

Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents : Interaction, émergence et systèmes complexes

**Rapport présenté pour l'obtention
de l'Habilitation à Diriger les Recherches
en Informatique
(27^{ème} section)**

le 8 novembre 2002

par Jean-Pierre Müller

Jury :

M. Paul Bourguine, HDR, CREA, Ecole Polytechnique	Examineur
M. Alexis Drogoul, Professeur, LIP6, Université Paris VI	Invité
M. Jacques Ferber, Professeur, LIRMM, UMII	Examineur
M. Les Gasser, Professeur, University of Illinois	Rapporteur
M. Jean-Paul Haton, Professeur, LORIA, Université de Nancy	Rapporteur
Mme Anne Nicolle, Professeur, GREYC, Université de Caen	Examineur
M. Jean Sallantin, DR CNRS, LIRMM	Président
M. Luc Steels, Professeur, ULB, Université Libre de Bruxelles	Rapporteur
M. Jacques Weber, Professeur, CIRAD	Examineur

1	Introduction.....	4
2	Les systèmes autonomes	5
2.1	Introduction.....	5
2.2	La thèse de doctorat	6
2.3	Le projet PNR-23	7
2.3.1	Introduction.....	7
2.3.2	Etat de l'art.....	7
2.3.3	Architecture	10
2.3.4	Représentation	11
2.3.5	Conclusion	13
2.4	Architecture de système autonome	14
2.4.1	Introduction.....	14
2.4.2	Etat de l'art.....	15
2.4.3	Architecture de contrôle hiérarchique.....	19
2.4.4	Catégorisation	21
2.4.5	Approche générale	22
2.5	Sciences cognitives	24
2.6	Résumé.....	24
2.7	Références.....	25
3	Les systèmes multi-agents	30
3.1	Résolution de problèmes multi-agent	33
3.1.1	La programmation orientée-agent.....	33
3.1.2	L'émergence	35
3.1.3	Les structures d'interaction.....	36
3.1.4	La méthodologie	37
3.1.5	Quelques approches concrètes	38
3.1.6	La description du niveau micro	42
3.2	Modélisation et simulation multi-agent	44
3.2.1	La simulation multi-agent des écosystèmes sylvo-patoraux.....	46
3.2.2	Le cahier des charges	46
3.2.3	L'intégration multi-points de vue	46
3.2.4	L'intégration multi-modèle.....	47
3.2.5	Les représentations du temps	48
3.2.6	Les représentations de l'espace.....	48
3.2.7	Résumé.....	49
3.3	Résumé.....	50
3.4	Références.....	50
4	Notre projet de recherche.....	54
5	Remerciements.....	58

1 Introduction

En tant que professeur titulaire d'une chaire d'Informatique à l'Université de Neuchâtel du 1^{er} octobre 1987 au 31 juillet 2001, j'ai dirigé une équipe de recherche en Intelligence Artificielle qui a travaillé longtemps sur deux thèmes complémentaires:

- le domaine des *agents autonomes* qui consiste à construire des entités capables d'organiser leurs activités pour réaliser des tâches déterminées sans intervention humaine ;
- les *systèmes multi-agents* dont le problème consiste à comprendre comment une société d'agents peut s'organiser de façon à résoudre des problèmes ou produire des structures qu'aucun agent ne peut résoudre ou produire individuellement.

Les systèmes autonomes et les systèmes multi-agents constituent un changement de paradigme important dans le domaine de l'intelligence artificielle. Il s'agit du même changement de paradigme qui fait que l'informatique s'intéresse de plus en plus aux problèmes du calcul distribué (parallélisme massif, etc.), que le management d'entreprise abandonne les structures monolithiques pour des structures réparties. Le défi du futur est la *complexité* qui ne peut être abordée que

- par une collaboration d'experts qui ont chacun une vue partielle du problème mais dont aucun ne peut avoir une vue globale détaillée: c'est, entre autres, la problématique des systèmes multi-agents.
- par la gestion adéquate de la dynamique des événements extérieurs qui ne sont que partiellement prédictibles et de leur appropriation dans des dynamiques d'apprentissage: c'est la problématique des agents autonomes.

Si l'intelligence artificielle a connu et connaîtra encore de nombreux succès sur des problèmes ponctuels, il est de notoriété publique que les résultats proposés supportent très mal une application sur des problèmes de grande dimension. Nous pensons que les systèmes multi-agents nous fournissent une méthodologie pour aborder des problèmes à la fois hétérogènes et de grande dimension et que les systèmes autonomes nous permettent de traiter la prise en compte d'un environnement complexe, car *la complexité est à la fois dans les systèmes que nous réalisons et dans les problèmes que nous abordons*.

Ces deux problématiques complémentaires ont fusionné en 1999 en une seule, à savoir les systèmes multi-agents, en partie parce qu'il était difficile de gérer seul des implications dans deux communautés scientifiques très différentes et en partie parce que l'on s'attend à ce que les systèmes multi-agents nous fournissent des solutions sur l'organisation du système de contrôle d'un agent autonome.

La présentation de mes recherches et donc de celles de l'équipe que j'ai animé et anime encore jusqu'à la soutenance de mes derniers doctorants à Neuchâtel est donc divisée en deux parties: les systèmes autonomes et les systèmes multi-agents. Elles seront suivies de notre perspective de recherche actuelle qui fusionne ces deux perspectives et l'oriente à la fois sur la simulation et la conception des systèmes complexes.

2 Les systèmes autonomes

2.1 Introduction

Le thème des systèmes autonomes a constitué un de mes premiers sujets de recherche, à commencer par ma thèse de doctorat. Ces travaux reposent sur une distinction radicale entre le point de vue de l'agent et le point de vue de l'observateur extérieur :

- Le point de vue de l'agent repose sur ce qu'il perçoit de son appareillage sensoriel (proprioceptif¹ et extéroceptif²) et ce qu'il fait en termes de commandes de son appareillage moteur. A noter que l'on parle en général de percevoir quelque chose d'extérieur à soi, or nous insistons ici sur la lecture des données capteurs sans référence à un monde extérieur qui rendrait compte de ces données. Il en est de même de l'action qui est en général pensée sur le monde extérieur alors que nous insistons ici qu'il s'agit de contrôler la motricité de l'agent et rien d'autre ;
- Le point de vue de l'observateur dans lequel l'agent est vu en interaction avec son environnement et dont la perception est interprétée en termes de perception de quelque chose et la motricité en termes d'actions sur quelque chose. Ce discours est valide dans la mesure où l'observateur dispose à la fois de l'agent et de l'environnement.

Dès lors la réalisation d'un système autonome d'un point de vue ingénierie se définit comme la réalisation d'une corrélation dans l'agent entre données capteurs et commandes moteurs (point de vue de l'agent), que nous appellerons *boucle sensori-motrice*, de façon à produire un *comportement* désiré, par exemple sous la forme d'une séquence d'actions, dans l'environnement (point de vue de l'observateur). Nous distinguons donc le *comportement* de la *boucle sensori-motrice* qui le produit en interaction avec l'environnement.

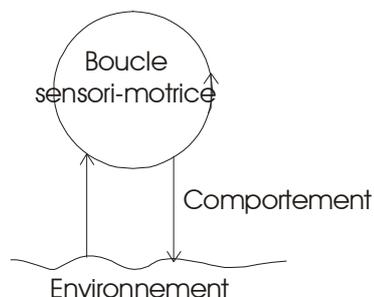


Figure 1 : le comportement comme interaction de l'environnement et d'une boucle sensori-motrice

Tout le jeu consiste donc à se donner des outils de définition du comportement souhaité et d'en dériver la corrélation entre capteurs et effecteurs de l'agent soit par programmation automatique ou manuelle, soit par apprentissage par l'agent. Deux remarques s'imposent :

¹ En prise avec l'état interne de l'agent du point de vue de l'observateur (exemple : l'état des batteries, la position des articulations).

² En prise avec ce qui est extérieur à l'agent du point de vue de l'observateur (exemple : la luminosité ou les sons ambiants).

- les objets et actions dans l'environnement n'existant que pour l'observateur, il n'est pas nécessaire que la structure interne de l'agent passe par une représentation explicite de ces objets, c'est-à-dire un codage interne qui serait interprété comme une image du monde extérieur par l'observateur³ (ou par l'agent lui-même mais comment construirait-il la notion même d'extériorité ?) ;
- le comportement résulte de l'interaction entre l'agent et l'environnement. Dès lors, une boucle sensori-motrice peut donner des comportements différents dans des environnements différents (réalisations multiples) et des boucles sensori-motrices distinctes peuvent donner un même comportement dans des environnements différents (implémentations multiples).

Cette dernière remarque pose le problème de l'autonomie, évité jusqu'à présent, que nous définirons ici comme la capacité de l'agent d'adapter sa structure sensori-motrice de façon à conserver son comportement dans des environnements changeants⁴. Ceci suppose la possibilité d'évaluer de façon interne le comportement résultant afin de modifier ses boucles sensori-motrices en conséquence ou de mettre le concepteur dans le processus d'apprentissage. Dans le premier cas, il se pose donc le problème de mettre en place dans l'agent un mécanisme d'évaluation (point de vue de l'agent) qui rende compte du comportement produit (point de vue de l'observateur).

Les différents projets que nous allons présenter vont décliner cette posture méthodologique :

- notre thèse qui utilise une spécification du comportement en logique intensionnelle puis dérive incrémentalement un automate à partir de celle-ci ;
- le projet PNR-23 qui utilise un jeu de boucles sensori-motrices programmées et structure un système de sélection contextuelle des boucles sur la base de l'expérience acquise ;
- le projet FNRS qui va généraliser cette approche en faisant de l'apprentissage à tous les niveaux de coordination et va poser la méthodologie de conception du mécanisme d'évaluation.

Nous conclurons cette partie avec les différentes perspectives ouvertes par nos travaux.

2.2 La thèse de doctorat

Ma thèse de doctorat propose donc la spécification du comportement d'un agent autonome en logique intensionnelle et son implémentation par un automate construit incrémentalement en cours d'exécution [Müller87].

Dans la thèse, la spécification en logique intensionnelle est initialement prévue pour décrire le fonctionnement interne de l'agent (point de vue de l'agent). Elle est munie des notions de croyances, de buts et d'action sous forme de logiques intensionnelles spécifiques (épistémique pour la croyance, dynamique pour les actions). Si ces logiques ont été et sont encore largement utilisées pour décrire les agents cognitifs, elles souffrent de trois défauts :

³ Même si, in fine, cela simplifie la compréhension ou au moins l'intention des mécanismes internes de l'agent.

⁴ Cela suppose le maintien d'une adéquation à l'intention de l'observateur/concepteur, plus généralement nous pourrions considérer le maintien de la viabilité mais cela nous entraîne plus loin que la stricte ingénierie.

- leur combinaison pose des problèmes non négligeables, notamment avec la logique dynamique dans laquelle les actions sont à la fois des objets de premier ordre et des étiquettes sur les opérateurs intensionnels ;
- la sémantique est construite sur un domaine de discours fait d'objets extérieurs à l'agent ce qui pose problème étant donnée notre posture ;
- elles sont difficilement exploitables pour faire du raisonnement automatique.

Nous avons proposé une sémantique dont le domaine de discours est l'univers perceptif et moteur de l'agent, et un mécanisme d'inférence qui construit un graphe fini dans la mesure où on peut se ramener au cas propositionnel. Cela résout les deux derniers points même si le premier point est résolu en fait sinon en principe.

Ce n'est que plus tard que nous nous sommes aperçus :

- que la logique aurait finalement pu parler d'objets extérieurs à l'agent dans la mesure où elle devenait réellement la spécification du point de vue de l'observateur et moyennant une mise en correspondance entre le discours de l'observateur et les capacités perceptives de l'agent ;
- que le véritable apport de la méthode est que le graphe se comporte comme un automate liant les perceptions aux actions et qu'une fois cet automate engendré, nous pouvons très bien ne plus utiliser la spécification en logique intensionnelle.

La première idée a été reprise pour la spécification de systèmes multi-agents et nous y reviendrons plus tard. La seconde est restée sans suite quant à nous sauf que nous avons vu réapparaître cette même idée dans les travaux de Fischer et Wooldridge avec METAMEM [Wooldridge96]. Le principe est que la sémantique classique des logiques modales en termes de mondes possibles peut être fondée sur les scénarios possibles et qu'il s'agit de trouver l'automate qui engendrera les scénarios compatibles avec la spécification.

2.3 Le projet PNR-23

2.3.1 Introduction

Suite à ma nomination à l'Université de Neuchâtel, j'ai défini un programme de recherche [Müller88] qui a été financé sur le Programme National de Recherche 23 (PNR-23): "Intelligence Artificielle et Robotique" sur cinq ans (1989-1994) avec deux doctorants sous ma supervision et deux autres dans une équipe spécialisée en vision par ordinateur. Dans le cadre du PNR-23, notre travail a porté sur une architecture d'agent autonome appliquée et validée dans le domaine de la robotique mobile.

2.3.2 Etat de l'art⁵

L'approche cognitiviste et l'approche comportementale sont habituellement présentées comme les deux courants opposés dans le domaine du contrôle de systèmes autonomes en IA [Brooks91, Malcolm89]. D'autres travaux tendent à intégrer les deux courants en une troisième approche dite hybride. Ces trois approches proposent des architectures de contrôle et des représentations des connaissances qui permettent de les différencier.

⁵ Cet état de l'art est partiellement obsolète mais situe le questionnement que nous avons suivi dans son contexte d'alors.

2.3.2.1 L'approche cognitiviste

Basée sur la métaphore computationnelle, qui suppose un niveau d'abstraction dans lequel les processus mentaux peuvent être considérés indépendamment des mécanismes qui les engendrent [Newell82], ce type d'architecture de contrôle de systèmes autonomes est apparu avec l'avènement de l'Intelligence Artificielle (1956). Le traitement de l'information y est décomposé en trois *fonctions* successives: la perception, la planification et l'exécution.

L'architecture exploite un *modèle du monde*, exprimé en général dans un formalisme logique, donné par le concepteur et mis à jour par la perception. Cette connaissance correspond au point de vue du concepteur sur un certain domaine d'activité et représente souvent les limites de l'expertise humaine. Elle décrit des objets du monde, leur état et leurs propriétés, des éléments de savoir-faire, ou des méta-connaissances. Dans ce cas, la représentation est dite objectiviste dans le sens où les informations entrant dans le système sont à propos du monde tel qu'il est donné par le concepteur. Shakey [Nilsson84], Hilare [Giralt84], et CART [Moravec82] sont de bons exemples d'applications de cette architecture en robotique.

La mise à jour de cette connaissance objectiviste (*frame problem*), la complexité des algorithmes de planification (exponentielle) et la lourdeur des mécanismes de récupération (re-planification) produisent des systèmes lents et peu flexibles face à la dynamique et aux imprévus du monde réel. Ceci explique la simplicité des mondes dans lesquels ces systèmes sont testés et validés.

De nombreux travaux ont tenté de réduire ces déficiences soit par une prise en compte du temps (planification réactive [Vere83, Firby87]), soit en raisonnant non seulement sur le problème donné mais également sur les techniques disponibles pour engendrer un plan (méta-planification [Stefik81, Georgeff86]).

2.3.2.2 L'approche comportementale

Face aux limitations de l'approche cognitiviste, une partie de la communauté IA s'est intéressée, dès 1980, à développer des systèmes pouvant agir rapidement dans des univers dynamiques et imprévisibles. L'approche comportementale propose des architectures décomposées en modules (comportements) réalisés sous la forme de règles (condition-action) ou de boucles sensori-motrices (liant les capteurs aux effecteurs par un traitement simple). Les boucles sensori-motrices sont concurrentes et pose le problème de l'arbitrage entre celles-ci. Trois types génériques de contrôle peuvent être mentionnés:

- **contrôle par priorité:** les comportements concurrents agissent sur le monde en fonction de certaines priorités préétablies. *Pengi* [Agre87] propose, en simulation, un tel mécanisme avec des règles contrôlant le comportement d'un pingouin (la proie) dans une grille peuplée de cubes de glace (obstacles ou armes) et d'abeilles hostiles (les prédateurs). La *subsumption architecture* [Brooks86] introduit des priorités précablées (circuits inhibiteurs ou supprimeurs) entre boucles sensori-motrices hiérarchisées en niveaux de compétences (évitement d'obstacles, déambulation, exploration, ...).

- **contrôle par compétition:** les comportements concurrents sont interconnectés (en réseaux) et prennent le dessus en fonction d'une dynamique interne au système. [Maes89], par exemple, propose un réseau d'opérateurs se propageant différentes activations (+/-) par des liens 'successeur', 'prédécesseur' et/ou 'conflictuel', suivant les interactions établies par la donnée des pré-conditions et post-conditions de chaque opérateur. Ces activations proviennent aussi bien de la situation observée que des buts courants. [Beer90] propose une architecture neuromimétique faite de neurones et de connexions synaptiques par lesquelles un neurone peut influencer la connexion entre deux autres neurones soit en l'interrompant, soit en modifiant la force de la connexion.
- **contrôle par fusion:** les consignes proposées par l'ensemble des comportements sont fusionnées en une consigne commune, compromis entre les différentes tendances comportementales. Ce type de contrôle nécessite une représentation uniforme permettant d'exprimer les tendances et de calculer leur fusion. Chez [Anderson90], les consignes peuvent être représentées vectoriellement (direction et force) et la fusion se résume alors à une sommation vectorielle pondérée. [Payton90] propose une fusion des tendances de l'agent par propagation d'un gradient depuis chaque objectif localisé sur une carte. Les différents gradients sont fusionnés par sommation vectorielle en tout lieu de la carte.

Ces trois types génériques de contrôle sont parfois combinés à travers une même architecture : [Tyrrell93], par exemple, combine les contrôles par priorité et par fusion en une architecture hiérarchique.

Enfin, bien que les comportements soient généralement pré-programmés et figés, certains auteurs ont adopté une approche évolutionniste et s'intéressent à l'acquisition de boucles sensori-motrices par le système lui-même, ou à l'élaboration d'un contrôle adaptatif en constante évolution. Ces travaux utilisent généralement des techniques connexionnistes parmi lesquels *RUR* [Nehmzow89], *DAC* [Vershure92] et [Touzet93].

2.3.2.3 L'approche hybride

Certains auteurs ont intégré l'approche cognitive et l'approche comportementale en une architecture à deux niveaux: un niveau réactif (comportemental) surmonté d'un niveau de représentation (cognitive) pour l'arbitrage. L'objectif est d'associer la réactivité des systèmes comportementaux à la capacité de raisonnement et d'organisation des systèmes cognitifs. Les systèmes hybrides se différencient essentiellement par le type de représentation qu'ils utilisent:

- L'architecture *AuRA* [Arkin90], par exemple, utilise un modèle du monde objectiviste (une carte géométrique) sur lequel se greffe un raisonnement symbolique basé sur la technique des champs potentiels pour des tâches de navigation. L'architecture exploite différentes boucles sensori-motrices correspondant à certaines tâches primitives de navigation.
- [Mataric90] est la première, à notre connaissance, ayant proposé l'utilisation d'une représentation subjectiviste, extraite des informations provenant de la couche comportementale (du type *subsumption architecture*). Elle propose une technique d'acquisition et d'exploitation d'une carte cognitive associant des informations topologiques (contiguïté entre états) et métriques (orientation

absolue). La carte résultante peut être utilisée pour contrôler les comportements du niveau comportemental en fonction de certains états désirés.

2.3.3 Architecture

L'architecture générale que nous avons développée, est décomposée conceptuellement en trois niveaux d'abstraction: le niveau physique (0), le niveau comportemental (1) et le niveau dit cognitif (2). En ce sens, il s'agit d'une architecture hybride (voir figure 2).

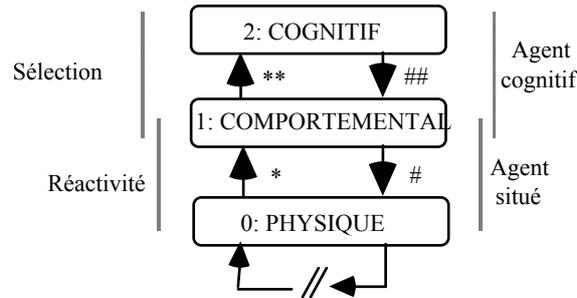


Figure 2: architecture générale

Le niveau 0 définit l'agent physique, composé de ses capteurs et de ses effecteurs. C'est lui qui établit le contact avec le milieu. Le niveau 1 contient les boucles sensori-motrices de l'agent. Il introduit la dimension de réactivité face à la dynamique de l'environnement et fait de l'agent physique, un agent situé, c'est-à-dire en interaction constante avec son milieu. Enfin, le niveau 2 est composé de la connaissance et de trois processus cognitifs (l'interprétation, l'apprentissage et la motivation) qui structurent cette connaissance. Il introduit la capacité de sélection et fait de l'agent un agent cognitif (mais toujours sans référence à un monde extérieur), exhibant certaines dimensions d'autonomie.

Chaque niveau d'abstraction fournit des informations au et est contrôlé par le niveau immédiatement supérieur. Ainsi, la liaison * transmet l'état des capteurs (signaux) aux boucles sensori-motrices. Ces derniers traitent les signaux reçus et génèrent des commandes qui, envoyées par la liaison #, permettent aux boucles sensori-motrices de contrôler directement les effecteurs.

De même, la liaison ** transmet l'état des boucles sensori-motrices (caractéristiques perçues et état de stimulation) au niveau cognitif qui, par la liaison ##, sélectionne la boucle sensori-motrice qui lui semble adéquate. A tout instant, seule la boucle sensori-motrice sélectionnée par le niveau cognitif contrôle les effecteurs du niveau physique.

Cette architecture s'éloigne fondamentalement des architectures de subsomption dans la ligne des travaux de Brooks [Brooks86] dans lesquelles les boucles sensori-motrices s'inhibent les unes les autres. En effet, les boucles sensori-motrices n'interagissent jamais l'une avec l'autre et la couche supérieure ajoute un niveau « symbolique » sans altérer les fonctionnalités pré-existantes. Ceci est compatible avec la compréhension contemporaine de l'évolution selon laquelle les changements qualitatifs se superposent sans les altérer aux fonctions sous-jacentes que ce soit épistémologiquement [MerleauPonty42] ou physiologiquement [LeroiGourhan64].

Cette architecture présente des propriétés intéressantes:

- approche ascendante ou synthétique: elle a été conçue de bas en haut. Les capacités physiques sont la base (contraignante) des comportements qui sont, à leur tour, la seule base (contraignante) de la cognition. Ces dépendances imposent des choix méthodologiques déterminants quant aux représentations envisageables au niveau cognitif.
- modularité conceptuelle: la réactivité et la sélection y sont distinctement séparées à travers les niveaux d'abstraction. Ceci facilite la réflexion quant aux besoins de chaque niveau et à leurs interactions.
- architecture hybride: elle intègre, de façon naturelle, l'approche comportementale et l'approche cognitive de la modélisation d'agents autonomes.
- généralité: le contenu de chacun des trois niveaux d'abstraction reste ouvert. L'architecture est indépendante du robot, des boucles sensori-motrices et du modèle cognitif utilisés. Seules sont spécifiées les interfaces entre les niveaux d'abstraction.
- plate-forme d'étude pour le problème de la 'sélection d'action'⁶ (voir état de l'art, [Maes89, Tyrrel93]). Notre architecture se prête particulièrement bien à l'étude générale de ce sujet: l'interface de contrôle y est clairement spécifiée et le niveau cognitif n'impose aucun modèle cognitif particulier. Cette architecture peut donc servir à l'étude et à la comparaison de différents modèles cognitifs sur la base d'une même plate-forme comportementale.

Cette architecture a fait l'objet d'une implémentation distribuée dans un environnement UNIX [Müller93]. Ceci a permis:

- de concevoir et tester indépendamment chacun des composants de l'architecture (différentes personnes ont pu collaborer pour la réalisation de boucles sensori-motrices basés sur les capteurs de distance ou la vision).
- d'utiliser des langages de programmation différents (C pour les boucles, CLOS pour le niveau cognitif).
- de répartir les processus sur plusieurs machines (stations de travail, PCs).
 - pour s'approcher d'un traitement temps-réel.
 - pour exploiter les propriétés de certaines machines dans certains traitements spécifiques (essentiellement en vision avec des cartes spécialisées).
- de rendre le système flexible à l'ajout ou au retrait de certains processus en cours d'exécution.

2.3.4 Représentation

Classiquement, une représentation est un modèle de certains aspects d'une réalité extérieure. Elle doit obéir au moins à deux critères:

- le critère de *pertinence*: on ne s'intéresse qu'aux aspects qui sont suffisants pour répondre à une certaine question ou réaliser une certaine tâche.
- le critère *d'adéquation* ou de réalisme: les aspects que l'on modélise doivent être conformes à la réalité.

⁶ "how to choose, at each moment in time, the most appropriate out of a repertoire of possible actions" (voir références de l'état de l'art [Tyrrel93]).

Le deuxième critère suppose un observateur capable de voir à la fois la réalité et le modèle ce qui, d'une certaine façon, est le cas lorsqu'un concepteur réalise un système artificiel. C'est le point de vue *objectiviste*.

Si nous voulons que notre système soit autonome, il doit élaborer ses propres représentations en étant incapable d'accéder par lui-même à une quelconque « réalité ». Seule l'expérience de son interaction avec l'environnement à travers ses capteurs et ses effecteurs peut servir de base à une élaboration des représentations, sans référence a priori avec un quelconque monde extérieur. C'est le point de vue *subjectiviste* que nous avons adopté dans le projet PNR-23 4023-027037 en utilisant deux niveaux de représentations:

- dans les boucles sensori-motrices qui sont des réponses à des stimuli de façon à maintenir un invariant sensoriel, et qui constituent les éléments sensoriels de base ;
- dans le niveau cognitif par la structuration topologique de la succession des boucles sensori-motrices applicables.

Succinctement, une boucle sensori-motrice b peut être applicable ou non selon la présence du stimulus correspondant. Un état instantané e est l'ensemble des états d'applicabilité de chacune des boucles : $e = \{applicabilité(b_i)\}$. Un historique h est une succession d'états instantanés et de choix d'une des boucles sensori-motrices applicables, une boucle restant sélectionnée tant qu'elle reste applicable : $h=(e_1,b_1,e_2,...,e_n,b_n)$. On dira alors que la sélection d'une boucle applicable b_i dans l'état e_i a causé le nouvel état $e(i+1)$. Cette relation de causalité est représentée par un graphe de transition en supposant que les transitions sont déterministes. Si ce n'est pas le cas, un morceau de l'historique représentera l'état instantané x dans lequel le choix d'une boucle produit la transition souhaitée. Par exemple, si on est passé de $e(i-1)$ à $e(i)$ en sélectionnant $b(i-1)$ alors on arrive en $e(i+1)$ en appliquant b_i (dans ce cas $x_i = (e(i-1),b(i-1),e_i)$).

Le critère de *pertinence* est respecté puisque les stimuli ne sont pas arbitraires mais pertinents à la réalisation de comportements (suivi de mur, évitement d'obstacle,...) et que la structuration des successions est pertinente au problème du choix de la prochaine boucle sensori-motrice à sélectionner.

Le critère *d'adéquation* doit être adapté pour ne pas faire référence à une réalité inaccessible: nous dirons qu'une représentation est adéquate si elle rend compte de l'histoire de l'interaction du système avec son environnement (c'est-à-dire est compatible avec h). Dans notre cas, l'histoire est constituée de la séquence des changements de configuration de stimuli en réponse aux boucles sensori-motrices choisies.

La représentation utilisée au niveau cognitif et gérée par les processus cognitifs possède quatre caractéristiques essentielles:

- elle est extraite des informations provenant du niveau sensori-moteur et est, par conséquent, de nature sensori-motrice,
- elle porte sur la perception par l'agent de son interaction avec son milieu (interaction monde-agent) par opposition à la perception directe du milieu,
- elle exprime les régularités causales de cette perception,
- elle sert à prédire les événements sensoriels futurs.

Ces caractéristiques en font un excellent exemple de connaissance subjectiviste (par opposition aux modèles objectivistes généralement usités en IA).

Les trois processus cognitifs que nous avons considéré -interprétation, apprentissage et motivation- s'occupent respectivement :

- d'analyser les informations sensorielles provenant des boucles sensori-motrices,
- de structurer ces informations en un graphe causal représentant la topologie de l'interaction,
- de situer les objectifs courants sur cette représentation et d'orienter les choix de l'agent.

L'architecture a été validée sur deux plates-formes de robots mobiles (Hero-2000 et Nomad-200) pour des tâches de navigation. Les comportements utilisés ont exploité différents types de capteurs (sonars, infrarouges, vision active et vision structurée). [Gat91], [Mars92], [Mars93] et [Rodriguez94] donnent plus de précisions quant à l'architecture, la représentation, les applications et plus généralement, notre approche de l'autonomie.

2.3.5 Conclusion

Un certain nombre de remarques s'imposent quant à l'apport de cette approche :

- les boucles sensori-motrices sont toutes programmées de façon à maintenir un invariant sensoriel (une équidistance par rapport à certaines mesures pour les sonars, la position d'une caractéristique visuelle dans l'image pour la vision). Le maintien de cet invariant sensoriel produit en interaction avec le milieu des comportements (respectivement le suivi de couloir et le suivi de mur ou l'évitement d'obstacles selon l'interprétation de l'observateur). C'est l'observateur extérieur qui fait le lien d'adéquation de cet invariant avec un comportement souhaité⁷, produisant possiblement d'autres comportements si le milieu est différent de celui prévu initialement. L'important est seulement que l'agent soit muni d'un ensemble de comportements spontanés.
- l'exécution de ces boucles sensori-motrices produisent des effets sous la forme du changement d'applicabilité de l'une ou plusieurs d'entre elles (absence de mur ou (non-exclusif) absence de couloir). L'ensemble des boucles sensori-motrices donnent donc forme pour l'agent à l'histoire de l'interaction avec son milieu et c'est cette histoire qui est ensuite structurée en une topologie qui représente une sorte de carte dans la mesure où en fonction de la boucle choisie elle prédit les changements futurs des perceptions (mais pas du monde).

Ces deux remarques posent à l'évidence le problème en science cognitive de la structuration du réel en essayant d'aller aussi loin que possible sans référence à une extériorité dont l'émergence reste encore à expliquer. Elles vont donc dans le sens d'une démarche d'épistémologie expérimentale et s'inscrivent d'ailleurs dans la droite ligne de la phénoménologie [Merleau-Ponty42, Merleau-Ponty45] qui propose méthodologiquement de mettre le monde perçu comme extérieur entre parenthèses dans le questionnement de sa perception. Cet aspect a été esquissé dans [Müller99].

En dehors de cette réflexion épistémologique, se pose le problème concret de généraliser cette architecture dans trois directions :

⁷ Voire avec l'objet sur lequel porte le comportement, décidant ainsi que l'invariant interne est, dans un certain sens la « représentation » de l'objet.

- penser l'apprentissage non seulement au niveau dit cognitif mais aussi des boucles sensori-motrices, si possible par un mécanisme uniforme ;
- dépasser l'idée initiale d'architecture hybride réactif/cognitif pour aller vers une architecture multi-niveau où la distinction est moins de nature que de structure liée à une hiérarchie de vitesses d'évolution des invariants ;
- dépasser la problématique de la sélection qui est ici faite jusqu'à ce que la boucle sensori-motrice ne soit plus applicable pour penser la sélection à tout moment et éventuellement la fusion.

C'est ce qu'aborde le projet qui suit.

2.4 Architecture de système autonome

2.4.1 Introduction

Le projet précédent a donc débouché sur la volonté de généraliser l'architecture à un nombre quelconque de niveaux et d'étudier systématiquement les problèmes de coordination et d'acquisition de représentations basées uniquement sur les activités sensori-motrices. Le but du projet était donc de comprendre ainsi certains mécanismes de construction incrémentale de représentations et de comportements de plus en plus complexes par adaptation à l'environnement et d'en déduire une méthodologie de conception d'une architecture de contrôle permettant à un robot d'accomplir des tâches complexes de façon autonome et flexible. Ces mécanismes ont été appliqués concrètement sur des problèmes non triviaux de robotique mobile et notamment le problème du robot postier.

Le projet du Fonds National de la Recherche Scientifique (FNRS) no 2100-040936.94 (1994/1996) nous a permis de poser le problème à plat et de choisir un formalisme générique dans lequel les différents problèmes semblaient le plus facilement exprimables, à savoir celui du contrôle adaptatif optimal hiérarchique.

Le cadre théorique général du contrôle optimal adaptatif peut se résumer comme suit :

- le contrôle optimal discret suppose que le monde extérieur peut être dans un ensemble d'états possibles X , que l'on dispose d'un ensemble d'actions U , que l'on connaît d'une part la fonction stochastique de transition entre ces états $P(Y|X,U)$ et d'autre part une fonction coût et/ou gain associée aux transitions appelée *fonction de renforcement* : $R(X,U,Y)$. Le but est de trouver la stratégie qui permet d'engendrer la trajectoire optimale dans le sens qu'elle optimise la somme pondérée des renforcements élémentaires sur la trajectoire dans l'espace des états : ce que l'on appellera la *fonction objectif* : $\sum \gamma^t \cdot R(xt, ut, x(t+1))$.
- la version adaptative ne suppose pas la fonction de transition connue et donc adapte la stratégie dynamiquement au fur et à mesure de l'exploration de l'espace d'état. Il existe deux versions : une version qui construit la fonction de transition $P(Y|X,U)$ et une autre qui construit directement la stratégie et dont l'apprentissage par renforcement est une variante (mais aussi les algorithmes génétiques).

Ce cadre convient très bien à la généralisation recherchée de notre architecture précédente dans la mesure où :

- la représentation de la fonction de transition $P(Y|X,U)$ correspond au graphe causal que l'on utilisait au niveau cognitif mais dans une version stochastique ;
- à partir du moment où une action peut être elle-même une boucle sensori-motrice acquise par apprentissage, la structuration hiérarchique est toute trouvée.

Ce cadre nécessite néanmoins une adaptation : les états possibles ne sont pas ceux du monde extérieur (inaccessibles par principe) mais ceux des capteurs ou des combinaisons des boucles sensori-motrices de niveau inférieur.

Par ailleurs, la plupart des résultats supposent que les états sont markoviens, à savoir que la connaissance de l'état instantané est suffisamment prédictif pour l'état futur et pour l'action à choisir. Dans notre cadre méthodologique, on distinguera le fait que le monde soit markovien, ce qui nous intéresse pas, du fait que l'état interne de l'agent construit à partir de l'historique de ses capteurs structuré par ses actions, le soit.

L'objectif du projet a donc été reformulé comme suit avec deux doctorants :

- aller d'une spécification de la tâche jusqu'à la conception d'une architecture de contrôle hiérarchique adaptatif utilisant l'apprentissage par renforcement [Faihe95, Fai96, Faihe97];
- aller de la construction d'un ensemble hiérarchique d'états internes markoviens jusqu'à l'architecture de contrôle hiérarchique elle-même.

Ces deux doctorats se sont terminés dans le cadre d'un nouveau projet FNRS no 2000-046916.96 de 1996 à 1999.

2.4.2 Etat de l'art

Etant donné ce qui précède, l'état de l'art va traiter de l'apprentissage par renforcement pour aller de la spécification comportementale à l'implémentation effective, le problème de la structuration de l'état interne et les fondations théoriques des dynamiques structurelles.

2.4.2.1 L'apprentissage par renforcement

Les problèmes d'apprentissage par renforcement concernent un agent autonome situé dans un environnement stochastique. L'agent doit apprendre par essai et erreur comment réaliser un tâche donnée. Pour faire ainsi, il choisit les actions qui maximisent les récompenses qu'il reçoit sur une longue période de temps. Ce problème est modélisé sous la forme d'un problème de contrôle optimal d'un processus de décision markovien (MDP) [Barto95].

Malgré de grands progrès dans la compréhension des fondements théoriques et dans le développement des applications pratiques de l'apprentissage par renforcement, un certain nombre de problèmes restent ouverts. Ces défis peuvent être classés dans deux catégories : i) le passage à l'échelle supérieure pour traiter des tâches complexes et ii) le traitement d'environnements qui ne sont que partiellement observables.

2.4.2.1.1 Traitement des tâches complexes

Les tâches complexes supposent à la fois un immense espace de recherche (induit par la taille de X et de U) et une fonction de renforcement difficile à définir. La décomposition d'un problème en sous-problèmes est une des approches les plus

prometteuses pour aborder les tâches complexes. Elle consiste à décomposer la tâche initiale en sous-tâches (avec des espaces de recherche petits et des fonctions de renforcement simples), résolvant chaque sous-tâche et recombinaison des solutions obtenues. Comment décomposer le problème, comment combiner les stratégies (aussi nommé le problème de coordination) et comment engendrer les fonctions de renforcements sont les questions principales de cette approche.

L'apprentissage et la représentation des connaissances à différents niveaux (incluant le problème de la décomposition et de la coordination) a été traité dans le domaine des MDP dans [Dietterich97,Parr98,Sutton92,Whitehead93] et appliqué à la robotique dans [Mahadevan95,Lin93,Maes90]. Trouver une fonction de renforcement adéquate a été traité dans [Mataric94]. Finalement l'aspect méthodologique, consistant à émettre les principes de conception pour concevoir les agents autonomes de façon systématique et efficace, a été traité dans [Pfeifer96,Dorigo98], malheureusement sous la forme de grands principes mais pas de méthodes de construction systématique comme nous l'avons fait.

2.4.2.1.2 Les environnements partiellement observables

Les méthodes d'apprentissage par renforcement développées jusqu'ici ont besoin d'une observation complète de l'état de l'environnement parce qu'ils sont basés sur les MDP. Cependant dans bien des cas, il n'est pas possible pour l'agent d'avoir une perception parfaite et complète de cet état. Ce problème s'appelle le problème de l'état caché ou de l'élimination perceptuelle (perceptual aliasing). Des approches ont été proposées pour s'occuper du problème de l'état caché comme l'utilisation d'un modèle du monde (Utile Distinction Memory [McCallum96]) ou la mémoire des actions et des perceptions précédentes (Suffix Tree, USM et NSM [McCallum96], l'architecture Window-Q et la Q-architecture récurrente [Lin92]).

2.4.2.1.3 Perspectives

Le travail futur en apprentissage par renforcement se concentrera sur des approches constructivistes des structures d'apprentissages. En d'autres termes, l'agent devra construire lui-même un MDP, en termes d'états, actions, récompenses, transitions et caractéristiques pertinentes, utilisant la représentation la plus adéquate pour faciliter l'apprentissage [Sutton98]. Cependant, la formulation de la fonction de renforcement reste le problème principal et se pose soit comme une question de re-formulation dynamique lorsque le MDP évolue, soit de trouver des alternatives à l'usage d'une fonction.

2.4.2.2 Apprentissage de l'état interne

Ainsi qu'il est décrit au-dessus, le contrôle est basé sur l'état interne. Même si l'état interne est construit à partir de la perception de l'agent, on peut dire que cet état interne est la seule information accessible à l'agent, en tout cas celle sur laquelle il va élaborer sa stratégie de contrôle. Il apparaît donc que l'état interne joue un rôle central pour les critères de complexité de la tâche : l'état interne doit être suffisamment riche pour faire la prédiction du prochain renforcement ou des états successeurs possibles de façon la plus déterministe possible et suffisamment simple pour ne pas avoir une explosion de l'espace de recherche. En résumé, il doit fournir suffisamment de cohérence pour la construction d'un MDP adéquat et pertinent.

A titre de rappel [Valiant84], l'apprentissage en général peut être défini de la façon:

- Soient
- E un espace topologique et F un ensemble,
 - T un tirage de couples $(x_i \in E, y_i \in F)$,
 - H un ensemble d'hypothèses $h: E \rightarrow F$,
 - Une fonction de compatibilité $C(h, (x_i, y_i)) \in \mathfrak{R}$,

L'apprentissage est défini par la recherche dans H d'une hypothèse h maximisant la fonction de compatibilité C sur le tirage des couples T .

Dans le cas général, le système doit faire évoluer à la fois H : l'espace des hypothèses possibles et h l'hypothèse courante. C'est pourquoi [Deffuant92] suivant [Valiant84] propose un processus d'apprentissage par double adaptation:

- passive en adaptant les paramètres d'une hypothèse considérée comme un vecteur dans un espace de paramètres en réponse aux couples (x_i, y_i) du tirage;
- active en modifiant l'espace des paramètres en réponse au critère interne de cohérence.

Cet apprentissage par double adaptation est très proche du processus d'assimilation-accommodation décrit par Piaget [Piaget67].

La plupart des travaux sur l'apprentissage de l'état interne utilisent seulement le processus passif ou d'assimilation. Une possibilité est d'utiliser des techniques de généralisation comme le clustering statistique [Mahadevan95] ou les réseaux de neurones [Kaelbling93]. S.D. Whitehead and L.-J. Lin [Whitehead95] ont fait l'inventaire d'autres techniques pour construire un état interne markovien comme le Lion algorithme, CS-QL, ou le G-algorithme.

Pour autant que nous sachions, peu d'applications ont été réalisées dans la direction du processus actif ou d'accommodation pour l'apprentissage de l'espace de définition de l'état interne lui-même parmi lesquels Deffuant qui a développé ses réseaux connexionistes auto-construits [GD92] utilisant les deux.

2.4.2.3 Approches générales

La figure suivante décrit la structure générique d'un agent selon la formulation en termes de MDP :

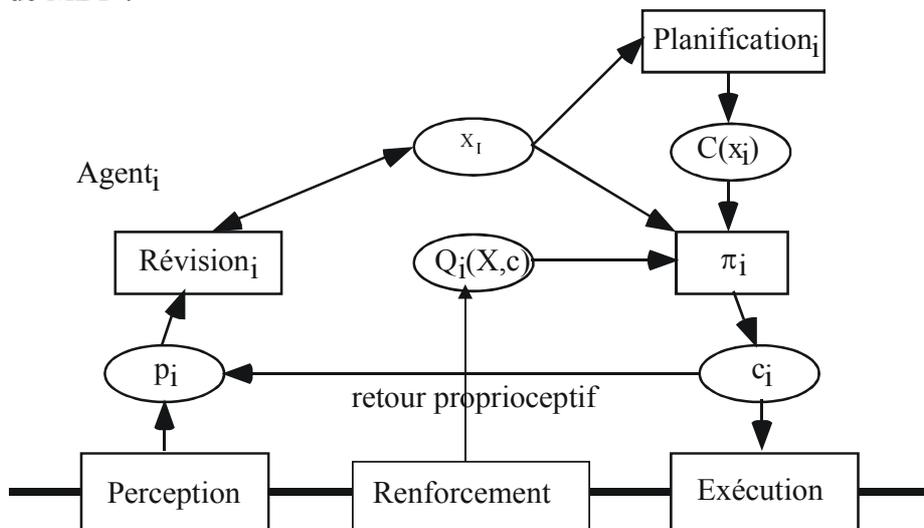


figure 3: architecture MDP générique

Dans cette figure, p_i est la perception instantanée, x_i est l'état interne élaboré à partir de la perception instantanée et du passé, $C(x_i)$ est l'ensemble des actions applicables (ou des boucles sensori-motrices sélectionnables) quand on est dans l'état interne x_i , $Q_i(x,c)$ est l'évaluation de l'intérêt de faire c dans x , appris à partir du renforcement, et c_i est la commande choisie quand on est dans x_i . Fonctionnellement, Révision _{i} met à jour l'état interne en fonction des nouvelles perceptions, la planification détermine les nouvelles actions applicables, π_i calcule la prochaine action à faire.

Dans ce contexte, les approches précédentes ont à faire avec l'évolution des structures ou des fonctions (dans une forme de dualité) :

- L'évolution de la fonction π_i de l'espace d'état dans les commandes (apprentissage de la stratégie);
- L'évolution de la fonction Révision _{i} des perceptions dans l'espace des états internes (apprentissage de l'état interne).

L'évolution de la fonction π_i est possible dès lors qu'elle dépend d'une table d'évaluation de l'intérêt de faire chacune des actions dans chacun des états. Pour pouvoir faire évoluer Révision _{i} , il faut donc trouver une table similaire qui permet de déterminer l'état interne en fonction de la perception et de l'état interne courant : ce n'est rien d'autre qu'une table (ou fonction) de catégorisation. Cependant, on supposerait encore que l'ensemble des x_i possibles est déterminé et fixe. Si ce n'est pas le cas (et ce n'est pas le cas en général), alors le domaine de définition de π_i change en cours d'évolution.

Finalement, si les ensembles des perceptions possibles et des actions possibles sont trop grands, il faut envisager une structuration hiérarchique des fonctions pour pouvoir assurer à chacun des niveaux des structures de taille raisonnable. Nous obtenons donc un problème de co-évolution de fonctions et, dualement, des structures qui les représentent et qu'elles transforment (sur lesquelles elles sont définies), donc une co-évolution structurelle.

En vie artificielle, il y a un intérêt croissant dans l'émergence de structures utilisant la théorie du chaos, la notion de structures dissipatives ou la théorie des catastrophes pour expliquer l'émergence du discret à partir du continu⁸. Ces approches ont un certain nombre d'inconvénients, notamment leur limitation à des petits systèmes par absence de solutions analytiques pour de grands systèmes. La théorie des catastrophes, quant à elle, est seulement descriptive et ne peut donner lieu à des formulations constructives. Ces désavantages soulèvent le besoin de caractériser les propriétés abstraites des structures que nous voulons considérer. Piaget [Piaget68] propose la définition suivante:

Une *structure* est un système de transformations, possédant des lois en tant que système (opposé aux propriétés de ses éléments) qui se maintient et s'enrichit par le jeu des transformations⁹, ces transformations étant fermées sur la structure. En résumé, une structure possède les trois propriétés de totalité, de transformation et d'auto-régulation.

⁸ Alors qu'il me semble plus pertinent de comprendre comment nous avons élaboré l'abstraction du continu à partir du discret.

⁹ En tant qu'application des lois.

Holland [Holland95] introduit la notion de système complexe adaptatif (CAS) et soulève la question importante de saisir les invariants de structure identifiables mais toujours changeantes comme les villes, les organismes, le système immunitaire, etc..

Ces définitions ou descriptions ont les caractéristiques suivantes en commun :

- Les composants ne sont pas importants, seules les dynamiques de transformation le sont;
- La structure et ses lois globales ne dépendent pas des propriétés individuelles des composants mais seulement des interactions ou relations entre les composants ;
- La structure est fermée, définissant une unité ou totalité.

De plus, nous nous attendons à ce que ces structures soient récursivement définies en une hiérarchie. Ces points communs ont motivé certains chercheurs à regarder une théorie traitant des structures en général comme, par exemple, les approches de Fontana utilisant le lambda-calcul [Fontana96]. Il nous a semblé que le meilleur candidat pouvait actuellement être la théorie des catégories [Mac71,Barr90] en tant que mathématiques des structures mathématiques. L'utilisation de cette théorie a été pointée par certains chercheurs: Piaget pour expliquer la dynamique des schèmes [Piaget90], Ehresmann et Vanbremeersch pour les systèmes complexes évolutifs [Ehresmann91,Ehresmann92], Mesarovic de façon plus implicite [Mesarovic89] pour la théorie abstraite du contrôle, Boldini pour formaliser l'intuition de Piaget et pour décrire la puissance d'expression de certaines catégories [Boldini95], et Sallantin pour lier calcul et raisonnement [Sallantin97].

C'est sur ces bases que nous allons décrire ce que nous avons réalisé.

2.4.3 Architecture de contrôle hiérarchique

A titre de rappel, nous définissons l'autonomie d'un agent comme sa capacité de réaliser des tâches complexes, apprenant à les faire et s'adaptant lui-même aux circonstances changeantes dans lesquels l'agent est inclus. Nous distinguons d'une part le problème d'apprendre une tâche et le problème de maintenir la capacité de réaliser une tâche lorsque les circonstances changent et d'autre part entre le point de vue de l'observateur qui décrit la tâche à réaliser et le point de vue de l'agent limité à ses capacités sensori-motrices.

Une tâche est essentiellement décrite du point de vue de l'observateur/concepteur. C'est ce que l'observateur veut voir, à savoir le comportement de l'agent. Ceci nécessite une façon systématique de décrire ce comportement. La façon la plus générale consiste à considérer l'ensemble de toutes les trajectoires possibles dans l'espace de configuration de l'agent et de l'environnement. Il nous faut donc considérer l'espace d'état dans lequel les trajectoires se produisent. Cette description peut aller de descriptions géométriques précises (souvent utilisées en robotique) jusqu'à des représentations qualitatives comme les approches logiques souvent utilisées en intelligence artificielle. Etant donné cet ensemble de trajectoires, nous devons fournir une façon de décrire le sous-ensemble de trajectoires correspondant au(x) comportement(s) désiré(s).

En apprentissage par renforcement et en accord avec notre méthodologie pour concevoir la fonction de renforcement, nous définissons une *fonction de performance* incluant les coûts et les gains ainsi qu'un ensemble de contraintes. Le comportement

désiré est défini par l'ensemble des trajectoires satisfaisant les contraintes et optimisant l'intégrale de cette fonction sur la trajectoire (figure 4). La fonction objectif peut-être définie comme une combinaison de cette intégrale et des contraintes en utilisant les multiplicateurs de Lagrange.

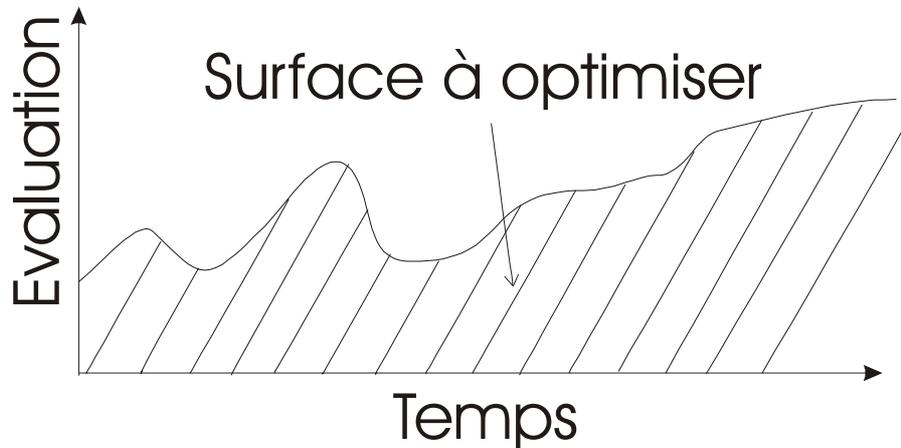


figure 4: optimiser de la fonction objectif

Le comportement devant être produit par les interactions entre le système et l'environnement, sa spécification ne nous dit pas beaucoup sur comment concevoir le système lui-même. Notre approche repose sur la possibilité de décomposer le comportement global que nous voulons réaliser dans des sous-comportements et suppose une correspondance bijective entre la décomposition en comportements et la structure de coordination des boucles sensori-motrices (voir figure 5). C'est aussi l'hypothèse de notre travail précédent. Cette approche soulève les problématiques suivantes :

- La relation entre la spécification de la fonction objectif et la fonction de renforcement interne ;
- La relation entre la hiérarchie et la structure de la fonction objectif ou, plus généralement, quelle est la structure du comportement attendu.

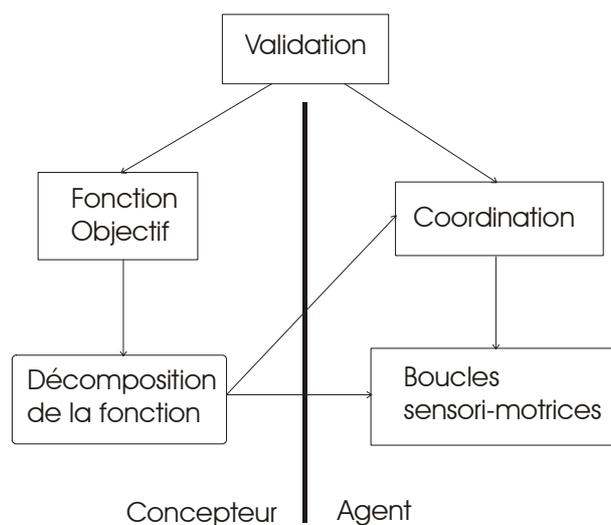


figure 5 : méthodologie de conception d'un agent apprenant

Nous avons choisi de spécifier le comportement désiré comme l'optimisation d'une fonction objectif. Cette fonction est décomposée hiérarchiquement, fournissant des

fonctions objectifs élémentaires pour le système de contrôle de bas niveau (appelé les boucles sensori-motrices) qui sont alors traduites en fonctions de renforcements internes utilisées par l'apprentissage classique. Ces boucles sensori-motrices sont coordonnées dans une hiérarchie isomorphe à la décomposition de la fonction objectif en utilisant l'apprentissage par renforcement classique ou les indices de Gittins généralisés [Faihe95, Faihe97, Faihe98]. La méthodologie pour concevoir la hiérarchie des fonctions de renforcement et les algorithmes de coordination sont présentés dans la thèse de Yassine Faihe [Faihe99]. Le problème de l'état caché n'a pas été traité dans ce travail. De même, la hiérarchie est conçue directement et n'est donc pas produite par le système lui-même. De façon à le faire nous avons soit à explorer comment une unique fonction de renforcement peut être reformulée hiérarchiquement par l'agent lui-même, soit à explorer une autre possibilité d'enseigner le système en l'absence d'une fonction de renforcement explicite. La possibilité d'utiliser un mécanisme d'apprentissage par imitation a été exploré par Antoine Berner [Ber98] dans lequel le concepteur peut guider le système si nécessaire. C'est différent de l'apprentissage supervisé dans la mesure où la commande correcte n'est en général pas spécifiable.

2.4.4 Catégorisation

Le problème de l'état caché, c'est-à-dire le problème d'avoir l'information pertinente (markovienne, etc.) quand les lectures instantanées des capteurs sont insuffisantes, a été traité dans la deuxième ligne de recherche. Construire la catégorie correcte comme un ensemble de circonstances distinctes consiste en la construction dynamique d'une relation d'équivalence évolutive prenant en compte à la fois les informations intrinsèques (similitude formelle) et extrinsèques (régularités dans les interactions). Le problème est de trouver le critère correct pour exprimer les similitudes entre un ensemble très grand de situations passées et présentes. Avec l'information intrinsèque, le processus utilise les données construites à partir des lectures élémentaires des capteurs pour construire une relation d'équivalence basée sur une notion de proximité. Avec l'information extrinsèque, le processus utilise la relation entre les états (soit la prédictibilité de l'état suivant, soit la prédictibilité de la fonction de renforcement) pour déduire leur équivalence. Les deux approches ont été explorées résultant en un algorithme pour extraire des méta-caractéristiques et un ensemble d'algorithmes pour extraire les régularités d'une séquence de situations (cycles, séquences, etc.) [Ber98].

Par ailleurs, quand on a affaire à des systèmes apprenant, le problème est de faire savoir au système le comportement attendu. Dans le contexte de l'apprentissage par renforcement, la fonction objectif mentionnée précédemment doit être traduite dans une fonction de renforcement interne calculée à partir des données sensorielles. Dans le cas de notre architecture hiérarchique, la hiérarchie de coordination est une correspondance un à un avec la décomposition de la fonction objectif.

Nous avons donc considéré deux stratégies d'apprentissage:

- L'apprentissage par imitation dans laquelle, de façon interne, la structure d'interaction essaye de reproduire ce qui se passe et, de façon externe, un tuteur corrige ce que la structure d'interaction est en train de produire. Ce n'est pas de l'apprentissage supervisé parce que le tuteur intervient seulement de temps en temps et ne fournit pas de façon continue la réponse correcte. Le tuteur peut être

remplacé par un mécanisme interne d'arbitrage forçant la commande dans certaines circonstances ;

- L'apprentissage par renforcement où le tuteur (interne ou externe) est remplacé par un mécanisme interne de récompense.

L'avantage de l'approche par imitation est d'éviter la formulation explicite de la fonction de renforcement laissant le système développer sa propre stratégie. Nous utilisons la métaphore de la nature où l'organisme ne croît ni n'évolue jamais seul mais co-évolue avec d'autres organismes qui contraignent ce qu'il peut effectivement faire. De plus, le système va spontanément reproduire ce qui se passe en termes de son appareillage sensori-moteur sans relation avec l'explication que le tuteur/observateur peut donner de ce qui se passe, évitant complètement le problème pour le concepteur de traduire ses spécifications et descriptions en terme de ce que le système peut effectivement percevoir et faire.

La stratégie d'apprentissage par renforcement a été utilisée pour explorer la dynamique de co-évolution de l'espace d'état et de la stratégie apprise.

2.4.5 Approche générale

Le travail décrit dans les deux sections précédentes soulève un ensemble de problématiques théoriques reliées à la dynamique des structures :

- La co-dépendance entre la structure interne de l'agent et la structure de l'interaction de l'agent avec son environnement ;
- L'émergence de structures régulières hiérarchiques, leurs conditions de possibilité et de stabilité ;
- La relation entre la structure et le comportement de l'agent comme un tout, ou, exprimé autrement, la relation entre les fonctions locales, leurs interactions et la fonction globale résultante.

Pour faire cela, nous devons considérer une structure d'interaction unifiée encodant à la fois la structure de l'espace d'état et la stratégie. Le problème de concevoir un système autonome apprenant est alors reformulé comme la génération d'une structure dynamique liant les capteurs aux effecteurs de telle sorte que l'interaction (ou le couplage) de la dynamique du système avec la dynamique de l'environnement engendre un comportement qui, soit converge vers la réalisation de la tâche, soit maintient la capacité de la réaliser. Nous nous attendons à ce que le premier cas soit un cas particulier du second dans lequel la maintenance de la capacité exige l'élaboration de nouveaux savoirs-faire ou l'optimisation de savoirs-faire plus anciens. Cette perspective a été également explorée.

L'approche théorique que nous avons envisagée est d'utiliser la théorie des catégories [Barr90] qui est une théorie mathématique très générale des structures qui semble être assez prometteuse pour parler des dynamiques structurales (la notion de faisceau en particulier). Boldini [Boldini95] dans sa thèse donne deux différents éclairages de l'utilité de la théorie des catégories :

- La première contribution commence par deux notions d'invariant dans Piaget:
 - L'invariant de remplacement où la forme de différents objets (ou états dans notre cas) assimilés au même schème (donc considéré comme identiques) peut être extrait de la capacité de transformer un objet dans un autre et inversement ;

- L'invariant de transformation où la forme est réifiée par la capacité de transformer cette forme dans une autre forme d'un autre schème et inversement.

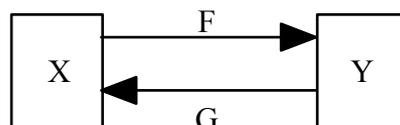
Ces deux invariants sont représentés catégoriellement par l'existence de, respectivement, une limite sur les morphismes entre les objets assimilés et une limite sur les morphismes entre les invariants de remplacement. La construction est faite de telle sorte que toute modification des objets de base (ajout ou retrait d'un objet ou d'un morphisme) adapte automatiquement la structure de niveau supérieur. Cependant la dynamique par laquelle les modifications sont propagées n'est pas explicitée. Nous pensons que la compréhension et la formalisation de cette dynamique en termes catégoriels sont importantes si nous voulons comprendre comment un système peut se structurer lui-même.

- La seconde contribution introduit la notion de faisceau et de fibration pour comprendre :
 - Comment des catégorisations (dans le sens commun et non dans le sens mathématique) structurées peuvent être réalisées à partir de données élémentaires, c'est-à-dire l'articulation des descriptions relationnelles à partir de données non symboliques ;
 - Comment une structure peut induire un langage relationnel interne pour articuler de façon autonome les relations externes et les contraintes.

Malgré la complexité théorique, l'auteur admet que c'est seulement un premier pas et, encore une fois, la prise en compte dynamique du processus de construction de ces structures est manquante.

Les papiers de Ehresmann et Vandermeersch par ailleurs proposent une représentation d'un modèle catégoriel de systèmes évolutifs avec mémoire. Très brièvement, un état d'un système complexe est une catégorie et l'évolution du système implique la construction de nouvelles limites et co-limites dans cette catégorie, permettant au système de se complexifier en une hiérarchie d'abstractions. En fait, le formalisme est même plus complexe parce que le processus dynamique lui-même peut être représenté globalement et les états sont représentés par des coupes dans la structure indexées par une autre catégorie qui représente la structure du temps (linéaire, arborescente, etc.). Il a été suggéré que les fibrations et les pre-faisceaux fournissent un outil adéquat pour prendre le temps en compte. La possibilité de travailler avec des structures temporelles munies d'ordres partiels (ou même une structure plus générale) permet la description de processus complexes qui prennent du temps.

Sallantin considère l'interaction d'un système autonome avec son environnement (dans son cas, un humain et un ordinateur) comme l'interaction entre deux catégories définie par deux foncteurs :



Le système autonome doit modifier sa structure de sorte que ses anticipations soient satisfaites. Y doit être prédictible au début ou en changeant sa structure (ce qui est

partiellement le cas à travers les interactions avec le système autonome (on modifie toujours son environnement !) ou en changeant la façon avec laquelle le système autonome interagit avec l'environnement. Il est dit que le système autonome peut anticiper l'environnement et que l'environnement a un comportement prédictible si F et G sont des foncteurs adjoints. Il est montré comment construire de telles catégories adjointes qui :

- nécessitent l'utilisation de topos et de catégories cartésiennes closes ;
- produisent des classes d'équivalence (et donc une catégorisation au sens commun), et des opérations logiques comme la déduction, l'induction et l'abduction.

Cependant, et encore une fois, rien n'est dit sur comment l'échec de l'anticipation ou de la prédictibilité peut être corrigée par des changements structurels couplés et comment la théorie des catégories peut adéquatement décrire ces transformations. Ces différentes approches ont été décrites dans un travail de diplôme [Amiguet99].

Comme on le voit, ces différentes approches s'attaquent directement aux problématiques théoriques que nous avons mentionnées. Cependant, il nous a semblé après étude que la théorie des catégories permet de décrire des structures et les structures d'évolution des structures (c'est-à-dire le déploiement dans le temps de ces structures) mais de façon statique. Ceci la rend adéquate pour spécifier les invariants recherchés mais pas pour les produire. Pour autant que nous en sachions, il ne semble pas exister pour le moment d'outils formels permettant d'engendrer de façon constructive des évolutions structurelles. Nous ajouterions un bémol à cette affirmation : l'existence de l'informatique elle-même qui est de moins en moins conçue comme la science du traitement de l'information mais bel et bien la science de la production de dynamiques structurelles complexes, par exemple, couplées à l'interaction avec des utilisateurs (cf. la simulation).

2.5 Sciences cognitives

Latéralement, nous avons également lancé une recherche de caractère plus épistémologique sur l'intentionnalité (la propriété d'être capable de représenter quelque chose) où la notion d'émergence et la morphodynamique utilisant la théorie des catastrophes ont été explorées [Scaglione97]. L'objectif était de mieux comprendre l'origine de l'extériorité dans le sens de la constitution pour l'agent d'un monde extérieur à lui, peuplé d'objets et auxquels peuvent enfin se référer ses codages internes. Malheureusement ce qui était probablement le courant philosophique le plus prometteur par sa démarche méthodologique de ne pas supposer un monde déjà là pour atteindre à sa genèse, à savoir la phénoménologie, n'a pas été suffisamment traité dans cette thèse à part sous la forme de la tentative de Jean Petitot de naturaliser l'intentionnalité par la morphodynamique. Cependant ce travail a permis une réflexion épistémologique approfondie sur laquelle nous reviendrons plus tard.

2.6 Résumé

Nous sommes donc parti d'une posture subjectiviste pour laquelle les critères d'adéquation et de pertinence ne sont plus définis relativement un monde extérieur mais par rapport à des critères de cohérence internes définis sur l'interaction de l'agent avec son environnement telle qu'elle est perçue par l'agent lui-même. Cette posture a été déclinée successivement :

- sur le problème de la sélection de boucles sensori-motrices ;

- sur l'apprentissage des boucles sensori-motrices et de leur coordination avec deux sous-problèmes : l'apprentissage des stratégies et l'apprentissage des états internes.

Par ailleurs la finalité de l'agent est la production d'un comportement défini par le concepteur. Nous avons envisagé la prise en compte de cette finalité avec deux modalités :

- La conception d'une ou d'un ensemble hiérarchisé de fonctions de renforcement ;
- Par imitation.

Le MDP nous a fourni un cadre théorique de formulation de ces problématiques mais également des limites. En effet, ce cadre suppose l'ensemble des états internes possibles fixe au cours du temps, or l'état interne résultant de la compréhension qu'élabore l'agent de l'histoire de ses interactions est en changement permanent.

Ceci nous a conduit à une remise à plat encore plus radicale du problème sous la forme de deux questions :

- La définition d'une structure permettant de réaliser la fonction observée, à savoir le calcul de commandes motrices à partir de perceptions ;
- L'évolution de cette structure en interaction avec l'environnement (ou la co-évolution de l'agent et de l'environnement) sous contrainte du comportement désiré.

C'est pourquoi nous nous sommes tournés vers une théorie générale de la dynamique des structures en interaction. Ce glissement de la formulation de la problématique des agents autonomes a ainsi suivi la même évolution que les réflexions philosophiques et scientifiques qui sont passés de l'agent isolé de son environnement à l'agent muni d'un corps (embodied mind [Varela93]), jusqu'à l'agent comme structuration locale de l'environnement (embedded mind tel que suggéré par Maturana [Maturana88] avec la notion de système structurellement déterminé). Cette tendance rejoint le constat qu'un système vivant n'est pas hors du monde ni dans le monde mais il est une structuration locale de celui-ci.

Les quelques réflexions menées semblent indiquer que la théorie des catégories n'est pas éligible. Si cela est effectivement le cas, il faut donc suivre une autre piste qui se révèle a posteriori être celle de notre autre ligne de recherche – les systèmes multi-agents - mais sans que nous en ayons re-transposé les résultats sur la problématique des agents autonomes puisqu'elle été abandonnée en 1999.

2.7 Références

- [Agre87] P.E. Agre and D. Chapman, Pengi: An Implementation of a Theory of Activity, in: Englemore, editor, Proc. 6th AAAI, pp. 268-272, 1987.
- [Amiguet99] M. Amiguet, Théorie des catégories et quelques applications, Travail de diplôme, IIUN, Université de Neuchâtel, 1999
- [Anderson90] T.L. Anderson and M. Donath, Animal Behavior as a Paradigm for Developing Robot Autonomy, in [Maes90], pp. 145-168, 1990.
- [Arkin90] R.C. Arkin, Integrating Behavioral, Perceptual and World Knowledge in reactive Navigation, in [Maes90], pp. 105-122, 1990.
- [Barr90] M. Barr and C. Wells, Category Theory for Computing Science, Prentice Hall International, 1990
- [Barto95] Andrew G. Barto, Steven J. Bradtke, and Satinder P. Singh. Learning to act using real-time dynamic programming. *Artificial Intelligence*, vol. 72 (1), pp. 81-138, 1995.

- [Beer90] R.D. Beer, H.J. Chiel and L.S. Sterling, A Biological Perspective on Autonomous Agent Design, in [Maes90], pp. 169-186, 1990.
- [Boldini95] P.Boldini, Contributions de la théorie des catégories à la représentation des connaissances, Thèse de l'ENST-Bretagne, Brest, Féb. 1995.
- [Bousquet98] Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H. et Le Page, C., 1998. Cormas : common-pool resources and multi-agent Systems. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1416: 826-838.
- [Brooks86] R.A. Brooks, A Robust Layered Control System For a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-2, 1986.
- [Brooks91] R.A. Brooks, Intelligence Without Reason, IJCAI-91, Proceedings of the twelfth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vol 1 (1991), pp. 569-595.
- [Dayan93] Peter Dayan and Geoffrey E. Hinton. Feudal reinforcement learning. In *Advances in Neural Information Processing Systems 5*, 1993.
- [Deffuant92] G. Deffuant, Réseaux connexionnistes auto-construits, Thèse de doctorat, école des hautes études en sciences sociales et université de Paris VI, 1992.
- [Dietterich97] Dietterich, T. G. Hierarchical reinforcement learning with the MAXQ value function decomposition. Technical report, Oregon State University, 1997.
- [Dorigo98] Dorigo, M. and Colombetti, M. Robot Shaping: An Experiment in Behavior Engineering. MIT Press/Bradford Books, 1998.
- [Ehresmann91] A.C.Ehresmann and J.-P.Vandermeersch, Un modèle pour des systèmes évolutifs avec mémoire, basé sur la théorie des catégories, Revue internationale de systémique, vol.5, no1, pp.5-25, 1992
- [Ehresmann92] A.C.Ehresmann and J.-P.Vandermeersch, Outils mathématiques pour modéliser les systèmes complexes, Cahiers de topologie et géométrie différentielle catégoriques, vol XXXIII, 1992
- [Faihe95] Y.Faihe, Contrôle Adaptatif d'un système autonome, University of Neuchâtel Technical Report RT-9509-1, 1995
- [Faihe97] Y.Faihe & J.-P.Müller, Analysis and design of robot's behavior: towards a methodology, 6th European Workshop on Learning Robots, Brighton, Aug. 1997, LNAI, Springer Verlag
- [Faihe98] Y.Faihe & J.-P.Müller, Behaviour coordination using restless bandits allocation indexes, SAB'98, Zürich, 1998.
- [Faihe99] Y.Faihe, Hierarchical Problem Solving using Reinforcement Learning: Methodology and Methods, Université de Neuchâtel, mai 1999, thèse.
- [Firby87] R.J. Firby, An Investigation into Reactive Planning in Complex Domains, in: Englemore, editor, Proc. 6th AAAI, pp. 202-206, 1987.
- [Fontana96] Walter Fontana and Leo.W. Buss, The barriers of Objects : from Dynamical Systems to bounded organizations, Santa FE institute 96-05-035
- [Gat91] Y. Gat and J.-P. Müller, Simple World Modelling for Reactive Navigation, in Working Notes AAAI Fall Symposium: Sensory Aspects of Robotic Intelligence, November 1991.
- [Georgeff86] M.P. Georgeff, A.L. Lansky and M.J. Schoppers, Reasoning and Planning in Dynamic Domains: An experiment with a mobile robot, Technical report, SRI, AI Center, 1986.
- [Giralt84] G. Giralt, R. Chatila and M. Vaisset, An Integrated Navigation and Motion Control System for Multisensory Robots, in: Bradi and Paul, eds., Robotics Research 1, MIT Press, Cambridge, MA, pp. 191-214, 1984.
- [Holland95] J.Holland, Hidden Order: how adaptation builds complexity, Addison Wesley, 1995
- [Kaelbling93] Leslie Kaelbling, Learning in Embedded Systems, MIT Press, 1993.
- [LeroiGourhan64] A. Leroi-Gourhan, Le geste et la parole vol. I et II, Albin Michel, 1964
- [Lin92] Lin, L. J. Reinforcement learning with hidden state. In Proceedings of the Second International Conference on Simulation of Adaptive Behavior, 1992.

- [Lin93] Long-Ji Lin. Hierarchical learning of robot skills by reinforcement. In *Proceedings of the International Conference on Neural Networks*, 1993.
- [Mac71] S. MacLane, Category theory for the working mathematician, Springer-Verlag, 1971
- [Maes89] P. Maes, The dynamics of action selection, in: N. Sridharan, editor, Proc. 11th IJCAI, pp. 991-997, 1989.
- [Maes90] P. Maes, editor, Designing Autonomous Agents: theory and practice from biology to engineering and back, Elsevier Science Publishers B. V., 1990.
- [Maes90] Pattie Maes and Rodney A. Brooks. Learning to coordinate behaviours. In Proceedings Eighth National Conference on Artificial Intelligence, 1990.
- [Mahadevan95] Sridhar Mahadevan and Jonathan Connell. Automatic programming of behaviour-based robots using reinforcement learning. *Artificial Intelligence*, vol. 55, pp 311-365, 1995.
- [Malcolm89] C. Malcolm, T. Smithers and J. Hallam, An Emerging Paradigm in Robot Architecture, in: T. Kanade, F.C.A. Groen and L.O. Herzberger, eds., Intelligent Autonomous Systems 2, North Holland, Amsterdam, 1989.
- [Mars92] Y. Gat, J.-P. Müller, M. Rodriguez, C. Facchinetti, H. Hügli, G. Maître and F. Tièche, Architecture for an Autonomous System: Application to Mobile Robot Navigation, Technical Report, request no. 4023-027037, May, 1992.
- [Mars93] J.-P. Müller and H. Hügli, Architecture of an Autonomous System: Application to Mobile Robot Navigation, in Proc. NRP-23 - Symposium on AI and Robotics, 1993.
- [Mataric90] M.J. Mataric, Navigating with a rat brain: A neurobiological-inspired model for robot spatial representation, in: J. Meyer and S. Wilson, editors, Proc. 1rst International Conference on Simulation of Adaptive Behavior, pp. 169-175, 1990.
- [Mataric94] Maja J. Mataric. Reward functions for accelerated learning. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Machine Learning*. Morgan Kaufmann, 1994.
- [Maturana88] H. Maturana, Ontology of observing : the biological foundations of self-consciousness, American society for cybernetics conference, Felton, 1988
- [Maturana95] H. Maturana and F. Varela, L'arbre de la connaissance, Addison-Wesley, 1995
- [McCallum96] McCallum, A. Reinforcement Learning with Selective Perception and Hidden State. PhD thesis, University of Rochester, 1996.
- [Memmi95] Daniel Memmi - Anh Nguyen-Xuan, Learning and Emergence: an introduction, St-Malo, European Conference on Cognitive Science, 1995
- [MerleauPonty42] M. Merleau-Ponty, La structure des comportements, Quadrige, PUF, 1942
- [MerleauPonty45] M. Merleau-Ponty, Phénoménologie de la perception, Gallimard 1945
- [Mesarovic89] M.D.Mesarovic and Y.Takahara, Abstract Systems theory, LNCIS no 116, Springer Verlag, 19989
- [Moravec82] H.P. Moravec, The Stanford Cart and the CMU Rover, Proceedings of the IEEE 71, pp. 872-884, 1982.
- [Müller87] J.-P.Müller, Contribution à l'étude d'un agent rationnel: Spécification en logique intensionnelle et implantation, Thèse de l'INPG, 1987
- [Müller88] Jean-Pierre Müller, MARS: Mobile Autonomous Robot System, in Artificial Intelligence in Manufacturing, Assembly and Robotics, H.Bunke Ed., Oldenbourg Verlag 1988
- [Müller93] J.-P. Müller and M. Rodriguez, A Distributed System Architecture, Application to Mobile Robotics, IEEE, International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Le Touquet, October, 1993.
- [Müller99] J.-P. Müller, un modèle interactionniste de l'interprétation: le cas de la perception de l'espace, dans Rochebrune'99, ENST, 1999
- [Nehmzow89] U. Nehmzow, J. Hallam and T. Smithers, Really Useful Robots, in: T. Kanade, F.C.A. Groen and L.O. Herzberger, eds., Intelligent Autonomous Systems 2, North Holland, Amsterdam, 1989.
- [Newell82] A. Newell, The knowledge level, Artificial Intelligence, 18(1982), pp.87-127
- [Nilsson84] N.J. Nilsson, editor, Shakey the Robot, SRI A.I. Center Technical Note 323, 1984.

- [Parr98] Parr, R. & Russel, S. Reinforcement learning with hierarchies of machines. In *Advances in Neural Information Processing Systems 10*. MIT Press, 1998.
- [Payton90] D.W. Payton, Internalized Plans: A Representation for Action Ressources, in [Maes90], pp. 89-103, 1990.
- [Pfeifer96] Pfeifer, R. Building “fungus eaters”: Design principles of autonomous agents. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, 1996.
- [Piaget67] Jean Piaget, *La psychologie de l'intelligence*, Armand Colin, 1967
- [Piaget68] J.Piaget, *Le structuralisme*, PUF, 1968
- [Piaget90] J.Piaget, G.Henriquès et Ascher, *Morphismes et catégories*, Delachaux et Niestlé, 1990
- [Ring94] Mark B. Ring. *Continual Learning in Reinforcement Environments*. PhD thesis, University of Texas, 1994.
- [Rodriguez94] M. Rodriguez, Modélisation d'un agent autonome: architecture comportementale et représentation sensori-motrice, Actes du Premier Colloque Jeunes chercheurs en Sciences Cognitives, ARC et InCognito, Mars, 1994.
- [Sallantin97] J.Sallantin, *Les agents intelligents: essai sur la rationalité des calculs*, Hermès, 1997
- [Scaglione96] M.Scaglione, *L'intentionnalité et les modèles artificiels. Emergence et réalisation: deux côtés de la même pièce*, Thèse de l'Université de Neuchâtel, Sept. 1996
- [Singh93] Satinder P. Singh. *Learning to solve Markovian Decision Processes*. PhD thesis, University of Massachusetts, 1993.
- [Stefik81] M.J. Stefik, Planning and Meta-Planning, *Artificial Intelligence*, Vol. 16, pp. 141-169, 1981.
- [Sutton90] Richard S. Sutton. Integrated architectures for learning, planning, and reacting based on approximating dynamic programming. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning*, 1990.
- [Sutton92] Singh, S. P. Reinforcement learning with a hierarchy of abstract models. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Artificial Intelligence* (pp. 202-207). MIT/AAAI Press, 1992.
- [Sutton98] Richard Sutton. Reinforcement Learning: How Far Can It Go? (Past, Present, and Future). ICML Talk, 1998.
- [Touzet93] C. Touzet and F. Mondada, Quelques comportements adaptatifs pour le robot miniature Khepera, in *Annales du Groupe CARNAC*, no. 6, EPFL-UNIL, 1993.
- [Tyrrel913] T. Tyrrell, *Computational Mechanisms for Action Selection*, PhD Thesis, University of Edinburgh, 1993.
- [Valiant84] L.G. Valiant, A theory of the learnable, *Communications of the ACM*, pp 1134-1142, 1984
- [Varela89] F. Varela, *Autonomie et connaissance: essai sur le vivant*, Editions du seuil, 1989
- [Varela93] F. Varela, E. Thompson and E. Rosch, *The embodied mind*, MIT Press, Cambridge, 1993
- [Vere83] S.A. Vere, Planning in Time: Window and Durations for Activities and Goals, in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PANI-5, no. 3, 1983.
- [Verschure92] P. Verschure, B. Kröse and R. Pfeifer, Distributed adaptive control: The self-organization of structured behavior, in *Robotics and Autonomous Systems* 9, 1992.
- [Webber02] C. Webber, S. Pesty and N. Balacheff, A multi-agent and emergent approach to learner modeling, *Workshop on Coalition Formation*, july 2002, Bologne
- [Whitehead93] Steven D. Whitehead, Jonas Karlsson and Josh Tenenber. Learning Multiple Goal Behavior via Task Decomposition an Dynamic Policy Merging. In J. H. Connell and S. Mahadevan, editors, *Robot Learning*, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [Whitehead95] S.D. Whitehead - L.-J. Lin, Reinforcement learning in non-markovian decision processes, in *Artificial Intelligence* vol 73, pp 271-306, 1995
- [Wixon91] Lambert E. Wixon. Scaling Reinforcement Learning Techniques via Modularity. In *Proceedings of the Eighth International Workshop on Machine Learning*, 1991.

[Wooldridge96] Wooldridge, M., Time, Knowledge, and Choice, dans Intelligent Agents II, LNAI 1037, Springer Verlag, 1996

3 Les systèmes multi-agents

La recherche dans les systèmes multi-agents (SMA) consiste à comprendre comment une société d'entités autonomes appelées agents peuvent s'organiser de façon à résoudre des problèmes, réaliser des tâches et d'une manière générale produire des phénomènes globaux qu'aucun agent ne peut réaliser ou pas avec la même efficacité individuellement. Alors que l'IA classique utilise la métaphore de l'intelligence humaine pour développer ses algorithmes, les SMA utilisent la métaphore sociale que ce soit celle des insectes dits sociaux quand les agents sont réactifs (SMA réactifs) ou des organisations humaines quand les agents sont cognitifs (IA-like). Les thèmes principaux sont l'architecture des agents que nous avons traité auparavant et sur laquelle nous ne reviendrons pas et la coordination, c'est-à-dire l'exploitation des interactions entre les agents et avec, éventuellement, un environnement dans lesquels ils sont plongés. C'est sur ce dernier aspect que nous avons concentré nos travaux en SMA.

Nous nous intéressons aux systèmes multi-agents (SMA) depuis 1987 avec notre participation au projet européen COST-13 initié par le Prof. Jean-Claude Latombe et finalement mis sur pied après son départ pour les Etats-Unis par Yves Demazeau (LEIBNIZ – Grenoble) et moi-même. Le résultat de ce projet a été essentiellement la mise sur pied de la communauté européenne sur les systèmes multi-agents avec l'organisation du premier Workshop européen: "Modelling an Autonomous Agent in a Multi-Agent World" (MAAMAW) en 1989 à Cambridge (Angleterre) [Demazeau90].

Les activités de mon équipe se sont d'abord concentrées sur la combinaison des systèmes multi-agents et des techniques d'optimisation (principalement le recuit simulé) sur des problèmes industriels et plus particulièrement en productique:

- MARSA: un système d'ordonnancement dynamique en collaboration avec l'Institut de Microtechnique de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne avec le contrat SPP-IF (SchwerPunkt Program-InFormatik) no 5003-034319 [Daouas96a, Daous96b].
- AMACIOA: un système de conception de lignes d'assemblage en collaboration avec Sysmelec SA: société de construction de lignes d'assemblage robotisées avec les contrats CERS (Commission d'Encouragement à la Recherche Scientifique) 2076.1 et 2893.1 [Sprumont97a, Sprumont97b].

Les résultats de ces deux projets sont respectivement:

- un système multi-agent d'ordonnancement dynamique couplé avec un simulateur d'atelier flexible;
- un système de conception de lignes d'assemblage qui a été installé dans l'entreprise Sysmelec SA et est utilisé à des fins de transfert de connaissances;

ainsi que deux thèses de doctorats :

- une thèse sur la comparaison de différentes formes d'ordonnancement multi-agent [Daous96b];
- une thèse sur le couplage entre deux systèmes multi-agents et donc deux processus d'optimisation : un système pour la planification de gammes

d'assemblage et un système pour la conception de la ligne d'assemblage correspondante [Sprumont97a].

Le savoir-faire issu de ces deux projets a été valorisé à la fois scientifiquement et industriellement.

Industriellement, il a été valorisé dans le cadre du projet CTI 4544.2 entre TI-Informatique commercialisant VisualProd, un logiciel de gestion de production intégré, ICARE/IS-Net: une société de transfert de technologie de l'Ecole d'Ingénieur du Valais et nous-même. Ce projet a débouché en 18 mois sur la réalisation d'un module d'ordonnancement dynamique multi-agent intégré à VisualProd pour pouvoir calculer la planification d'une entreprise en temps réel au fur et à mesure de la saisie des commandes et des événements de production [Yoo02].

Scientifiquement, ces projets ainsi que l'application des SMA réactifs en démonstration automatique de théorèmes [Müller96] ont démontré l'utilité des systèmes multi-agents réactifs dans lesquels l'accent est mis sur les interactions plutôt que sur la programmation des agents eux-mêmes. C'est pourquoi notre intérêt principal s'est porté sur les SMA réactifs et a donné lieu à des recherches plus fondamentales depuis 1996 en collaboration avec Jacques Ferber au LIRMM (Montpellier), O.Labbani-Igbida qui a fait sa thèse Laboratoire d'Automatique de Besançon et est maintenant Maître de Conférence à l'Université de Picardie (Amiens) et depuis plus récemment avec A.Koukam et V.Hilaire du LaRIS (Université de Belfort/Montbéliard).

Le sujet principal que j'ai poursuivi jusqu'à mon départ de Neuchâtel, est l'analyse et la conception de SMA réactifs (ou n'importe quel SMA dans lequel l'importance des interactions excède celle de l'architecture des agents) dans quatre directions:

- la formalisation des actions concurrentes dans les SMA avec la notion d'influence [Ferber96] afin de spécifier à terme une machine multi-agent générique, activité qui a été poursuivie au LIRMM par l'équipe Jacques Ferber et que nous allons reprendre avec la simulation multi-agent;
- la formalisation de la notion d'émergence [Jean97] et son utilisation pour dériver une méthodologie systématique [Labbani96,Ferber97,Müller98a,Müller98b]:
 - pour concevoir une ensemble de robots devant réaliser une tâche commune :
 - en spécifiant le comportement global en terme d'interactions [Labbani97,Labbani98a] utilisant une formalisation logique,
 - en instanciant la spécification dans un système concret,
 - en validant le comportement du SMA en utilisant les chaînes de Markov [Labbani98a,Labbani98b];
 - pour concevoir de façon systématique un système multi-agent pour la résolution de problèmes avec ou sans optimisation [Mül98b].
- l'exploration de la notion d'organisation pour spécifier les invariants interactionnels dans un système complexe avec des points de vue multiples initialement en collaboration avec l'Institut de Géographie de Strasbourg [Müller97,Weber98], puis avec le LaRIS [Hilaire00] et maintenant avec deux thèses à l'Université de Neuchâtel: celle de Matthieu Amiguet sur les rôles [Müller01, Müller02] et celle d'Adina Nagy sur les organisations ;

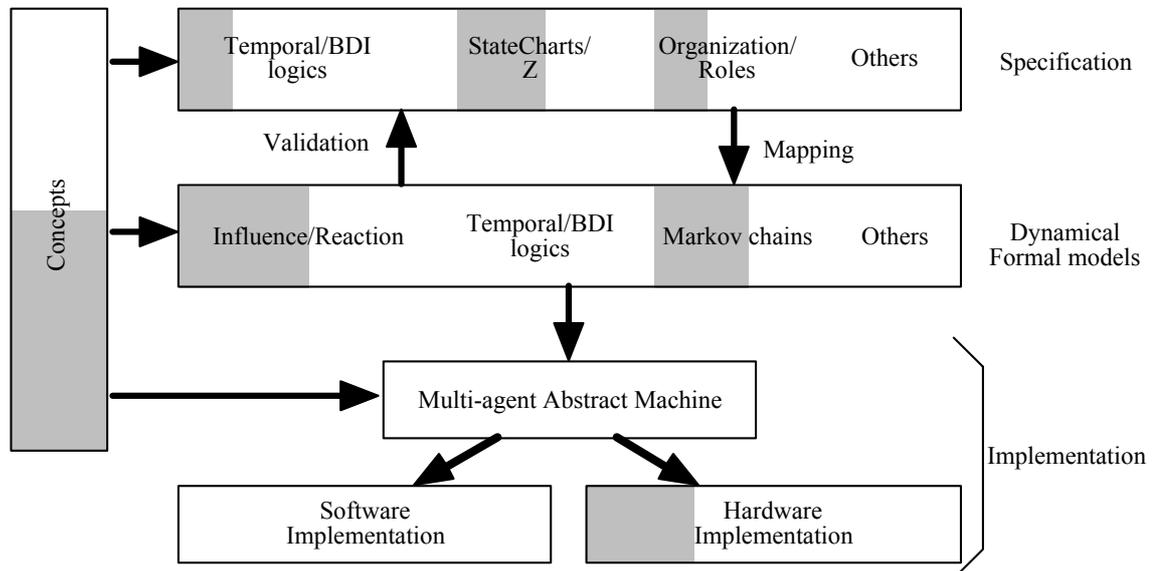
- l'exploration de l'utilisabilité d'outils formels de spécification pour les SMA réactifs utilisant les statecharts initialement en collaboration avec le LaRIS de Belfort-Montbéliard [Hilaire98] et repris par Mathieu Amiguet pour formaliser les problèmes de compatibilité entre rôles [Amiguet02].

Des recherches plus exploratoires ont été effectuées dans le cadre du groupe AFIA/AFCEC "Collectif" animé par Sylvie Pesty (LEIBNIZ-Grenoble) qui a travaillé sur l'émergence [Jean97] (également grâce à la thèse de M. Scaglione [Scaglione96] que nous avons déjà mentionné). Ce groupe a fusionné avec un autre groupe pour fonder COLLINE (<http://iun.unine.ch/ai/colline/>), le groupe de travail AFIA et GDR-I3 que j'anime depuis l'automne 1997 et qui étudie le rôle de l'environnement dans les phénomènes d'auto-organisation.

Ces recherches et réflexions ont été ou sont appliquées :

- à la simulation d'organisations sociales, à la catégorisation d'images satellite et à la modélisation de la dynamique des villes (Institut de Géographie de Strasbourg, Dr. C.Weber et projet Programme des Systèmes d'Information Géographique PSIG) ;
- à la conception d'une architecture pour l'émergence d'un processus d'enseignement en EIAH dans le cadre du projet européen BAP.

L'articulation générale de ces différentes directions de recherche est résumée dans la figure suivante avec en gris l'état d'avancement dans chacun des domaines :



Au niveau inférieur, l'implémentation a été surtout faite matériellement par la réalisation sur une société de robots. Nous verrons dans la partie sur la simulation que nous nous attaquons maintenant à l'implémentation logicielle d'une machine multi-agent générique mais qui se fera en partenariat avec le LIRMM.

Sur les modèles dynamiques formels, nous retrouvons la même problématique que pour les agents autonomes, à savoir la formalisation des dynamiques structurelles. Nous n'avons que peu avancé sauf de considérer la machine multi-agent générique comme un futur modèle formel ce dont nous discuterons en conclusion.

Au niveau supérieur de la spécification, nous avons utilisé des formulations logiques dans [Labbani97] mais nous avons finalement peu ou pas exploité les logiques temporelles sauf dans [Ferber00] même si je ne désespère pas de réutiliser le savoir-faire que j'ai développé dans ma thèse en logique intensionnelle. L'essentiel s'est concentré sur l'utilisation des statecharts pour spécifier les rôles dans les descriptions organisationnelles.

Finalement, les concepts invoqués pour construire une méthodologie de conception de systèmes multi-agents à partir des spécifications (à gauche de la figure) s'articulent essentiellement autour de la notion d'émergence.

Après cette description succincte des projets, nous allons diviser la présentation de ces recherches en deux parties :

- La conception de systèmes multi-agents pour la résolution de problèmes ;
- La simulation multi-agent.

Cette division correspond à une approche synthétique, respectivement descriptive, des systèmes complexes¹⁰.

3.1 Résolution de problèmes multi-agent

Le sujet principal est comment comprendre et concevoir des systèmes multi-agents réactifs. Pour ce faire, nous nous reposons sur trois concepts :

- La programmation orientée-agent ;
- L'émergence ;
- Les structures d'interaction.

Nous allons introduire ces trois concepts et en dériver une méthodologie. Cette méthodologie demande divers formalismes de spécification et de réalisation à plusieurs niveaux d'abstraction. Les formalismes explorés ainsi que leur mise en œuvre seront discutés.

3.1.1 La programmation orientée-agent

Il s'agit de situer les systèmes multi-agents dans la continuité des acquis du génie logiciel qui a débouché, entre autres, au concept de programmation orientée-objet. La table suivante, due à Van Parunak, esquisse cette continuité :

Paradigme/responsabilité	Comment	Quand	Pourquoi
Objet	X		
Processus	X	X	
Agent	X	X	X

Un des apports fondamentaux de la programmation orientée-objet est l'encapsulation du « comment ». Le mécanisme proposé est de demander à un objet de rendre un service (le « quoi »). Comment ce service est réalisé est de la responsabilité de l'objet à qui on le demande. On peut dès lors changer comment ce service est rendu sans remettre en cause ce qui a besoin de ce service. Ceci ouvre la porte à la réutilisabilité

¹⁰ Il existe un troisième domaine, à savoir le domaine des agents logiciels dans lequel on ne réalise qu'un agent qui est appelé à travailler dans une communauté de ces agents mais programmés par d'autres personnes, comme, par exemple, dans le commerce électronique. Mais ce domaine pose des problèmes spécifiques que nous n'avons pas abordés.

des composants logiciels. Néanmoins, si l'objet a la responsabilité du comment, il n'a aucun contrôle sur quand le service est exécuté ni la possibilité de refuser de remplir le service demandé. Le processus, pensé comme un objet actif, ajoute la responsabilité du « quand » dans la mesure où il s'exécute en parallèle et donc décide souverainement quand il est opportun de remplir un service donné. La programmation d'un tel composant demande non seulement une analyse des services à rendre (« quoi ») et de la meilleure façon de les accomplir (« comment ») mais aussi de la temporalité des composants avec lesquels il est en interaction de façon à être sûr d'accomplir les bonnes choses au bon moment. Dans la méthodologie de conception, il s'agit donc d'une part d'analyser à quoi sert ce composant (« pourquoi ») et d'autre part d'analyser dans quel contexte il va servir afin de dériver une réalisation correcte. Si le contexte est dynamique et partiellement imprédictible, la programmation du composant en devient particulièrement délicate. Le concept d'agent (et donc de programmation orientée-agent) permet de fournir le niveau d'abstraction nécessaire pour résoudre ce problème en proposant de rendre non seulement explicite le « pourquoi » du composant mais en plus en le codant explicitement dans le composant en même temps que les mécanismes qui permettront au composant de calculer dynamiquement quand et comment il est plus adéquat de rendre ses services. On obtient ainsi la notion d'agent autonome relativement à sa finalité (et accessoirement la première ligne de recherche).

Pour prendre un exemple, la planification de production nécessite en première analyse les structures de données suivantes qui deviennent autant d'objets (ou de n-uplet dans une base de données) :

- Les commandes client qui décrivent les produits à fabriquer, leur quantité, leur date de livraison, le client auquel ils sont destinés, etc. ;
- Les centres de fabrications qui décrivent les commandes clients sur lesquels ils interviennent, quand, etc. ;
- Les stocks qui contiennent les pièces en attente de manipulation, montage ou livraison.

Dans une perspective orientée-agent, on peut essayer d'assigner à chaque objet une finalité :

- Une commande de livraison a pour but de se faire fabriquer dans les délais ;
- Un centre de charge doit maximiser son taux d'utilisation, minimiser les changements de réglage, etc. ;
- Un stock doit assurer la présence d'un minimum de pièces (ou aucune en flux tendu).

Dès lors, chaque objet devient actif et va interagir avec les autres pour satisfaire son objectif. Ce système se stabilise lorsque tous les buts sont satisfaits et se remet en activité dès qu'un but cesse de l'être suite à une perturbation (indisponibilités d'un centre de charge, retards de livraison, etc.). On obtient un système dynamique qui va réagir spontanément à toute perturbation en essayant de rétablir, qui son délai de fabrication, qui son taux d'utilisation, qui la disponibilité des pièces nécessaires. Finalement, on souhaite que le système dans son ensemble respecte certaines propriétés, par exemple d'optimalité (minimisation des retards moyens, etc.).

On voit qu'on obtient un système informatique aux propriétés fondamentalement nouvelles car :

- Il s'adapte spontanément et dynamiquement à toute perturbation : arrivée d'une nouvelle commande, indisponibilité d'un centre de charge, rupture de stock ;
- Il ne s'agit plus d'un algorithme qui calcule un résultat à partir de données mais les données deviennent actives et l'état du système dynamique résultant devient en lui-même le résultat recherché¹¹.

Cette méthodologie a été élaborée et appliquée dans le cadre du projet CTI 4544.2 [Yoo02] et fait l'objet d'une démonstration dans le cadre de AAMAS'02 à Bologne.

Cependant, cette méthodologie ne rend pas encore grâce de toute la puissance du paradigme multi-agent qui introduit, d'une part la notion d'environnement et d'autre part l'organisation globale que l'on souhaite obtenir. Une façon de spécifier l'environnement est de considérer que si il n'est pas possible d'assigner à un objet une finalité claire (par exemple, si le centre de charge ne fait qu'enregistrer les commandes à fabriquer sans avoir de choix à faire) alors celui-ci peut rester un objet passif et donc faire partie de l'environnement. La notion d'émergence permet de rendre compte de cette partie de la conception et surtout de la conception du système à partir de la spécification globale de façon plus systématique.

3.1.2 L'émergence

Le concept d'émergence est important pour décrire comment un phénomène non-compositionnel¹² au niveau macro repose sur une structure d'interactions à un niveau micro. L'avantage est la possibilité pour le micro-niveau de s'auto-organiser fournissant ainsi à la fois flexibilité et robustesse malgré la possible simplicité des composants au niveau micro. Nous allons partir d'une adaptation de la définition de phénomène émergent par Stéphanie Forrest [For89] qui a été élaboré dans [Jean97] et repris dans [Müller98a,Müller98b]. Nous dirons qu'un phénomène est émergent si :

- Il y a un ensemble d'entités en interaction dont la dynamique est exprimée dans un vocabulaire ou théorie D distincte du phénomène émergent à produire ;
- La dynamique de ces entités interagissantes produit un phénomène global qui peut être un état structuré stable ou même la trace d'exécution ;
- Ce phénomène global peut être observé et décrit dans un vocabulaire ou théorie D' distincte de la dynamique sous-jacente.

Pour que le dernier point soit possible, le phénomène global doit être globalement perçu et, donc, inscrit sur un support. Dans les systèmes naturels, l'environnement joue ce rôle important de médium d'inscription. C'est la même chose dans les organisations humaines où les bases de données et de connaissances sur les ordinateurs sont là pour fournir des traces des processus en cours et simultanément pour les piloter. C'est la raison pour laquelle nous voulons nous concentrer sur le concept d'environnement dans les systèmes multi-agents.

Un exemple naturel est la planification d'un chemin par les fourmis. Les entités en interaction sont ici les fourmis. Une fourmi qui porte de la nourriture à son nid dépose une trace de phéromone dont la dissipation produit un gradient d'odeur qui est perçu par les fourmis. Ce phénomène est relié au concept de « tag » de Holland [Holland95]

¹¹ A noter que cela commence à ressembler fortement à ce que l'on cherchait en conclusion de la partie sur les systèmes autonomes.

¹² Non-compositionnel dans le sens que les descriptions au niveau macro ne sont pas une simple composition des propriétés individuelles au niveau micro [Bunge77].

qui est essentiel pour ce qu'il appelle les systèmes complexes adaptatifs. Le phénomène global est le va et vient des fourmis mais qui peut seulement être vu par un observateur de la colonie de fourmis qui peut décrire ce phénomène global en termes de chemin. Les interactions entre les fourmis et l'environnement ne sont pas exprimées en termes de chemin (théorie D' de nature géométrique) mais en terme de gradient local de phéromones (théorie D de nature chimique). Les fourmis produisent une structure stable et globale qui devient un chemin aux yeux de l'observateur. Le phénomène global n'existant que pour l'observateur, on parle d'émergence faible ou émergence de premier ordre.

Un pas plus loin, les entités interagissantes peuvent percevoir le phénomène global en tant que tel qui est alors interprété par chaque entité. Ce point est important parce que la plupart du temps, la perception du phénomène global est utilisée par le programmeur (en informatique) ou le gestionnaire (dans les organisations) pour influencer la dynamique de façon à réaliser la performance globale souhaitée. Cette indirection peut être supprimée si chaque entité peut avoir un retour du phénomène global auquel elles contribuent. Dans notre exemple, ce serait le cas si chaque fourmi aurait une carte du chemin (ce qui n'est pas nécessaire dans ce cas). Nous parlons alors d'émergence forte ou émergence du deuxième ordre.

Il reste maintenant à opérationnaliser ce concept d'émergence pour en faire une méthodologie systématique de conception de systèmes multi-agents (le niveau micro) à partir d'une spécification de leur(s) finalité(s) (le niveau macro). Pour cela nous allons partir de l'expérience des systèmes que nous avons implémenté dans les différents projets.

3.1.3 Les structures d'interaction

Les exemples sur lesquels nous avons eu l'occasion de travailler ont en commun le fait d'être des illustrations de l'approche émergente des systèmes multi-agents à la fois dans le cadre académique et industriel. Dans tous ces projets, il y a un point commun sur le type des agents et des structures du système qui finalement est apparu après une démarche par essai-erreur et que nous allons exhiber.

Le résultat de l'ordonnancement dans MARSIA [Daouas96a, Daouas96b] ou dans le système d'ordonnancement de Daewoo [Chung97] est une allocation de tâches à des intervalles de temps et à des machines. Cependant l'allocation n'est pas explicitement manipulée par les agents mais résulte des interactions entre les objets à allouer sous forme agentifiée. Dans AMACOIA [Sprumont97a, Sprumont97b] les agents sont les liens entre les composants alors que le résultat est un ordonnancement de ces liens. De façon similaire la ligne d'assemblage est une structuration des outils et des machines et pas seulement les outils, les postes de travail et les cellules eux-mêmes qui étaient les agents dont les interactions sont à l'origine de la structuration. Inversement, si le problème aurait été de trouver les liens entre les composants, les agents ne seraient plus les liens mais les composants à lier ensemble. La même logique peut être vérifiée dans le cas de AMROSE [Overgaard94] pour le problème de la cinématique inverse¹³ et ailleurs.

¹³ C'est le problème en robotique de trouver les coordonnées articulaires à partir de la position finale de l'outil par opposition à trouver la position de l'outil à partir des coordonnées articulaires.

En résumé et en contraste avec les paradigmes de programmation habituels, la structure de donnée résultante n'est jamais manipulée explicitement par les agents mais émerge de leurs interactions. Plus que cela, le résultat du processus est la structure d'interaction, une fois stabilisée. Cette propriété est la source de l'adaptabilité d'un tel paradigme de programmation parce que nous n'avons jamais à faire explicitement avec les possibles modifications de la structure dans le cas où les circonstances changent. Elles se produisent spontanément par la dynamique des agents. Donc le point clef pour la conception de systèmes multi-agents réactifs est la structure d'interaction entre les agents et avec l'environnement qui va produire la structure de données considérée comme le résultat global attendu.

3.1.4 La méthodologie

La définition de l'émergence dans 3.1.2 et la structure micro résultante telle qu'elle apparaît dans les exemples de 3.1.3 suggèrent un certain nombre de pas pour concevoir un système multi-agent :

- La description du comportement global ou plus précisément de la structure globale que le système multi-agent doit réaliser (niveau macro) ;
- La projection de cette structure globale sur la structure d'interaction au micro-niveau déterminant l'identité des agents et la dynamique d'interaction ;
- La spécification des comportements des agents individuels produisant les interactions observées.

L'absence de connexion directe entre le micro-niveau et le macro-niveau demande des outils de validation pour garantir l'émergence du comportement global désiré à partir du micro-niveau proposé.

Plus précisément, pour aller du comportement global au comportement local des agents :

- nous devons décrire la structure globale que nous voulons réaliser ou dans le cas de la résolution de problèmes, l'espace des configurations possibles. Cette structure peut être spatiale comme une carte ou un chemin, logique comme une allocation ou n'importe quelle structure relationnelle, spatio-temporelle comme des tâches ou des mouvements coordonnés ;
- cette structure globale est faite de composants comme les dépôts de phéromones ou les lignes pour les structures spatiales, des relations de base ou des allocations unitaires pour les structures logiques ou des mouvements élémentaires ou des applications de force pour les tâches spatio-temporelles. Certains de ces composants doivent résulter d'un choix alors que d'autres sont juste des conséquences de ces décisions. Nous appellerons paramètres les composants sur lesquels il faut prendre une décision (même si les conséquences varient également) ;
- La valeur des paramètres doivent être produits par interactions entre les entités déterminant ainsi ce que sont les agents.

Les agents apparaissent comme complémentaires à la structure à produire. L'ensemble de toutes les structures possibles qui peuvent être potentiellement explorées par le système multi-agent est contraint par l'environnement. Donc l'environnement est très important si nous voulons comprendre ce qui va effectivement être fait ainsi que pour le concevoir de façon à exprimer les contraintes pertinentes sur la dynamique du système multi-agent.

Plus précisément, les rôles de l'environnement apparaissent comme multiples :

- Au niveau micro :
 - Un médium d'interaction puisque les interactions peuvent être réalisées de différentes façons : directement par envoi de messages ou indirectement par modification de l'environnement. C'est donc une modalité de conception ;
 - La coordination des interactions à différentes échelles de temps : en effet les modifications de l'environnement peuvent avoir une certaine rémanence : les rendre permanentes permet de garder l'entièreté du passé ce qui rend le système stable mais peu adaptatif alors qu'une modification volatile permet une adaptabilité maximale (voire une instabilité) au dépend de la mémoire ;
 - Les contraintes sur la dynamique des agents en empêchant les mouvements de certains agents et donc en influençant les états possibles du système dans sa globalité.
- Au niveau macro :
 - Une mémoire collective car en inscrivant l'ensemble des modifications produites par les entités en interaction, l'environnement mémorise les dynamiques produites qui vont dès lors influencer les interactions futures et les canaliser ;
 - Un médium d'inscription global car l'environnement peut servir à rendre visible la structure globale produite par le micro-niveau fournissant ainsi une image de l'état du système interprétable en termes de D' ;
 - Le contrôle du niveau micro car, en retour, l'environnement peut éventuellement être modifié par l'observateur pour influencer la dynamique du niveau micro et donc sa trajectoire globale.

Nous voyons donc que la notion d'émergence nous permet d'une part de structurer une méthodologie de conception détaillée et d'autre part elle permet de mettre en avant les rôles multiples de l'environnement qui sont autant de paramètres de conception du système multi-agent.

3.1.5 Quelques approches concrètes

La méthodologie qui précède a été déployée en partant de différents types de formalisations du macro-niveau et donc différentes façons de le déployer au micro-niveau. Nous allons en décrire trois :

- La spécification de l'espace de recherche dans le cas d'une résolution de problème classique avec optimisation ou non ;
- Un formalisme logique exprimant ce que le système multi-agent doit faire en terme de pattern d'interactions et d'invariants temporels ;
- Un formalisme plus descriptif décrivant l'organisation multi-agent en termes de schémas, rôles et relations entre rôles.

Nous allons décrire ces trois approches à tour de rôle montrant les perspectives de recherche pour chacun d'eux.

3.1.5.1 Par espace de recherche

Afin de fixer le vocabulaire, nous allons définir formellement en quoi consiste la résolution de problèmes (voir, par exemple, [Christos82]). Un problème est spécifié par:

- un espace de recherche E constitué d'un ensemble fini ou infini, discret (combinatoire) ou continu d'états $\{e_i\}$;
- un sous-espace S dans E appelé l'espace des solutions.

Il est dynamique si l'espace de recherche et/ou l'espace des solutions évolue au cours du temps.

L'espace de recherche doit être décrit par une structure formée par des composantes et des opérations de paramétrisation et de composition permettant d'engendrer l'espace de recherche. Cette structure est souvent donnée comme un ensemble de variables v_i et leur domaine de définition D_i (approche CSP, cf. [Ghedira93]). Dans notre cas, il sera plus parlant de se donner les composantes C et des opérations de paramétrisation et de composition que nous appellerons la structure S de l'espace de recherche.

On peut définir sur l'espace d'état une fonction objectif F et chercher un état qui soit le meilleur des états solutions dans le sens qu'il optimise cette fonction F (minimum ou maximum). Nous avons alors affaire à un problème d'optimisation. Si il y a un ensemble de fonctions F_i , il s'agit d'optimisation multi-critère.

L'ensemble des solutions est exprimé, en général, en intention par un ensemble de contraintes. Lorsque cette définition ne permet pas de construire directement un ou plusieurs états solutions, nous avons besoin d'un processus de recherche. En l'occurrence c'est le processus de recherche, respectivement la solution, que nous souhaitons faire émerger.

Comme nous l'avons décrit précédemment, c'est l'approche qui a été utilisée pour les projets d'ordonnancement dynamique [Daous96b, Sprumont97a, Yoo02]. Nous sommes en train de l'appliquer dans le cadre du projet européen BAP à la conception d'un système d'enseignement assisté par ordinateur, donc en EIAH. En l'occurrence, l'interaction entre un apprenant et un certain nombre d'agents logiciels et humains (enseignants et autres apprenants) produit une trace d'exécution constituée de problèmes, d'étapes de résolution de ces problèmes, de jugements et de conseils. Cette trace est interprétable par un observateur extérieur (le didacticien) comme les invocations successives ou simultanées de conceptions relatives au domaine d'étude. On dit que l'apprenant a appris une conception si cette trace fait apparaître sans ambiguïté l'invocation de la conception à acquérir¹⁴. On a bien émergence de l'apprentissage puisque l'on a simultanément la production d'un phénomène global par interaction (la trace) entre des entités humaines et logicielles (l'apprenant y compris : il s'agit d'un système multi-agent hybride humain/agents artificiels) et son interprétation par un observateur extérieur comme une acquisition (ou une non acquisition) de conceptions. La structure d'interaction devant produire la trace susmentionnée, on en déduit en première approximation la présence d'agents produisant des problèmes, des jugements et des conseils. Contrairement aux exemples précédents où la lecture du résultat était immédiate, l'interprétation de la trace est ici un problème en soi qui a été traité également par un système multi-agent décrit dans [Webber02].

¹⁴ A noter qu'on ne fait aucune hypothèse sur la présence effective de cette conception dans l'univers mental de l'apprenant pour se limiter à l'interprétation de ses productions.

3.1.5.2 Par formalisme logique

Le formalisme logique utilisé dans [Labbani97] repose sur des prédicats de base décrivant les interactions en termes de stimuli et de réponses ainsi que l'environnement et l'état des agents comme fonction de l'espace et du temps. Nous obtenons ainsi un langage pour décrire des structures comportementales spatio-temporelles sous la forme de patterns d'interactions entre les agents et l'environnement. Finalement, une propriété globale du système multi-agent comme la capacité de réaliser une tâche, percevoir une condition de l'environnement etc. est abstrait des patterns d'interaction possibles [Labbani97, Labbani98a, Labbani98b]. Encore une fois, il s'agit bien d'émergence puisque les interactions entre les agents produisent des structures d'interactions (niveau global) et ces structures sont interprétées par un observateur extérieur en termes cognitifs puisqu'on attribue au système multi-agent dans son ensemble la capacité de percevoir, connaître, planifier, etc.. Il s'agissait donc de spécifier dans un premier temps le comportement du SMA en termes cognitifs, puis d'imaginer quelles observations des comportements du SMA permettraient de qualifier ce qui se passe en ces termes. La dernière étape est ensuite de construire les agents de façon à ce que leurs interactions produisent les structures interactionnelles souhaitées.

Ce formalisme logique a été élaboré de façon ad-hoc mais est très proche des travaux où les logiques modales sur le temps, la connaissance, le choix, etc. sont munies d'une sémantique sur des ensemble de scénarios possibles [Woo96, Fag92]. Un scénario est un ensemble d'états du monde et un état du monde est un ensemble composé :

- D'un état de l'environnement ;
- De l'état de chaque processus.

Une formule modale sélectionne parmi tous les scénarios possibles un sous-ensemble qui est compatible avec la formule. Cet ensemble est l'interprétation de la formule. Il y a plusieurs limitations à ces formalismes au regard de notre application :

- La sémantique est orientée état et pas interaction. En conséquence la communication et les interactions sont implicites et peuvent seulement être déduits des changements d'état ;
- Jusqu'à maintenant l'environnement a été généralement ignoré parce qu'en informatique seuls les processus concourants sont pertinents (ceci s'applique aussi à une grande partie des recherches en multi-agent) ;
- Les descriptions ne sont pas structurées : alors que le point principal est la structure des interactions et possiblement leur évolution à travers le temps, la relation entre les agents et l'environnement n'est pas explicite ;
- L'usage de ces théories dans les systèmes multi-agents est limité à la spécification d'un seul agent sans dérivabilité claire dans un système implémentable.

Cependant, nous croyons que les logiques modales sont très puissantes pour traiter des systèmes dans un environnement dynamique et imprédictible et pour réduire la complexité en extrayant des propriétés des comportements globaux en terme de connaissance, savoir-faire, choix, etc. et inversement pour être capable de spécifier les dynamiques que nous voulons avoir en des termes de haut-niveau. Par rapport à notre problématique des agents autonomes, cette approche ouvre la voie vers l'utilisation d'une spécification cognitive d'un agent en interaction avec son environnement mais dont la réalisation ne serait plus qu'un système de production de structures

interactionnelles entre les composants internes et externes de l'agent (donc une dynamique structurelle) sans références aux concepts utilisés dans la spécification.

3.1.5.3 Par organisation

La description d'un système multi-agent en termes d'organisation est une approche complémentaire à l'approche logique. L'idée est de structurer des ensembles récurrents d'interactions entre agents sous la forme d'un réseau de relations entre rôles. Alors que la logique spécifie les propriétés invariantes de ces dynamiques, nous les rendons ici structurellement explicites. La relation est première ou, de façon équivalente, les rôles sont co-définis à travers la relation. Par exemple, il n'y a pas d'acheteur sans un vendeur et la relation définit simultanément les deux rôles. Un niveau plus haut, jouer cette relation est équivalent à un ensemble d'interactions possibles. Finalement, un schéma d'organisation est un ensemble de rôles et de relations motivé par une finalité globale. Il doit être complet dans le sens que toutes les ressources nécessaires pour jouer les rôles font partie de l'organisation. Il y a de nouveau potentiellement émergence puisque nous allons reconnaître dans les interactions produites par le système multi-agent des comportements individuels récurrents (les rôles) dans des comportements collectifs récurrents (les organisations). Nous voyons qu'il s'agit d'une approche un peu plus structurée que la précédente qui a l'avantage de pouvoir superposer sur un SMA un ensemble de regards qui sont autant d'organisations alors que jusqu'ici on ne faisait émerger en général qu'une structure unique : la solution d'un problème ou un comportement collectif.

Il reste le problème de mettre en correspondance la spécification en termes d'organisations et la réalisation effective au niveau micro. Cette étape est suffisamment complexe pour que nous procédions par étapes successives. Pour le moment, les notions de rôle et d'organisation n'existent pas seulement comme interprétation d'un observateur extérieur mais sont les termes mêmes dans lesquels le système multi-agent va être programmé. Nous nous situons donc momentanément dans le cadre de ce que les sociologues appellent le holisme méthodologique [Gilbert95] c'est-à-dire la prédominance des structures sociales sur les individus, par opposition à l'individualisme méthodologique dans lequel les individus sont producteurs des structures sociales. Dans le cas des sociétés humaines¹⁵, on peut prendre l'un ou l'autre selon que l'on s'intéresse aux fonctionnements collectifs et sociaux ou à leur genèse respectivement.

Dans ce cadre, un agent peut jouer autant de rôles qu'il veut (par exemple, être à la fois un acheteur et un vendeur) ou est même défini par l'ensemble des rôles qu'il joue possiblement dans plusieurs groupes qui sont autant d'instances de schémas d'organisation. Cette approche a été proposée par [Dur96] et a été développée dans [Gutknecht98,Gutknecht01] comme méthodologie de conception sous le nom d'Aalaadin. L'implémentation multi-agent rend explicite les notions d'agents, de groupes d'agents et de rôles dans la plateforme MadKit [Madkit]. Il y a dans ces implémentations un certain nombre de limitations :

- L'environnement n'est pas même mentionné dans cette approche alors que nous pensons que les interactions avec l'environnement forment une partie intégrante de l'organisation ;

¹⁵ Mais il est possible que ce soit généralisable à toutes les formes du vivant.

- Les schémas d'organisation sont soit attribués statiquement à un ensemble d'agents [Dur96] ou disparaissent en tant que tel dans [Gutknecht98]. Une position intermédiaire est de permettre aux agents de manipuler explicitement des organisations [Müller01,Müller02] et à terme, de faire émerger les organisations souhaitées ;
- Il n'y a pas moyen de décrire comment une organisation peut être dynamiquement réorganisée dans une autre. Cette caractéristique est essentielle parce que l'exécution de différentes tâches peut demander de changer dynamiquement l'organisation pour chacune d'entre elles. Les transitions peuvent devenir même plus importante que les états stables.

En résumé, la description des systèmes multi-agents en termes d'organisations est une abstraction très utile pour traiter des interactions à un plus haut niveau et avec la possibilité de gérer les fonctionnalités multiples d'un agent mais cette approche doit encore être approfondie dans l'objectif d'une véritable émergence.

3.1.6 La description du niveau micro

Comme on l'a vu dans la section précédente, la formalisation des interactions est au cœur de toute la méthodologie. Elle fournit la description de la sémantique des logiques modales associées et la dynamique des relations entre rôles. Elle peut également fournir la sémantique opérationnelle de la machine abstraite multi-agent. Il devient donc essentiel d'envisager un formalisme générique pour parler des dynamiques interactionnelles et des structures qu'elles déploient dans l'espace et dans le temps. Nous allons discuter la notion d'interaction et regarder quelques formalismes possibles pour représenter cette notion.

Dans la notion d'interaction, il y a la notion d'action réciproque. Cependant la prise en compte habituelle de la notion d'action en termes de changement d'état pose des problèmes face aux actions simultanées. Dans ce cas, il est difficile de voir quel est le résultat de deux changements d'état simultanés sur le même environnement. C'est la raison pour laquelle nous utilisons la notion générique d'influence [Ferber96]. Un agent n'effectue pas une action (c'est-à-dire un changement d'état) mais produit une influence qui, combinée avec d'autres influences simultanées, va produire éventuellement un changement d'état. Par exemple, nous n'ouvrons jamais une porte (un changement d'état) mais nous poussons la porte (une influence) qui, si la porte n'est pas fermée à clef et quelqu'un n'est pas en train de pousser de l'autre côté peut résulter en l'ouverture de la porte (le changement d'état). Inversément, l'état de l'environnement n'est pas perceptible en tant que tel (par exemple une chaise en face de moi) mais seulement l'influence qui résulte de sa dynamique (les rayons lumineux). Une influence est une notion suffisamment générale pour prendre en compte des forces au niveau physique jusqu'aux actes de langage. Ce concept a été utilisé pour mettre au point un modèle générique où non seulement les états mais aussi les influences (et donc les interactions) sont des objets de premier ordre. Cependant, ce modèle souffre actuellement d'un certain nombre de limitations :

- Le modèle réalisé jusqu'ici est synchrone et nous aimerions migrer vers une prise en compte asynchrone de la dynamique du système. Cette extension soulève des problématiques importantes comme le problème du temps qu'il est important de résoudre de façon à comprendre la dynamique globale du système.

- L'environnement est globalement représenté, signifiant que nous devons calculer quel agent reçoit quelle influence étant donné une représentation a priori de l'espace. Nous aimerions renverser la perspective en ayant les agents près les uns des autres parce qu'ils s'influencent et non pas qu'ils soient influencés parce qu'ils sont près l'un de l'autre. Cela signifie que la notion d'influence porte à la fois une signification dynamique et topologique.

L'état du système pourrait être représenté par un graphe d'influences entre les agents et les objets pertinents de l'environnement donnant une nature distribuée à chacun (comme chacun sait, la notion d'environnement global empêche généralement la possibilité de distribuer des systèmes multi-agents sur plusieurs ordinateurs). Ce modèle saisit naturellement la notion de structure d'interaction et à un niveau supérieur d'abstraction la notion d'organisation. La dynamique du système peut être alors décrite par des morphismes de graphes et même étendue par une dimension stochastique.

Plusieurs formalismes peuvent être utilisés pour saisir les propriétés de la dynamique d'un système multi-agent. Le formalisme le plus général mais aussi le moins informatif pour décrire un tel système à événements discrets est certainement le modèle de processus de Markov (et même un modèle de Markov d'ordre n qui tient compte des n états précédents pour prédire le suivant). Une façon de réduire la complexité est de considérer la matrice de transition des influences reçues par un agent (voir [Labbani98a, Labbani98b]). Ceci est habituellement calculable et peut fournir des conclusions si l'état interne de l'agent peut être relié à des propriétés pertinentes de l'environnement.

Dans le cas particulier où la topologie est fixe et les influences peuvent être considérées comme se passant entre les liens agent-agent et objet-agent, d'autres modèles de systèmes réactifs peuvent être utilisés :

- Les réseaux de Petri comme décrit dans le formalisme BRIC [Fer95], ils peuvent également être étendus à des cas récurrents et stochastiques. Quelques résultats théoriques peuvent être obtenus mais le formalisme reste lourd lorsqu'on l'applique sur les grands systèmes ;
- Les statecharts comme décrits dans [Hilaire98] et utilisés dans [Müller01, Müller02] fournissent un formalisme graphique élégant pour décrire des systèmes réactifs avec une sémantique formelle et des outils de simulation. L'avantage est d'avoir un outil de spécification directement exécutable.

Le désavantage de ces formalismes est leur nature statique: aucun élément ne peut être ajouté, détruit ou modifié en cours de simulation. Cependant ce sont des outils intéressants pour décrire la dynamique du système au niveau de l'organisation. En effet, un schéma d'organisation est vu comme un état stable ou un invariant local de la dynamique du système multi-agent. Cet état stable dynamique peut être décrit de façon adéquate en utilisant un de ces formalismes.

Le modèle dynamique multi-agent a deux objectifs complémentaires :

- L'un est de fournir un modèle pour un système multi-agent donné de façon à valider sa conception. Par exemple, le modèle de Markov a été utilisé pour valider la conception d'un système collectif de micro-robots ;

- L'autre est de fournir le fondement d'une machine multi-agent abstraite pour réellement implémenter un système multi-agent sur un ordinateur ou sur un réseau d'ordinateurs.

Dans la section suivante nous allons aborder la deuxième problématique.

3.2 Modélisation et simulation multi-agent

Dans ce qui précède, nous étions essentiellement dans une perspective de synthèse : comment élaborer une structure (mono-agent ou multi-agent) qui produit un comportement désiré. Il est clair que cela suppose des moyens de décrire :

- les structures à élaborer (et nous avons vu que nous ne sommes pas encore au bout de nos peines) ;
- les comportements désirés ;
- l'articulation entre ces deux descriptions.

En simulation multi-agent (ou autre), nous mettons de côté les problèmes méthodologiques de conception pour nous concentrer sur les problèmes de description eux-mêmes. De ce qui précède, il est évident que c'est un passage obligé puisque décrire l'existant n'a pas de raison d'être différent de décrire ce que l'on veut réaliser¹⁶. D'ailleurs l'intelligence artificielle, la vie artificielle et, a fortiori, les systèmes multi-agents sont toujours partis de descriptions de l'existant (être humain, êtres vivants, systèmes collectifs et sociaux), ou plutôt de la compréhension que l'on s'en faisait et que l'on s'en fait, comme source d'inspiration pour réaliser des systèmes artificiels.

Cette activité de recherche est donc l'occasion de faire une parenthèse dans la démarche synthétique et de se poser la question des outils pertinents à la description des systèmes complexes¹⁷ que l'on prétend à la fois comprendre et réaliser.

A l'image de la posture que nous avons choisie pour aborder les agents autonomes, nous allons également nous donner pour aborder la modélisation et simulation multi-agents une posture épistémologique forte qui va guider nos développements et l'ensemble de nos réflexions. De la même façon que nous avons voulu distinguer le point de vue de l'agent du point de vue de l'observateur/concepteur pour ne nous intéresser qu'à la structuration par l'agent de son interaction telle qu'elle est produite et perçue pour son appareillage sensori-moteur, nous n'allons pas nous intéresser à décrire une quelconque réalité mais seulement aux descriptions que nous en faisons. Nous nous plaçons donc résolument dans la perspective de Maturana [Maturana88] dans « the ontology of observing » mais aussi dans « l'arbre de la connaissance » [Maturana95], dans la droite ligne de la posture phénoménologique¹⁸, pour qui il n'y a pas de réalité accessible en soi mais seulement des mondes produits à travers nos expériences. Le corollaire est que chaque domaine d'expérience produit un monde distinct de celui des autres domaines d'expérience¹⁹. Il s'agit donc d'une part de se

¹⁶ Dans mes cours d'intelligence artificielle, j'ai toujours fait le parallèle entre construire un artefact (ingénierie) et construire une explication de l'observable (science) comme procédant de la même démarche.

¹⁷ C'est-à-dire de synthèse d'explications.

¹⁸ La phénoménologie est, en effet, davantage une démarche qu'un dogme philosophique.

¹⁹ A titre d'exemple, le monde dans lequel la terre tourne autour du soleil, produit par le domaine d'expérience de l'astronomie, co-existe fort bien avec notre domaine d'expérience quotidien dans lequel le soleil se lève et se couche (et donc tourne autour de la terre).

donner les moyens de décrire ces mondes, que nous appellerons des points de vue, des théories ou des modèles, et d'autre part de les articuler entre eux car ils sont rarement indépendants dès lors que l'on veut les considérer ensemble. Il n'y a pas autre chose dans l'émergence qu'une façon particulière d'articuler deux points de vue, celui des agents au niveau micro et celui de l'observateur au niveau macro. Il existe d'autres façons d'articuler des points de vue comme la réduction (un point de vue n'est rien d'autre qu'une composition sur un autre point de vue), la survenance ou, plus pragmatiquement, le changement d'échelle (voir [Scaglione96]).

Nous distinguons également entre modélisation et simulation. On entend par modélisation la description d'un certain point de vue ou d'un ensemble de points de vue comprenant à la fois des entités et des processus. On entend par simulation l'application des processus (un certain type de description) sur les entités (un autre type de description) produisant ainsi des déroulements temporels que nous appellerons des comportements. Pour être plus précis, si on produit des comportements dans le but de reproduire certains aspects d'autres comportements observés ou dans le but de les comprendre ou de faire de la prospective, on parlera à proprement dire de simulation, si on produit des comportements dans une gamme de comportements souhaités, on retombe sur ce qui nous avons essayé de faire dans nos autres activités. Ce n'est plus de la simulation mais de la réalisation²⁰.

Cette activité a commencé avec la modélisation de la gestion de crise en situation urbaine utilisant les modèles organisationnels en collaboration avec l'UFR de géographie de l'université de Strasbourg [Weber98]. L'idée était d'utiliser la notion d'organisation pour modéliser les différentes organisations qui sont parties prenantes dans les situations de crise : préfecture, police, inspection sanitaire, entreprises à risque, structures de surveillance, etc.. Elle a continué avec un projet d'étudiant sur la modélisation des comportements de pâturage dans un écosystème sylvo-pastoral afin de simuler l'impact sur la structure paysagère en collaboration avec l'institut de biologie de l'Université de Neuchâtel [Viceic01]. Ce projet a donné lieu au projet FNRS no 2153-63958 qui est en première année de réalisation avec un doctorant accueilli au CIRAD : Cédric Ratzé.

Finalement, elle est au cœur des recherches que je mène au CIRAD dans la perspective de re-spécifier entièrement la plate-forme CORMAS [Bousquet98] pour aborder des problèmes de grande complexité :

- Modélisation de l'interaction entre le socio- et l'éco-système à l'échelle de l'île de la Réunion ;
- Application éventuelle de ce type d'approche sur le Mali ;
- Modélisation des dynamiques de peuplement des espèces dans un projet éventuel sur la biodiversité.

Autant de projets qui sont en cours de montage. La re-spécification de la plate-forme CORMAS se fait dans le cadre d'un groupe de travail du GDR-I3 : « Modélisation et simulation individu-centrée » dont j'assure l'animation (<http://www-lil.univ-littoral.fr/Mimosa/>).

²⁰ Je pense qu'on peut dire que la simulation n'est que la réalisation d'un comportement entretenant un certain rapport d'analogie avec ce que l'on veut simuler.

Nous allons brièvement décrire le projet FNRS en cours tel qu'il a été présenté, avant de traiter de ce qui ne peut être que des perspectives de recherche dans la conclusion.

3.2.1 La simulation multi-agent des écosystèmes sylvo-patoraux

Le but de ce projet est double :

- Le développement d'un système multi-agent intégrant différentes échelles spatio-temporelles et différents types de modèles et capable de simuler des grands systèmes ;
- La modélisation d'un écosystème silvo-pastoral avec trois niveaux d'organisation spatio-temporelle et un certain nombre de modèles hétérogènes.

Il y a une synergie forte entre ces deux aspects, l'activité de modélisation fournissant le cahier des charges du système multi-agent et le système multi-agent étant testé sur un modèle non trivial.

Ce projet fait partie d'une initiative de recherche plus large sur les pâturages boisés à laquelle d'autres projets vont contribuer. Il se déroule dans le cadre du programme de recherche du WSL sur les dynamiques des forêts. Dans le module sur les pâturages boisés les thèmes suivants sont abordés dans d'autres projets : les processus de régénération des arbres, la modélisation spatialement explicite et multi-agent de sites particuliers dans lesquels des pratiques de gestion seront expérimentées.

Les trois niveaux d'organisation ont été initialement pensés aux niveaux de la phytocénose, de l'exploitation (avec les comportements des troupeaux) et du paysage (avec les comportements des exploitants) mais vont finalement se concentrer dans un premier temps de la parcelle à la phytocénose.

3.2.2 Le cahier des charges

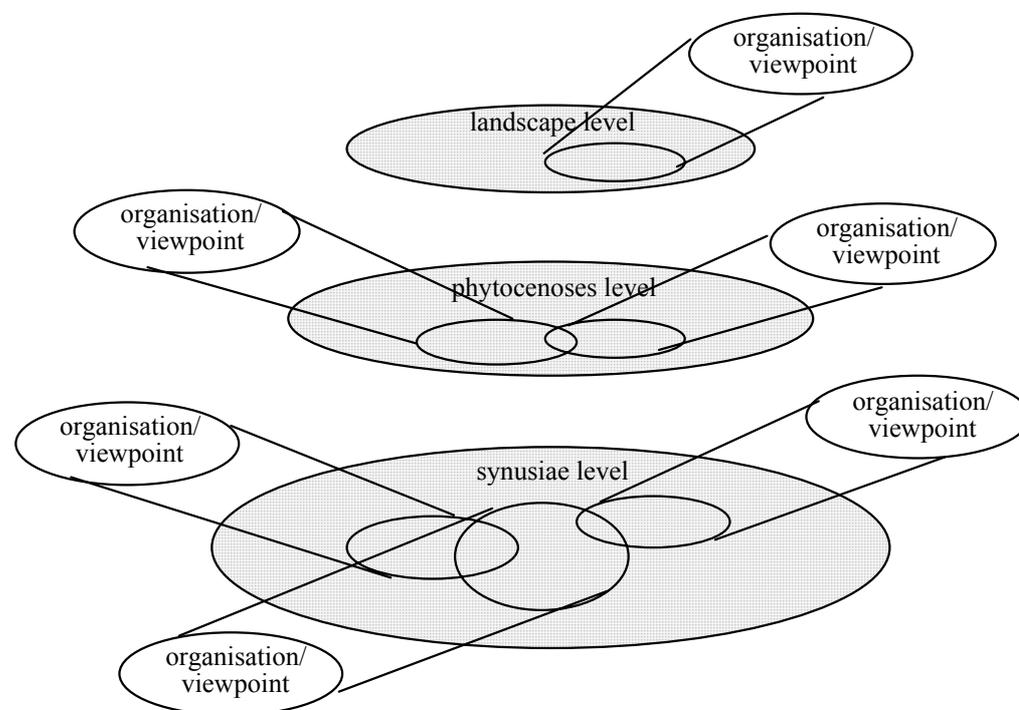
Le cahier des charges suivant peut être déduit des hypothèses ci-dessus:

- Le besoin de simuler les agents agissant à chaque niveau :
 - Les groupes fonctionnels de plantes ;
 - Les synusie (aggrégations de groupes fonctionnels) ;
 - Les phytocénoses (aggrégations de synusies) ;
 - Les troupeaux (individus bougeant et agissant sur la végétation en fonction de leurs besoins et de la structure de l'environnement) ;
 - Les humains (organisation du système de gestion pastorale – enclos, points d'eau, densité des troupeaux, rotations, fertilisation et intervention sur les forêts et l'aménagement).
- Et la nécessité d'intégrer différentes approches:
 - Les modèles à compartiments (équations différentielles) ;
 - Les modèles individus centrés (SMA) ;
 - Le temps discret et continu à différentes échelles ;
 - Différentes échelles spatiales.

Afin de remplir ce cahier des charges, les simulateurs multi-agents actuels ont fourni quelques réponses de façon séparée qui devront être intégrées sur une plate-forme unique. Nous allons décrire les éléments que nous envisageons d'intégrer.

3.2.3 L'intégration multi-points de vue

L'idée est d'utiliser une modélisation organisationnelle (dans la ligne de 3.1.5.3) pour aborder les différentes descriptions à différentes échelles. Le point important est que chaque groupe fonctionnel à chaque niveau d'abstraction peut être décrit par une organisation distincte, avec une structure environnementale de l'environnement distincte à mettre ensuite en correspondance avec les entités concrètes et les agents selon le niveau d'organisation.



Cette structure multi-agent générique soulève un certain nombre de questions sur la granularité temporelle et spatiale ainsi que sur l'intégration multi-modèle.

3.2.4 L'intégration multi-modèle

Les différentes sortes de modèles dépendent souvent de la granularité. On peut distinguer :

- Les modèles individu-centrés où chaque entité est modélisée séparément que ce soit dans le domaine de l'écologie [DeAngelis92] ou la sociologie [Gilbert99]. Les problèmes surgissent lorsqu'il y a trop d'agent à simuler.
- Un niveau plus haut, un individu peut représenter un groupe d'individu avec des caractéristiques uniformes ou une partie uniforme de l'environnement ce qui permet de simuler un grand nombre d'agents à coût moindre [Ballet00].
- Egalement, une nouvelle entité peut émerger des interactions d'un groupe d'individus (par exemple un étang et une ravine à partir de gouttes d'eau [Servat98]) avec des propriétés distinctes des propriétés des individus (comme le volume, la profondeur, le flux).

Quand les individus sont interchangeable (c'est-à-dire que le résultat ne dépend pas de l'identité des individus) ou quand des effets au niveau de la population se produisent, des modèles à compartiments peuvent être utilisés.

Pour combiner différents modèles nous devons les relier de différentes façons:

- Un système multi-agent à un niveau d'abstraction est seulement sensible aux effets populationnels du niveau inférieur (par exemple, les vaches vis-à-vis de la

quantité de nourriture disponible). Dans ce cas, un niveau d'abstraction se comporte comme un environnement pour le niveau suivant.

- Au même niveau d'abstraction, les interactions peuvent être médiées à travers l'environnement ou un groupe d'agents perçu comme un seul individu dans l'interaction avec l'extérieur.

Cela fait partie de l'effort de modélisation de déterminer les niveaux d'abstraction ainsi que la bonne granularité pour être à la fois efficace et réaliste.

3.2.5 Les représentations du temps

Plusieurs types de temps doivent être considérés en simulation :

- Le temps « réel » qui est celui de ce que l'on cherche à simuler ;
- Le temps virtuel qui est celui de la simulation, discret ou continu ;
- Le temps de calcul est le temps nécessaire pour calculer la simulation ;
- Le temps d'observation est le rythme auquel on veut observer le résultat (par exemple, à fin d'animation).

L'intérêt est en général que le temps de calcul soit plus rapide que le temps réel²¹ et idéalement, si on veut regarder la simulation pendant son calcul, au même rythme (ou plus rapide) que le temps d'observation.

Le temps virtuel (celui de la description que l'on s'en fait) peut être discret ou continu :

- Le temps continu est nécessaire quand nous avons affaire à des descriptions physiques ou des processus agrégé à des niveaux supérieurs (par exemple, les dynamique de Lotka-Voltera). Cela signifie que les variables (ou les attributs des objets) deviennent des fonctions du temps ainsi qu'il est fait dans [Magnin96].
- Pour le temps discret, nous devons distinguer entre la simulation synchrone et la simulation événementielle. La simulation synchrone évolue à pas de temps constant alors que la simulation événementielle introduit des durées variables entre deux événements puisque le temps n'avance que jusqu'au prochain événement qui peut être la seconde, l'heure, le jour ou l'année suivant.

La solution semble de permettre à chaque modèle multi-agent de définir son propre temps dépendant du rythme du processus à simuler et au type de modèle sous-jacent. Pour combiner les modèles divers, [Magnin96] propose une façon de combiner le temps continu avec de la simulation événementielle. [Misra86] décrit un certain nombre d'algorithmes pour synchroniser des simulateurs événementiels distribués ; le problème est d'assurer le principe de causalité : le futur ne peut pas influencer le passé et donc un événement ne peut pas être exécuté avant les événements qui le précèdent. Cette dernière approche a été envisagé pour la simulation de la région du Ngalenka dans le nord Sénégal afin de simuler et évaluer la dynamique du changement de la qualité écologique des sols [Fiany98]. Un algorithme très général de synchronisation entre des échéanciers synchrones et à événements discrets a été exploré et implémenté dans un travail d'étudiant [Viceic02].

3.2.6 Les représentations de l'espace

Dans l'introduction du paragraphe 3.2, nous mentionnons que chaque domaine d'expérience définit un monde particulier. Cela peut se particulariser aux agents dont les perceptions et les actions possibles vont définir de quoi leur environnement sera

²¹ Ou le contraire si on veut observer en détail des phénomènes très rapides comme, par exemple, des réactions chimiques.

fait et quelle sera sa structure. Il n'est donc pas nécessaire d'avoir une description détaillée de l'environnement mais juste celle qui est pertinente à l'agent. Par contre, des agents distincts définiront des environnements distincts à coordonner entre eux. En conséquence, pour n'importe quelle description d'organisation, il y a une structure spatiale distincte qui doit être, par la suite, mis en correspondance avec l'espace physique. La plupart du temps on utilise des grilles 2D ou 3D pour diverses raisons :

- La discrétisation des mouvements et la simplification de la perception ;
- La possibilité de coupler avec une dynamique environnementale simulée avec des automates cellulaires.

Cependant, les modèles continus de la dynamique de l'environnement demandent des espaces continus. De plus, certains processus se produisent sur des formes quelconques comme la forme d'une synusie ou d'une phytocénose^o qui peut donc changer continuellement au cours du temps. [LePage99] a introduit ainsi des espaces vectoriels organisés hiérarchiquement dans Cormas.

Etant donné le besoin de représentations spatiales sophistiquées à partir de plusieurs points de vue, à plusieurs niveaux de granularité ainsi que pour la visualisation des résultats, un couplage avec des systèmes d'information géographique (SIG) devra être envisagés. L'intégration d'un simulateur des dynamiques avec un système d'information spatiale a déjà été fait avec succès par des chercheurs de Floride [Sklar91; Sklar94; Fitz96], qui ont développé un environnement modulaire pour la modélisation des écosystèmes, appelé SME (Spatial Modeling Environment), adaptable à la modélisation des écosystèmes sylvo-pastoraux [Fitz, comm. pers.]. La même chose a été faite dans Cormas. Le SIG peut également être utilisé pour stocker l'évolution de l'état de la simulation à des fins de visualisation.

3.2.7 Résumé

De la discussion qui précède, l'objectif du projet est donc de construire un système de simulation dans lequel il est possible de spécifier indépendamment les différents points de vue sur les différents niveaux d'abstraction et leur mise en correspondance sur des systèmes multi-agents et des représentations spatiales concrètes.

Un point de vue ou organisation spécifiera :

- Les rôles et les interactions entre les rôles ;
- Les descriptions de ce qui doit être perçu et ce sur quoi il faut agir ainsi que les échanges de message entre les rôles ;
- La structure de l'environnement qui dépend des capacités de perception et d'action nécessaires aux rôles ;
- La structure temporelle qui pourra être continue, synchrone ou événementielle ainsi que son échelle.

Séparément seront décrites :

- la mise en correspondance de la structure des rôles sur les systèmes multi-agents où chaque agent (ou entité) pourra jouer plusieurs rôles et les rôles pourront être joués par plusieurs agents. Un agent pourra représenter un individu ou un groupe d'individus ;
- la mise en correspondance de la structure de l'environnement sur la représentation concrète du substrat physique qui dépendra du niveau d'abstraction. Cette mise en correspondance impliquera l'intégration à un système d'information géographique et la définitions de couches pour chaque

structure de l'environnement à laquelle les agents seront sensibles. L'avantage d'une telle intégration est la possibilité d'utiliser directement les opérateurs disponibles dans un SIG pour calculer les attributs de la représentation spatiale avec différentes granularités et relations de voisinage ;

- La mise en correspondance d'une structure temporelle avec un échancier distinct. Les échanciers devront être synchronisés entre eux de façon à assurer un écoulement global du temps consistant avec la causalité. Des états globaux instantanés du système pourront être stockés dans le SIG pour la présentation des résultats.

L'ensemble sera validé sur la modélisation d'écosystèmes sylvo-pastoraux. Il reste à décider l'articulation de ce que l'on cherche avec des plate-formes existantes (Swarm, Cormas, MadKit).

3.3 Résumé

Nous avons donc exploré le domaine des systèmes multi-agents à la fois pour la simulation et la conception de systèmes complexes. Les deux directions demandent des moyens de description adéquat :

- En simulation pour décrire les structures d'interactions à différents niveaux d'abstraction ;
- En conception à la fois pour décrire ce que l'on veut obtenir au niveau global et programmer le niveau local d'interactions entre les agents.

L'émergence y joue un rôle particulier car elle permet d'articuler deux niveaux de description :

- En simulation, pour articuler un niveau micro correspondant soit à des processus connus soit à des explications hypothétiques et un niveau macro d'observation des processus globaux dont on cherche à rendre compte ou à exhiber ;
- En conception, pour dériver à partir d'une description au niveau macro du comportement global désiré, une structure d'interactions entre les agents au niveau micro capable de produire le comportement attendu.

Dans les deux cas et à n'importe quel niveau (puisqu'on peut les emboîter autant qu'il est nécessaire), il est nécessaire de disposer d'outils formels ou semi-formels permettant de décrire les agents, l'environnement, les interactions et les structures qui en résultent. Pour cela, nous explorons plus particulièrement les structures organisationnelles en tant qu'elles saisissent les invariants comportementaux individuels et collectifs. Ces structures organisationnelles demandent des descriptions fines des invariants interactionnels et nous avons exploré :

- Les automates de type statechart ;
- Les logiques temporelles dans lesquelles le temps (et l'espace) peut être réifié (logiques du premier ordre) ou implicite (logiques intensionnelles) ;
- Le modèle influence-réaction.

Nous allons mettre ces travaux sur les multi-agents ainsi que ceux sur les agents autonomes en perspective de notre posture épistémologique pour en dériver notre projet de recherche.

3.4 Références

[Amiguet02] M.Amiguet, J.-P.Müller, A.Nagy, Role conflict resolution in organisational systems, Journal AAMAS, submitted

- [Ballet00] Ballet P., De l'intérêt réciproque des systèmes multi-agents et de l'immunologie, Thèse de l'Université de Bretagne Occidentale, janvier 2000
- [BUNGE 77] M. BUNGE, "Emergence and the mind", in *Neuroscience*, 2:501-509, 1977.
- [Chung97] K.T.Chung and C.-H. Wu, Dynamic scheduling with intelligent agents: an application note, Metra application note 105, Metra, Palo Alto CA, 1997.
- [Christos82] Christos H. Papadimitriou and Kenneth Steiglitz, *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*, Prentice Hall, 1982.
- [Daous96a] T.Daouas, K.Ghedira and J.-P.Müller, A distributed approach for the Flow Shop Problem, 3rd International Conf. on AI and Applications, Cairo (Egypt), 1996
- [Daous96b] T.Daouas, Ordonnancement distribué réactif pour un atelier d'assemblage de type flow shop, Thèse de l'Université de Neuchâtel, June 1996
- [DeAngelis92] DeAngelis D.L., Gross L.J (Eds). *Individual-based models and approaches in ecology - Populations, communities and ecosystems*. Chapman & Hall, New-York. 525 p.(1992)
- [Demazeau90] *Decentralized AI*, Y.Demazeau and J.-P. Müller (editors), North-Holland 1990
- [Demazeau95] Demazeau Y. From interactions to collective behaviour in agent-based systems. European conference on cognitive science, Saint-Malo, april 1995.
- [Durand96] Durand B., *Simulation Multi-Agents et Epidémiologie Opérationnelle*, 20 juin 1996, Thèse de l'Université de Caen
- [Ferber00] J.Ferber, O.Gutknecht, C.M.Jonker, J.-P.Müller, J.Treur, *Organization Models and Behavioural requirements specification for multi-agent systems*, MASHO'2000, Berlin, august 2000
- [Ferber95] Ferber J., *Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*, InterEditions, 1995.
- [Ferber96] J. Ferber and J.-P. Müller, Influences and reaction: a Model of Situated Multiagent Systems, Second International Conference on Multi-Agent Systems, Kyoto, 1996
- [Ferber97] J. Ferber, O. Labbani and J.-P. Müller, Formalizing emergent collective behaviours: preliminary report, DAIMAS, St Petersburg, 1997
- [Fiany98] Fiany E., Treuil J.-P., Perrier E., Demazeau Y., Multi-agent Architecture Integrating Heterogeneous Models of Dynamical Processes: the Representation of Time , in *Multi-agent Simulations*, in *Multi-Agent systems and Agent-Based Simulation*, Springer Verlag, LNAI 1534, 1998
- [Fitz96] Fitz H.C., DeBellevue E.B., Costanza R., Boumans R., Maxwell T., Wainger L., Sklar F.H. Development of a general ecosystem model for a range of scales and ecosystems. *Ecol. Model.* 88 (1-3): 263-297 (1996)
- [Ghedira93] K. Ghedira, MASC: une approche multi-agents des problèmes de satisfaction de contraintes, juin 1993, Ecole Nationale Supérieure de l'Aeronautique et de l'Espace, Thèse
- [Gilbert95] N. Gilbert, Emergence in social simulation, in *Artificial Societies*, N.Gilbert and R.Conte Eds., UCL Press, 1985
- [Gilbert99] Gilbert N. & K.G.Troitzsch, *Simulation for the social scientist*, Open University Press, 1999
- [Gutknecht01] O. Gutknecht, Proposition d'un modèle organisationnel générique de systèmes multi-agents et examen de ses conséquences formelles, implémentatoires et méthodologiques, Université Montpellier II, Septembre 2001, Thèse
- [Gutknecht98] O. Gutknecht and J. Ferber, A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems, in *ICMAS'98*, IEEE Computer society, pp.128-135, 1998
- [Hilaire00] V. Hilaire, Vers une approche de spécification, de prototypage et de vérification de systèmes multi-agents, décembre 2000, Université de Belfort-Montbéliard, Thèse
- [Hilaire98] V.Hilaire and A.Koukam, AgentCharts: an executable specification for situated multi-agent system, submitted to ATAL'98, Paris, 1998
- [Jean97] M.R. Jean (collective name), Emergence et SMA, Journées Francophones IAD et SMA, Nice, 1997

- [Labbani96] O. Labbani, J.-P. Müller and A. Bourjault, Designing emergent behaviour, Workshop ICMAS'96, Kyoto, 1996
- [Labbani97] O. Labbani, J.-P. Müller and A. Bourjault, Conception de comportements collectifs: l'étape d'analyse, Journées Francophones IAD et SMA, Nice, 1997
- [Labbani98a] O. Labbani, Contribution à une méthodologie de conception de comportements collectifs émergents dans une colonie de robots miniatures et autonomes, PhD thesis, Besançon, January 1998
- [Labbani98b] O. Labbani and J.P.Müller, Cirta: An emergentist methodology to design and evaluate collective behaviours in robots' colonies, CRW'98, Paris, Juillet 1998
- [LePage99] LePage C, Lardon S., Bommel P., Baron C., Bousquet F., Entités spatiales génériques et modèles de simulation multi-agent, in Ingénierie des systèmes multi-agents, M.-P. Gleizes et P. Marcenac Eds, Hermès, 1999, pp. 341-342
- [Madkit] <http://www.madkit.org/>
- [Magnin96] Magnin L., Simulation pour les robots footballeurs, Thèse de l'Université de Paris VI, novembre 1996
- [Misra86] Misra J. Distributed discrete-event simulation. Computing surveys, 18(1):39-65, March 1986
- [Müller01] J.-P.Müller, M.Amiguët, J.Baez, A.Nagy, La plate-forme MOCA: réification de la notion d'organisation au-dessus de MadKit, JFIADSMA'01, Montreal, novembre 2001, Hermès, pp. 307-310.
- [Müller02] J.-P.Müller, M.Amiguët, J.Baez, A.Nagy, The MOCA platform : simulating the dynamics of social networks, MABS'02, Bologne, july 2002.
- [Müller96] J.-P. Müller and P. Pecchiari, A model of situated autonomous agents: application to automated deduction, Second International Conference on Multi-Agent Systems, Kyoto, 1996.
- [Müller97] J.-P.Müller and C.Weber, Spécification d'un système multi-agent réactif pour la catégorisation d'image: SMARTI, IIUN internal report 10/97, 1997
- [Müller98a] J.-P.Müller & V.D.Parunak, Multi-Agent Systems and Manufacturing, IFAC/INCOM'98, Nancy, juin 1998
- [Müller98b] J.-P.Müller, Méthodologie de conception de systèmes multi-agents de résolution de problèmes par émergence, JFIADSMA'98, Hermès, novembre 1998
- [Overgaard94] L.Overgaard, H.G.Petersen and J.W.Perram, Motion planning for an articulated robot: a multi-agent approach, in Proceedings of MAAMAW'94, Springer Verlag, 1994.
- [Scaglione96] M.Scaglione, L'intentionnalité et les modèles artificiels. Emergence et réalisation: deux côtés de la même pièce, Thèse de l'Université de Neuchâtel, Sept. 1996
- [Servat98] Servat D., Perrier E., Treuil J.-P., Drogoul A., When agents emerge from agents: introducing multi-scale viewpoints, in Multi-agent Simulations, in Multi-Agent systems and Agent-Based Simulation, Springer Verlag, LNAI 1534, 1998
- [Sklar91] Sklar F.H., Costanza R. The development of dynamic spatial models for landscape ecology. In: Turner M.G., Gardner R. (Eds.) Quantitative methods in landscape ecology. Springer, New-York. pp. 239-288 (1991)
- [Sklar94] Sklar F.H., Gopu K.K., Maxwell T., Costanza R. Spatially explicit and implicit dynamic simulations of wetland processes. In: Mitsch W.J. (Eds.) Global Wetlands: Old World and New. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. pp. 537-554 (1994)
- [Sprumont97a] F.Sprumont, Approche distribuée et réactive de la conception des systèmes d'assemblage, Thèse de l'Université de Neuchâtel, May 1997
- [Sprumont97b] F.Sprumont and J.-P.Müller, AMACIOA: a Multi-Agent System for Designing Flexible Assembly Lines, in Applied Artificial Intelligence, Vol. 11, no. 6, september 1997
- [Viceic01] P. Viceic, Modélisation d'un système sylvo-pastoral à l'aide de l'environnement de simulation multi-agent, Université de Neuchâtel, travail de semestre, juin 2001.

[Weber98] Ch.Weber & J.-P. Müller, Pollution accidentelle et gestion de crise de pollution d'eau en milieu urbain : vers une simulation multi-agents, SMAGET'98, Clermont-Ferrand, octobre 1998

[Yoo02] M.-J. Yoo et J.-P. Müller, Using Multi-Agent System for Dynamic Job Shop Scheduling, ECEIS, avril 2002

4 Notre projet de recherche

Dans notre travail sur les agents autonomes, nous sommes partis du problème de la construction d'une architecture de contrôle engendrant un comportement donné pour finalement nous poser la question de la constitution d'une compréhension du monde. Nous avons d'emblée, dans la ligne de l'époché husserlienne ou du travail de Merleau-Ponty sur la structure des comportements, mis ce monde tel qu'il apparaît au concepteur entre parenthèses pour explorer l'appropriation des invariants d'interaction entre l'agent et son environnement par l'agent lui-même. Ces invariants ne sont donc ni dans le monde (position réaliste) ni dans l'agent (position idéaliste) mais à la fois conséquences et sources des comportements de l'agent. Les perspectives sont d'une part la structuration à la fois représentationnelle et sensori-motrice de l'agent et d'autre part la constitution d'une extériorité. Nous avons déjà indiqué que nous faisons l'hypothèse que l'interaction avec d'autres agents était fondationnelle de cette extériorité. A noter que cette structuration nécessite un point de départ qui peut être soit une « tabula rasa » ce qui est souvent supposé en apprentissage, soit un comportement déjà présent qu'il s'agit de maintenir dans des circonstances changeantes, provoquant ainsi une restructuration et possiblement une sophistication de la structure de contrôle. Nous n'avons pas l'intention de poursuivre cette ligne de recherche dans l'avenir immédiat, en tout cas pas avant d'avoir parcouru une bonne partie de l'autre ligne de recherche avec lequel nous allons expliciter le lien.

Dans notre travail sur les systèmes multi-agents, nous sommes parti du problème de la synthèse d'un système multi-agent produisant un comportement global désiré à partir d'interactions locales entre les agents pour finalement nous poser la question, en simulation multi-agent, de la description de points de vue multiples et de leur coordination. L'émergence est une des approches de la coordination d'un point de vue local relativement à un point de vue global. De la même façon que dans la ligne de recherche précédente, nous ne supposons pas l'existence d'un monde en soi auquel les représentations du modélisateur se réfèreraient, ce qui supposerait l'existence d'un modèle ultime dont les productions actuelles ne seraient que des pauvres fragments. Partant de l'hypothèse que les différents points de vue que ce soit des thématiciens, des acteurs ou des agents simulés sont produits à travers leurs modalités d'être au monde (le Dasein de Heidegger), il s'agit non plus d'en comprendre la genèse mais d'en comprendre la structure pour donner les moyens d'expression adéquats. Cette réflexion très large est à la base de la conception d'un environnement de modélisation et de simulation générique qui servira à valider nos hypothèses sur, nous le souhaitons, de nombreux exemples. Les éco-systèmes sylvo-pastoraux seront parmi nos premiers exemples, ainsi que la modélisation de l'interaction entre le socio- et l'éco-système, à l'échelle de l'île de La Réunion.

Nous espérons que cette réflexion qui touche à la représentation des connaissances au sens large nous permettra de mieux comprendre ce dont nous reprendrons peut-être un jour l'étude formelle de la genèse²². Les systèmes multi-agents auront un rôle à y

²² Nous disons "formelle" car, en tout cas informellement, nous essayons d'en constituer une vision globalisante dans la ligne des travaux de M. Leroy-Gourhan et de ce que nous appelons, « l'école de Compiègne » avec des personnes comme J. Stewart, B. Stiegler et Ch. Lenay.

jouer dans la mesure où nous étions, sur les agents autonomes, à la recherche de dynamiques structurelles qui servaient de substrat à l'auto-organisation de la structure de contrôle donc à la fois des représentations et des boucles sensori-motrices. Or les systèmes multi-agents constituent, à l'évidence, un bon moyen de penser ces dynamiques structurelles. Ceci nous incite encore davantage à pousser le problème de leur description formelle ou semi-formelle.

En dehors de la perspective de la production expérimentale des structures descriptives, une idée de leur genèse est néanmoins nécessaire pour déconstruire la référence à un monde, un espace ou un temps en soi et fournir des possibilités d'expression plus appropriées. Parmi celles-ci, nous citons les pistes suivantes :

- La notion d'entité vue, non pas comme un objet en soi mais comme l'articulation de mesures, essentiellement relationnelles, et de possibilités de transformations à la fois des mesures attribuées à l'entité et des mesures attribuées aux relations entre entités. La composition d'une entité résulterait d'une articulation particulière entre un point de vue pour lequel l'entité est perçue comme un tout et un point de vue décrivant ses composants. En effet, ces points de vue correspondent à des comportements (des relations au monde) fondamentalement différents (comme la personne conduisant une voiture (l'entité voiture comme un tout) et le mécanicien qui la répare (l'entité comme un composé) et donc deux pratiques incommensurables).
- L'espace est souvent vu comme support des entités donc muni d'une existence autonome. Or il est souvent plus direct de penser un lieu comme le lieu d'une entité (le lieu de travail, la ville, la région, etc.) et la relation entre lieux comme issue des relations entre entités (la maison d'à côté). Ainsi toute structure relationnelle entre entités constitue un espace de fait. Le problème vient alors de coordonner ces différents espaces pour constituer éventuellement un espace inter-subjectif, à des fins de représentation, sous forme d'un ensemble particulier d'entités, indexées par des n-uplets de nombres, qui deviennent ainsi les lieux d'espaces euclidiens.
- Le temps peut subir la même ligne de raisonnement, particulièrement pour penser le processus même de la simulation. En effet, plutôt que d'avoir les instants ou les intervalles, comme des « lieux » d'évènements (changement des mesures), respectivement d'états (état des mesures), on aurait le temps produit par la succession même (réelle ou simulée) des évènements ou des états. Se pose alors le problème de la coordination des différents temps engendrés par autant de dynamiques distinctes, y compris avec une dynamique particulière qui produit des dates.

Ces réflexions ont déjà été menées en tout ou en partie, que ce soit en représentation des connaissances (le projet Cyc de D.Lenat, les représentations du temps, de l'espace, des processus chez Allen, Ginsberg, ainsi que les nombreuses réflexions des modélisateurs eux-mêmes) mais n'ont jamais abouti sur un véritable cadre générique :

- soit par l'utilisation exclusive de la logique (Cyc et intelligence artificielle anglo-saxonne en générale) qui est un formalisme très peu structuré ;
- soit par l'omni-présence d'un espace et d'un temps en soi ce qui pose problème, par exemple, dans la représentation de l'évolution de points de vue multiples dans les SIG ;
- soit, plus généralement, par une distinction, probablement mal venue, entre raisonnement et calcul en ce qui concerne les dynamiques ;

- et une vision un peu étroite du statut de l'objet dans les langages orientés-objets dont, par ailleurs, le lien avec les représentations centrées-objets (dans la ligne des « frame » de Minsky) n'a pas encore été pleinement exploré.

Notre objectif est donc d'explorer la possibilité de conduire cette posture épistémologique à fond et surtout de l'opérationnaliser à travers une plate-forme générique de représentation des connaissances et de simulation capable de représenter des points de vue multiples (qu'ils correspondent à des espaces, des temps et/ou des niveaux d'organisations différents) et de les coordonner. Il s'agit donc d'un outil, non pas pour construire un modèle intégré (pensée ?) unique mais pour faire dialoguer la diversité des connaissances que nous, scientifiques ou acteurs de terrain, construisons dans nos domaines respectifs d'expérience. Comme nous l'avons déjà dit plus haut, nous re-penserons peut-être plus tard à l'exploration expérimentale de leurs genèses.

En ce qui concerne les applications possibles d'une telle plate-forme générique de représentation des connaissances et de simulation, et dans le cadre de notre nouvelle affectation, nous nous situons dans une démarche d'accompagnement aux processus collectifs de compréhension et de décision. Nous allons décliner successivement ces deux objets, par ailleurs profondément liés, des processus collectifs :

- En ce qui concerne la compréhension, nous avons à faire à des acteurs multiples, y compris des experts, ayant chacun leur domaine d'expérience et donc leur appréhension particulière de la réalité. Une approche multi-point de vue permet de faire s'exprimer ces différents points de vue indépendamment les uns des autres pour élaborer ensuite à partir de ces points de vue, une représentation partagée. Le processus collectif de compréhension devient alors un processus de construction d'un nouveau point de vue partagé et qui a toutes les chances d'être plus que l'intersection des points de vue particuliers et sera en tout cas moins que l'union, ce qui produirait une véritable « usine à gaz ». Afin de conforter une méthodologie d'acquisition et de construction des connaissances associée à cette démarche, une analyse socio-anthropologique de la co-construction des sens et des savoirs sera fort utile.
- En ce qui concerne la décision, il nous faut à nouveau invoquer la notion d'émergence. En effet, l'action conjointe des acteurs produit un phénomène global dont les acteurs individuels peuvent avoir plus ou moins conscience. Il faut en effet distinguer le retour (« feedback ») du phénomène global dans la conscience des acteurs (l'émergence cognitive de Cristiano Castelfranchi) qui souvent conforte leurs anticipations et donc leurs décisions, de l'impact « réel » du phénomène global. C'est pourquoi la simulation en général et, en particulier, la simulation multi-agent dans laquelle les actions individuelles des acteurs peuvent être représentées, permet de produire et d'exhiber les phénomènes globaux possibles et donc de co-construire une conscience partagée qu'aucun point de vue particulier ne pourrait produire. Il s'agit donc de transformer une émergence faible en émergence forte ce qui est, de notre point de vue, l'essence des dynamiques sociales. C'est ensuite au groupe d'intégrer cette nouvelle information partagée dans leur processus de décision. La simulation multi-agent peut donc jouer un rôle prépondérant dans une démarche d'« ingénierie sociale » qui nous paraît première à toute démarche d'ingénierie des territoires et de gestion intégrée des ressources.

Dans ces deux perspectives, la modélisation et la simulation jouent le rôle d'objet intermédiaire et plus précisément de médiateur sémiotique qui a pour effet de

construire une compréhension partagée et, possiblement, de changer les comportements. Ceci pose la question du rôle des médiations, et en particulier des médiations techniques utilisant les technologies dites de l'information et de la communication, dans une analyse anthropologique de la production des savoirs et des dynamiques sociales dans la lignée de Vygotsky. Nous espérons également, à travers nos recherches, contribuer à cette analyse.

5 Remerciements

Il me reste à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagnées tout le long de ces années et sans lesquelles rien n'aurait pu se faire.

D'abord mes collègues, Pierre-Jean Erard et Hans-Heinrich Nägeli et, à travers eux, l'Université de Neuchâtel, qui m'ont offert pendant 14 ans le meilleur environnement possible notamment en me déchargeant d'une bonne partie des charges administratives et d'enseignement pour pouvoir me consacrer à la recherche. C'est grâce à eux que j'ai pu faire que l'Université de Neuchâtel devienne finalement trop petite. Ce qui me permet de remercier le CIRAD de m'avoir accueilli, et particulièrement les membres de l'équipe modélisation des systèmes complexes : Christophe Le Page, François Bousquet (à distance), Pierre Bommel, Martine Antona, Stefano Farolfi, Serge Guillobez. Avec eux, j'ai le sentiment d'avoir intégré une véritable équipe.

Je voudrais particulièrement remercier Khaled Ghedira qui, dans une période difficile pour lui, est venu à Neuchâtel comme Maître-assistant pour lancer les activités sur les systèmes multi-agents et l'optimisation.

Je n'aurais rien pu faire sans les doctorants :

- passés : Yoel Gat, Miguel Rodriguez, Thouraya Daouas, Miriam Scaglione, François Sprumont, Yassine Faihe ;
- en co-encadrement : Ouiddad Labbani, Vincent Hilaire, Sylvain Sauvage ;
- en cours : Antoine Berner, Matthieu Amiguet, Adina Nagy, Cédric Ratzé ;

qui se sont succédés et ont essayé de me comprendre autant que j'espère avoir essayé de les comprendre. C'est aussi grâce à eux que j'ai appris mon métier et que je l'apprends encore et toujours. Je suis heureux d'avoir conservé avec la plupart d'entre eux des liens d'amitié.

Les idées ne viennent jamais de soi mais seulement de l'interaction avec des personnes capables de les susciter et je ne pourrai jamais faire la liste exhaustive de tous ceux sans lesquels je n'aurais pas fait tout cela. Qu'ils m'excusent par avance de ne pouvoir tous les citer nominativement, tellement ils sont nombreux, mais j'aimerais citer particulièrement les personnes de l'équipe MAGMA à Grenoble, de l'UTC à Compiègne, du GREYC à Caen, de l'IRIT à Toulouse, de l'IRD à Bondy, du LIP6 à Paris, de tous ceux qui ont participé et participent encore au groupe de travail COLLINE et au groupe de travail « Modélisation et simulation individu-centrés ». Si ce que je fais ne rend pas suffisamment justice de ce qu'ils m'ont apporté, j'en suis, par contre, le seul responsable.

Finalement, on ne pourrait rien faire sans le soutien de ses proches. Ils ont toujours cru en moi et sans la confiance, on ne va pas loin. Je remercie donc du fond du cœur mes parents et ma compagne pour leur amour et leur confiance. J'aimerais aussi remercier mon ex-épouse qui a subi pendant dix ans mes très nombreux déplacements à la rencontre de nouvelles idées.