantique et une réduction phonologique d'éléments de même type. D. Bickerton (1981, 1984, 1990) a été probablement le premier à formuler l'hypothèse qu'une transition analogue a pu jouer un rôle dans la naissance du langage.

#### I.3.2. Pidgin/ Créole vs. protolangage/langage: la créolisation

Le terme de créolisation recouvre une variété de situations, car la formation des langues créoles, à partir en général d'une langue substrat et d'une langue superstrat, est un phénomène complexe et particulier à chaque langue (Kihm 1991, 2000). Nous nous intéressons ici, en vue de l'application à la modélisation informatique, à la théorie de D. Bickerton (1981, 1984), qui considère que le cas exemplaire de créolisation est l'apparition d'une langue en une seule génération, "inventée" par les enfants qui utilisent seulement les mots du pidgin parlé par leurs parents. Selon Bickerton, les conventions syntaxiques de la nouvelle langue sont le produit d'un "bioprogramme linguistique", et ce en l'absence de régularités syntaxiques dérivées du pidgin ou d'une autre langue substrat. Il s'agit bien sûr d'un modèle hautement idéalisé, et Bickerton lui-même n'en donne que l'exemple du créole hawaïen. D'autres situations appuient toutefois cette théorie, tels les systèmes de signes développés par les enfants sourds-muets isolés, qui développent des régularités syntaxiques originales (Goldin-Meadow, Butcher, Mylander et Dodge 1994, Goldin-Meadow et Mylander 1998), et le cas plus récent de la naissance d'une nouvelle langue de signes au Nicaragua (Kegl, Senghas et Copola 1999).

Afin d'utiliser ces modèles pour la simulation informatique, et plus précisément afin de reproduire le saut qualitatif entre des conventions communicatives lexicales et l'utilisation de messages structurés, il importe de connaître l'origine des régularités syntaxiques qui émergent dans la créolisation. Sont-elles le fruit d'un "organe du langage", ou bien proviennent-elles d'une "grammaticalisation" de régularités sémantiques provenant de la perception de situations extérieures ? En d'autres termes, faut-il munir nos agents d'une structure interne contenant déjà des représentations syntaxiques (à des paramètres près), ou bien faut-il seulement leur donner la possibilité de généraliser et de figer en schémas les représentations sémantiques des situations ? Quelle que soit la réponse, la simulation de la créolisation permettrait de réaliser un modèle informatique d'émergence soudaine d'une langue.

## II. Compétences et réalisations des participants

Les accomplissements des participants démontrent leur complémentarité pour la modélisation du "saut grammatical". L'orientation dominante des participants est la simulation multi-agents : le Laboratoire d'Informatique **Sony**, le Département des Sciences Cognitives de l'**UCSD** et le Laboratoire d'AI de la **VUB** sont parmi les principaux acteurs du domaine. Une expertise supplémentaire est nécessaire pour la représentation de capacités syntaxiques dans les agents : les architectures d'agent (P. Dominey, **ISC**) et les formats de représentation (V. Déprez, **ISC**). Le modèle de créolisation doit être conçu et validé selon les données de la créolistique et des autres situations d'émergence du langage (A. Kihm, **LLF**).

## II.1. Laboratoire Sony d'Informatique et Laboratoire d'Intelligence Artificielle, VUB

Sous la direction de Luc Steels, ces deux équipes ont acquis une expertise de pointe dans l'ancrage du sens des mots dans des agents physiques, situés dans un environnement réel. Elles ont étudié en détail l'établissement de conventions pour les catégories sémantiques des objets et pour leur expression lexicale, et les ont validées lors de nombreuses expériences. Ces résultats caractérisent dans une certaine mesure le niveau du protolangage dans le modèle de Bickerton, et indiquent ainsi l'étape à suivre, à savoir l'émergence des catégories grammaticales et de la syntaxe.

L'environnement robotique de l'équipe du VUB AI Lab a été développé lors de travaux sur le contrôle sensori-moteur et l'interaction sociale des agents physiques en compétition pour des ressources (Steels 1994a, 1994b). Les simulations purement logicielles, sur la plateforme *Babel* (McIntyre 1998) ont permis quant à elles de tester les modèles avant le passage aux robots – étude du lexique (Steels 1996b), expérience avec la syntaxe (Steels 1998a). Afin de disposer d'une véritable perception visuelle grâce à une caméra orientable, des robots non mobiles ont été conçus, dits "Talking Heads", avec comme sujet de dialogue un tableau muni d'objets géométriques. La catégorisation perceptive des robots consiste en une division de l'intervalle des valeurs possibles de chaque paramètre perceptif en segments, qui peuvent à leur tour être divisés pour affiner les catégories (Steels 1996a). Ce mécanisme a été conservé dans les simulations ultérieures, et l'évolution des catégories a été elle-même étudiée (Steels 1997a).

L'émergence d'un lexique est l'une des expériences les plus frappantes : les robots donnent des noms aux traits catégorisés, et tentent à travers les dialogues ou "jeux de nommage", d'identifier des objets du contexte. Le succès permet à certaines conventions lexicales de se répandre, d'abord en simulation logicielle (Steels 1996b), puis parmi des robots mobiles possédant un contrôle fin des actes de *pointage* vers les objets. On met ainsi en évidence l'*ancrage par association* du lexique dans les perceptions (Steels 1998b, Steels et Vogt 1997). Enfin, l'utilisation des "Talking Heads" met en évidence l'élaboration collective (des humains pourront bientôt interagir) et l'évolution des conventions de nommage dans une population (Steels 1997b, 1999). Dans les premières expériences sur la syntaxe, celle-ci est modélisée par des associations ou cadres regroupant plusieurs mots émis ensemble dans une même situation ; ces cadres se généralisent peu à peu, et engendrent en retour des catégories "syntaxiques" pour les mots (Steels 1997b). D'autres études explorent un formalisme syntaxico-sémantique original (Steels 1998a), ainsi que les "stratégies linguistiques" (cf. III.1).

## II.2. UCSD Cognitive Science Department

Les expériences menées dans ce département se focalisent sur l'émergence de la grammaire, en étudiant la façon dont des agents logiciels parviennent à encoder dans l'ordre des mots les propriétés sémantiques de la situation décrite. Une première expérience (Batali 1998) propose un modèle d'agent dont la structure interne utilise des réseaux récurrents, comme ceux d'Elman (1990). Cela permet de simuler la production et l'interprétation de messages séquentiels (chaînes de caractères), décrivant un état conceptuel donné aux agents. Les agents possèdent un "vecteur sémantique", c'est-à-dire une couche de 10 neurones représentant les états conceptuels, interprétés comme la conjonction d'un prédicat –  $2^6$  possibilités – et d'un pronom personnel –  $2^4$  possibilités. L'apprentissage consiste pour un agent à ajuster les poids de son réseau en fonction de l'état conceptuel qu'il doit trouver, qui lui est donné. Le couplage entre la "sémantique" (l'état conceptuel transmis) et la structure "grammaticale" du message (l'ordre des caractères) est réalisé grâce au réseau neuronal récurrent, qui permet à l'émetteur d'interpréter son propre message en même temps qu'il le produit. Le message produit par l'émetteur est ainsi celui qu'il attendrait, en tant que récepteur, pour le vecteur sémantique respectif.

J. Batali a également proposé un mécanisme modélisant la segmentation des messages en mots et l'organisation de ceux-ci en syntagmes dans les messages, fondé sur la notion d'"exemplaires" (Batali in press). Les "exemplaires" stockent des relations entre les messages (chaînes de caractères) et les représentations sémantiques des situations. Ces représentations sont des conjonctions de formules de la forme <propriété, référent(s)>. Les référents sont des nombres indiquant les participants à la situation, et les propriétés peuvent être unaires ou binaires (relations). Quand un agent émetteur doit exprimer une situation donnée, il crée un nouvel exemplaire (c.-à-d. une association signification / chaîne de caractères) ou utilise la combinaison et/ou la substitution avec les exemplaires qu'il possède déjà. Si le récepteur est en mode "apprentissage", il emploie la situation et le message pour mettre à jour son propre ensemble d'exemplaires. En mode "test", il doit inférer la situation décrite par le message reçu. S'il réussit, la précision communicative globale (ou succès) augmente, et ses exemplaires sont renforcés.

Les agents sont capables de remplacer, dans l'analyse ou la génération, une partie d'un exemplaire par un autre exemplaire (substitution). Les chaînes de caractères et les situations sont ainsi peu à peu segmentées en constituants irréductibles. Réciproquement, des exemplaires sont assemblés à chaque dialogue pour décrire de nouvelles situations. Cependant, sans un mécanisme d'apprentissage judicieux, un agent se bornerait à enregistrer seulement des associations non structurées entre messages et significations. Ce mécanisme rend la création de tels exemplaires plus coûteuse que la réutilisation d'exemplaires élémentaires avec des substitutions et des combinaisons. Seulement les exemplaires fréquemment utilisés sont donc renforcés.

La situation de départ est ici une utilisation "complexive" du langage (associations message / situation), sans niveaux intermédiaires. Les résultats montrent cependant que dans chaque population, un ensemble d'exemplaires jouant le rôle de règles grammaticales émerge, chacun correspondant à une situation modèle. En général, leur structure interne est partitionnée : les formules sont groupées selon les référents. Il y a également accord sur le lexique (mots associés aux formules singleton) utilisé dans les substitutions sur les exemplaires complexes. Des mots jouant seulement des rôles grammaticaux émergent parfois.

Les expériences menées par A. Popescu-Belis, d'abord au LIMSI-CNRS, Orsay, puis à l'UCSD, abordent plusieurs problèmes connexes liés aux simulations multi-agent (Popescu-Belis 1999). Ainsi, l'émergence de conventions portant sur des paramètres syntaxiques a été étudiée en donnant aux agents la possibilité d'utiliser une grammaire simple, à base d'arbres adjoints. Un modèle de la représentation dans les agents du statut référentiel des objets a été proposé, fondé sur les capacités perceptives. Enfin, un aspect en cours d'étude est la modélisation mathématique de l'évolution des conventions communicatives, d'abord lexicales. Ces études décrivent la vitesse de convergence vers un lexique commun selon différents protocoles de dialogue, et notamment en fonction du "conservatisme linguistique" des agents.

### **II.3. Institut des Sciences Cognitives**

#### *II.3.1. Modélisation par réseaux de neurones*

Les réseaux neuronaux représentent une direction prometteuse pour l'implémentation de compétences grammaticales, intégrant les fonctions sensori-motrices, représentationnelles et de communication. Toutefois, comme nous l'avons vu, les réseaux récurrents simples paraissent incapables de détecter des structures abstraites dans les données. P.F. Dominey a alors proposé un modèle connexionniste d'apprentissage de la langue (Dominey 1997, 1999 ; Dominey et Ramus 2000) issu de travaux sur la modélisation de l'apprentissage de séquences sensori-motrices non linguistiques (Dominey, Arbib et Joseph 1995, Dominey, Lelekov, Ventre-Dominey et Jeannerod 1998).

Une séquence de symboles peut ainsi se décrire sur deux plans : en termes de structure de surface, et en termes de structure abstraite ou "syntaxique". La structure abstraite est une forme de règle "syntaxique" définie par les transformations entre des éléments qui se répètent. Par exemple, "ABC → BAC" et "DEF → EDF" ont une structure abstraite identique mais des structures de surface différentes. Pour effectuer la catégorisation correcte des structures abstraites, P.F. Dominey a proposé alors :

- 1 - l'ajout au réseau d'une mémoire à court terme (MCT);
- 2 - la comparaison continue entre l'élément courant et les éléments de la MCT afin de "formuler" une règle;
- 3 - un mécanisme utilisant cette règle pour produire une réponse adaptée.

L'existence d'une dissociation computationnelle entre le traitement de la structure de surface et celui de la structure abstraite est soutenue à la fois par les simulations, et des expériences neurologiques chez des sujets normaux (Dominey, Lelekov, Ventre-Dominey et Jeannerod 1998) et chez les patients neurologiques (Dominey et Georgieff 1997). À l'aide de cette architecture de Réseau Récurrent Abstrait, P.F. Dominey et F. Ramus (2000) ont proposé un modèle capable de simuler la sensibilité des bébés à la structure abstraite des mots dans une langue imaginaire (Marcus, Vijayan, Bandi Rao et Vishton 1999).

Le traitement syntaxique des phrases simples et complexes chez l'adulte a également été étudié. On peut en effet considérer que la structure syntaxique d'une langue correspond à une multitude de structures abstraites. La sélection d'une règle (structure syntaxique) parmi d'autres serait alors guidée d'abord par les morphèmes ou les mots grammaticaux. Dans ce cas les noms rentrent dans la MCT gérée par le réseau récurrent qui traite les mots grammaticaux pour former une représentation syntaxique. Le modèle est capable de passer des épreuves de compréhension syntaxique, et certaines "lésions" du réseau récurrent rendent le système agrammatical, simulant par là des corrélats non-linguistiques de l'agrammatisme qui ont été confirmés expérimentalement.



### II.3.2. La structure des énoncés linguistiques

Pour ce qui est des études linguistiques de l'évolution syntaxique, V. Déprez s'est intéressée au processus d'apparition de mots ou de morphèmes grammaticaux pour l'expression des déterminants dans les groupes nominaux, ainsi que pour les temps-modes-aspects verbaux. Ces éléments permettraient de modéliser l'émergence de la syntaxe dans les sociétés d'agents communicants sur des bases conformes aux théories linguistiques actuelles, évitant ainsi d'utiliser des modèles non confirmés.

Les expériences de J. Batali (in press) montrent que, en toute généralité, un code de communication peut évoluer vers une structuration hiérarchique arborescente des messages. Or, cette description convient à la description des propositions et phrases en langage naturel : celles-ci se structurent autour d'un verbe ou projection lexicale verbale, dominé dans la structure arborescente par des projections morpho-syntaxiques, dites projections fonctionnelles, exprimant le temps le mode et l'aspect. Pour ce qui est des groupes nominaux, porteurs de référence, une structure analogue a été proposée (Abney 1987).

En analysant des exemples dans plusieurs langues et à plusieurs époques, on constate que la fusion entre les projections lexicales (verbe ou nom) et les projections fonctionnelles (marqueurs TMA ou déterminants) peut s'opérer de diverses façons. Ainsi, le verbe peut se déplacer vers le haut pour s'adjoindre à une projection fonctionnelle, auquel cas il portera lui-même les informations grammaticales présentes dans les têtes fonctionnelles. Alternativement, les projections fonctionnelles peuvent contenir des morphèmes libres, sorte d'auxiliaires porteurs des informations pertinentes.

Dans ce cadre théorique, V. Déprez (Déprez 1997, 1999) a suggéré de modéliser le processus d'émergence des mots de fonction comme le passage d'un élément qui exige l'insertion dans une structure lexicale (comprenant une information catégorielle V et une information thématique, p.ex. pour un verbe la relation structurale avec ses arguments), à la formation d'un élément qui exige une insertion directe dans la structure fonctionnelle, sans information catégorielle ou argumentale. Ce passage peut être graduel (comme en diachronie), impliquant en ce cas la perte progressive d'une transformation de déplacement de l'élément concerné de sa projection lexicale vers une projection fonctionnelle en faveur d'une insertion directe dans la projection fonctionnelle cible, ou bien abrupte, impliquant une insertion directe dans la structure fonctionnelle sans qu'aucun déplacement préalable n'ait jamais opéré une mise relation entre structure lexicale et structure fonctionnelle. Ainsi, la grammaticalisation serait donc le passage de la mise en relation, dans la phrase, de deux structures syntaxiques distinctes, vers un processus d'insertion qui met en relation directe un élément *lexical* et une structure syntaxique donnée.

Des données provenant également de l'acquisition du langage montreraient que l'enfant commence par acquérir l'élément lexical à la base de la structure arborescente de la phrase, puis ajoute les éléments fonctionnels, et la façon de les combiner avec l'élément lexical. En effet, le marquage temporel et les déterminants apparaissent progressivement dans les productions linguistiques de très jeunes enfants (Déprez 1995, Déprez et Pierce 1993). D'autres données provenant de la créolistique soulignent aussi l'importance de ces relations entre structure lexicale et structure fonctionnelle, que ce soit dans la phrase ou dans les syntagmes nominaux. En particulier, l'émergence d'un système de déterminants distinguant les références spécifiques et non spécifiques présente des similarités frappantes dans l'acquisition et dans la créolisation, rendant ainsi prometteuse son application aux modèles d'émergence du langage.

## III. Objectifs du projet

### III.1. L'émergence de capacités syntaxiques à partir des capacités sémantiques

Le but premier de ce projet est de réunir les approches du "protolangage robotique" et de la "syntaxe émergente", afin de concevoir de nouvelles simulations qui utilisent à la fois un ancrage réaliste des symboles linguistiques et la capacité d'ordonner ceux-ci, afin d'augmenter considérablement la puissance expressive du système de communication. Ce premier objectif est ainsi une première expérience avec la syntaxe dans un environnement physique, c'est-à-dire une simulation de la transition du protolangage vers le plein langage qui a pu avoir lieu en réalité il y a environ 100.000 ans.

Cette expérience puisera son inspiration à la fois dans le mécanisme à base d'exemplaires proposé par l'UCSD, et de la notion complémentaire des *stratégies linguistiques* actuellement explorée par Sony CSL. Les stratégies linguistiques sont des méthodes pour analyser/générer/apprendre/inventer certains éléments de la langue, et sont sujettes à convention et à évolution. Ces stratégies linguistiques

émergentes peuvent être introduites dans le mécanisme à base d'exemplaires afin de stocker des solutions, puis les recherches et les réutiliser facilement.

En même temps, le nouveau mécanisme proposé devra autant que possible être conforme aux résultats linguistiques généralement admis, notamment pour la structure des messages et le fonctionnement des mots grammaticaux. Cela garantirait que le système de communication émergent sera une simulation réaliste du langage humain, et non d'un autre système de communication. Toutefois, étant donné le caractère dynamique des conventions communicatives des agents, plusieurs systèmes de communication peuvent émerger dans une population donnée : par conséquent, la comparaison avec les données linguistiques devra fournir les éléments pour distinguer les systèmes non linguistiques. Un de nos buts est alors de trouver la *quantité minimale de capacités linguistiques initiales* que l'on doit donner aux agents pour que des systèmes de communication linguistiques, et seulement eux, émergent dans la population.

Dans une première étape, une expérimentation logicielle du mécanisme proposé sera réalisée, en utilisant la plateforme de simulation de Babel de Sony CSL. Cela nous permettra de développer et de tester le modèle théorique, tout en travaillant ensemble depuis des sites éloignés (San Diego, Paris). Dans l'étape suivante, l'implémentation du modèle dans les "Talking Heads" permettra à celles-ci de comprendre et de produire des messages complexes à propos de l'environnement. Leur interaction avec les agents humains, qui a été expérimentée pour les jeux de nommage, sera étendue pour tenir compte de la syntaxe, imposant de ce fait beaucoup moins de limites au pouvoir d'expression. Comme but à plus long terme, l'utilisation de robots autonomes tels ceux du VUB AI Lab devrait fournir un cadre encore plus réaliste pour les expériences, l'interaction entre les robots et l'environnement devenant plus complexe.

### **III.2. Contrôle des agents par des réseaux récurrents temporels / abstraits**

La structure interne des agents doit être rendue plus complexe afin de manipuler la syntaxe. Sans nous lier préalablement à aucune théorie syntactique, nous pensons toutefois qu'une condition minimale pour la capacité syntactique est la sensibilité des agents à la structure sérielle abstraite des messages. Par conséquent, il est nécessaire de développer des réseaux neuronaux qui possèdent cette capacité (à l'image des expériences de Dominey et de Batali) et d'intégrer ces réseaux dans une structure d'agent plus complète. Les développements auront alors un aspect robotique (contrôle sensorimoteur, système de valeurs), aussi bien qu'un aspect linguistique. Tandis que le premier doit être abordé en relation avec le but précédent (III.1), le second peut être étudié en relation avec les données linguistiques.

Nous proposons d'explorer la capacité des ARN (abstract recurrent networks) de simuler le processus d'émergence des déterminants et des marqueurs de temps-mode-aspect. Pour réaliser ces études nous devons établir la correspondance entre les données de la linguistique et les représentations internes aux modèles. Pour certains aspects de nos hypothèses, ces correspondances existent déjà, comme la distinction entre mot de fonction et mot de contenu, et la grammaticalisation par changement de catégorie. Cela nous permet de commencer assez directement le test de nos hypothèses par des simulations des différentes "conditions initiales" intervenant dans la créolisation (et aussi, par ailleurs, dans l'acquisition d'une langue première).

Une nouvelle architecture de réseau neuronal sera développée pour répondre pleinement au problème. Spécifiquement, nous supposons que dans l'acquisition comme dans la créolisation, la mise en place de la structure récursive, arborescente, du langage nécessite (1) une représentation cognitive des agents, des objets, des événements et du temps, et (2) une computation mentale pour paramétrer la correspondance entre ces représentations cognitives et les représentations linguistiques. À présent, des mécanismes primitifs simulent ces opérations (Dominey 1999), en attendant des mécanismes plus évolués et intégrés dans la structure d'agent utilisée par ailleurs.

### **III.3. Un modèle à base d'agents pour la créolisation**

Il y a dans le domaine de la modélisation un certain flou concernant la nature exacte de l'"émergence" qui est modélisée. Au moins quatre phénomènes distincts peuvent se ranger sous ce terme : (1) l'apparition du langage dans l'espèce humaine ; (2) l'évolution dans le temps d'une langue donnée ; (3) l'acquisition d'une première langue ; (4) la créolisation. Notre but global est d'apporter un éclairage sur le premier point grâce à la simulation d'un scénario. Mais au-delà de cela, nous proposerons également une méthode pour faire évoluer les conventions linguistiques des agents vers une langue existante, inspirée de la créolisation. L'idée sera de se servir des techniques symboliques d'intelligence artificielle pour construire des agents parlant le pidgin, et de nos modèles dynamiques pour les agents "nouveau-nés" qui développent une nouvelle langue.

Les données disponibles sur l'apparition du langage étant très éparses, on pourrait douter de la possibilité de tester nos modèles face à la "réalité" afin de les valider (inversement, nos modèles peuvent en fait aider à tester expérimentalement des théories de l'apparition de langage). C'est pourquoi nous devons appliquer nos modèles à d'autres situations d'émergence, pour lesquelles les données sont plus nombreuses, et parmi celles-ci, au phénomène complexe de la créolisation. Nous tenterons ainsi de proposer un modèle paramétrable à base d'agents, qui puisse expliquer les différentes situations de créolisation. Idéalement, l'on devrait compter parmi les paramètres importants du système la vitesse de créolisation, ainsi que l'influence respective ou le "prestige" (Marsico, Coupé et Pellegrino 2000) des langues substrat et superstrat.

#### **III.4. L'émergence des déterminants et des capacités référentielles**

La référence est un lien central entre le langage et la réalité. Les jeux actuels de langage entre les agents font intervenir des références élémentaires aux objets présents dans l'environnement. Cependant, dès que le code de transmission deviendra grammatical, il permettra aux agents de dénoter des cas référentiels plus complexes, comme ceux définis dans (Popescu-Belis 1999). La solution élémentaire déjà proposée pour l'expression des cas référentiels sera développée en rapport avec les études linguistiques des déterminants du groupe nominal. Cette direction s'avère ainsi être un point de convergence central entre : (1) la représentation des cas référentiels dans les agents, (2) la grammaticalisation des déterminants du groupe nominal, et (3) l'évolution du système des déterminants au cours de la créolisation (un point bien documenté). L'objectif ici est d'apporter des arguments expérimentaux et théoriques pour un modèle de l'apparition de la capacité référentielle, avec des implications pour la philosophie du langage.

#### **III.5. Synthèse et diffusion des connaissances**

Notre initiative visant à structurer et résumer, selon un vocabulaire unifié, les principaux résultats de notre domaine est une partie importante de ce projet. Cela rendra ces résultats aisément disponibles à la communauté scientifique, par exemple à la linguistique évolutionniste, la linguistique historique, l'intelligence artificielle, la théorie des jeux, la robotique. Étant des contributeurs majeurs à ce domaine relativement jeune, les participants au présent projet sont en mesure de produire une synthèse qui soit actuelle, complète et claire. Deux actions différentes vont dans cette direction.

Premièrement, un ou deux ateliers sur le thème de la simulation multi-agent du langage seront organisés à Paris, de sorte que les chercheurs européens très actifs dans ce domaine puissent avoir un forum pour les réunions et la discussion. En particulier, cela favoriserait l'interaction avec les groupes britanniques de chercheurs, par exemple celui d'Edimbourg. Ces ateliers constitueraient également des "vitrines" de notre domaine, et un livre contenant les meilleures contributions serait édité après chaque atelier.

Un deuxième objectif est la rédaction d'un "manuel de simulation multi-agent de l'évolution du langage", essayant ainsi de résumer, même brièvement, la plupart des recherches entreprises dans ce domaine, qui pour l'heure ne sont pas d'un accès facile. Des vues synthétiques du domaine aussi bien que des articles plus étendus consacrés à certaines simulations seraient rédigés par les membres du présent projet. En effet, plutôt qu'une introduction au domaine suivie de réimpressions des articles existants il est préférable de décrire les simulations (environ deux douzaines) dans un cadre descriptif homogène. Le livre prendrait probablement 12-18 mois, et il pourrait être édité simultanément en français et anglais.

## **IV. Collaborations et intégration dans l'appel à projets**

#### **IV.1. Autres collaborations envisageables**

D'autres collaborations peuvent s'avérer utiles pour atteindre nos objectifs. Par exemple, les vues de la sémantique cognitive, issues de l'UCSD, pourront renforcer la base théorique du couplage syntaxico-sémantique. Concernant les réseaux neuronaux, des contacts sont maintenus avec Michael A. Arbib (University of Southern California), et pour la créolisation, avec Karl Erland Gadelii (Université de Göteborg). La présence de Jeff Elman à l'UCSD serait également à exploiter sur le problème des réseaux récurrents. Des données concernant la grammaticalisation dans l'acquisition du langage enfin sont disponibles auprès de Cornelia Hamman (Université de Genève).

#### **IV.2. Thèmes de recherche abordés**

Notre projet relève des thèmes 3.1, 3.3, 3.4 et 4.2 indiqués dans l'appel à projets du CNRS auquel nous répondons. Nous concevons le langage comme un système adaptatif complexe (4.2), et tentons d'apporter des arguments expérimentaux à la thèse que cela est la source de plusieurs universaux

linguistiques (3.3). La mise en place de modèles informatiques utilisant la créolisation est une voie susceptible d'éclairer les rapports entre l'évolution du langage et l'acquisition du langage (3.4). Enfin, les réseaux neuronaux utilisés dans le projet s'inspirent des modèles neurophysiologiques actuels (3.1).