

Action Spécifique Humain virtuel : vers un
humain synthétique temps-réel aussi vrai que
nature

Thème 5 : Comportements humains individuels et
collectifs

Jean-Marie Burkhardt, Stéphane Donikian, Yves Duthen,
Olivier Hégué, Domitile Lourdeaux, Thierry Morineau,
Marc Parenthoën, Cédric Sanza, Jacques Tisseau

Table des matières

1	Introduction	11
2	Quelques clarifications/définitions	13
2.1	Modèle(s)	13
2.2	Modélisation et Comportement (en psychologie)	14
2.3	Objectifs associés à la modélisation	16
2.3.1	Pour le développeur dans le domaine de l'animation	16
2.3.2	Pour le psychologue et l'ergonome	17
2.3.3	Pour le chercheur en intelligence artificielle	18
3	Modèles psychologiques du comportement humain	19
3.1	Introduction	19
3.2	L'humain : un être en continuelle interaction avec son environnement	20
3.3	La théorie du contrôle	22
3.4	La mémoire	25
3.4.1	Introduction	25
3.4.2	Mémoire implicite et explicite	27
3.5	Théorie de l'activité et coordination attentive	28
3.6	La cognition incarnée située	30
3.7	Approche écologique de la perception	33
3.8	Centralisme vs. parallélisme	34
3.9	La psychologie sociale	35
3.10	Navigation et cognition spatiale	37
3.10.1	Introduction	37
3.10.2	La navigation	37
3.10.3	Repérages égocentriques et allocentriques	38
3.10.4	Les représentations mentales sous-jacentes	39
3.10.5	Distorsion des représentations mentales	40
3.10.6	Planification de chemin	41
3.11	Comportement du conducteur de véhicule	41
3.12	Comportement du piéton	44
3.12.1	La locomotion	44
3.12.2	Comportement de foules	46
3.13	Conclusion	47

4	Modélisation des comportements d'humanoïdes autonomes	49
4.1	Introduction	49
4.2	Modèles cognitifs	50
4.2.1	Introduction	50
4.2.2	Quelques dimensions des modèles cognitifs	50
4.3	Les architectures cognitives	53
4.3.1	Introduction	53
4.3.2	Les architectures fondées sur la logique formelle	53
4.3.3	Modèles fondés sur l'idée de mémoire associative	61
4.3.4	Modèles fondés sur la modularité	63
4.3.5	Systèmes multi-agent	64
4.3.6	Modèles fondés sur l'automatisme	69
4.3.7	Conclusion	70
4.4	Animation comportementale	71
4.4.1	Introduction	71
4.4.2	Les premiers travaux	71
4.4.3	HPTS : un outil de spécification de comportements réactifs	73
4.4.4	Mécanismes de sélection de l'action	75
4.4.5	Approches cognitives	79
4.4.6	Les environnements informés	81
4.4.7	Cartes cognitives spatiales	83
4.4.8	Animation de foules	87
4.5	Conclusion	91
5	L'approche écologique pour la modélisation d'acteurs virtuels	93
5.1	Introduction	93
5.1.1	Positionnement de la psychologie écologique	94
5.1.2	Organisation du chapitre	95
5.2	Perception directe et affordances	95
5.2.1	Les affordances de l'ergonomie cognitive	95
5.2.2	Modèles d'acteur autonome d'après la perception directe	97
5.3	Perception active et simulations	98
5.3.1	Prédiction sensorimotrice en neurophysiologie	98
5.3.2	Modèles d'entités autonomes d'après la perception active	101
5.4	Paradigme écologique pour humains virtuels	102
5.5	Conclusion	104
6	Entités autonomes artificielles à base de LCS	107
6.1	Introduction	107
6.2	Etat de l'art	108
6.2.1	Les systèmes de classifieurs de type LCS	108
6.2.2	ZCS : système de classifieurs niveau zéro	110
6.2.3	XCS : Système de classifieurs basé sur la prédiction du paiement	112
6.2.4	ACS : systèmes de classifieurs pour l'anticipation	115
6.2.5	MCS : systèmes de classifieurs multiples	116
6.2.6	Synthèse	117

6.3	Apprentissage et évolution à travers un jeu de football virtuel	117
6.3.1	Le système α CS	117
6.3.2	L'application NeViS : Networked Virtual Soccer	120
6.3.3	Résultats	122
6.4	Stratégies de groupes dans un environnement dynamique	124
6.4.1	Introduction	124
6.4.2	Le modèle comportemental	124
6.4.3	Le système MDCS (Multiple Data Classifier System)	125
6.4.4	Interaction entre Le MDCS et les attracteurs	127
6.4.5	La simulation	127
6.4.6	Les résultats	127
6.5	Conclusion	129
7	Conclusion	131

Table des figures

2.1	La cognition humaine en tant que Système de Traitement de l'Information (exemple adapté de [107])	15
3.1	Les différentes boucles de rétro-action.	21
3.2	Les quatre niveaux de complexité dans les comportements selon Mallot [182].	22
3.3	La nature hiérarchique des activités de contrôle.	24
3.4	Le modèle modal de la mémoire.	25
3.5	La mémoire de travail selon Baddeley.	26
3.6	Relations médiatisées d'artefacts au sein d'activités.	29
3.7	Le triangle sémiotique de Steels et sa correspondance Peircienne . . .	32
3.8	Le PAE, ou triple moi.	36
3.9	Les transactions possibles.	36
3.10	Repères allocentrique et égocentrique.	38
3.11	Représentation mentale hiérarchique pour la navigation [331].	42
3.12	Un modèle hiérarchique de risque pour les participants au trafic routier	43
3.13	La zone de sécurité selon Goffman.	46
4.1	L'architecture EPIC (Executive-Process/Interactive Control) d'après [147]	57
4.2	Architecture d'ACT-R.	59
4.3	La structure d'un agent PECS.	67
4.4	Un état d'HPTS.	74
4.5	Les différents statuts d'un état.	74
4.6	Exemple de fonction d'intégration sous forme de diagrammes-blocs. .	75
4.7	Mécanismes de sélection de l'action	76
4.8	Comportement de déplacement d'un objet.	78
4.9	Coordination de plusieurs comportements.	78
4.10	Architecture générale de BCOOL.	80
4.11	Structuration hiérarchique de l'environnement au sein de la carte cognitive spatiale.	84
4.12	Evolution de la carte cognitive d'un agent au cours d'une navigation. .	85
4.13	La carte cognitive spatiale comme filtre dynamique de la carte topographique.	86
4.14	Navigation d'un piéton dans la ville.	86
4.15	Flux de piétons à base de particules [121].	88

4.16	Les trois règles de base de Reynolds : séparation, alignement, cohésion [253].	88
4.17	Cône de vision limité et animation de foules au sein du projet MAGS [206].	89
4.18	Un exemple de trajectoire suivie par un piéton dans le modèle 3d de la ville de Rennes.	90
4.19	Navigation intérieure et extérieure.	91
5.1	Les deux modalités de contrôle du mouvement par le cerveau [81] . . .	99
6.1	Système de classifieurs de type LCS	109
6.2	Structure d'un ZCS	111
6.3	Modèle d'anticipation du comportement	116
6.4	L'environnement NeViS	121
6.5	Schéma d'ensemble du modèle	125
6.6	évolution de la fitness pour deux joueurs d'une même équipe	128
6.7	nombre cumulé de situations de blocage	129

Liste des tableaux

3.1	Types de mémoire.	28
3.2	Types de représentation.	39
4.1	Activation des différents comportements au cours du temps.	79

Chapitre 1

Introduction

La modélisation du comportement humain est abordée dans et par différentes disciplines comme la psychologie, l'ergonomie, la neurophysiologie, l'intelligence artificielle, l'économie, etc. Il est central en Psychologie, où le comportement humain constitue l'objet, sinon d'étude, du moins au travers duquel l'activité mentale est possiblement atteignable selon les critères de la science. Il est aussi important en ergonomie -en particulier cognitive- pour guider la conception et l'évaluation des technologies et des situations de travail (par exemple Perandio et Wolff 2003 [131]). Il n'en est pas moins également important dans une certaine approche de l'intelligence artificielle, soit pour fournir une spécification ou une analogie exploitable par l'automatique et l'informatique pour résoudre des problèmes complexes, soit pour fournir des techniques permettant la simulation et la confrontation aux données recueillies par la Psychologie.

L'objectif de ce document est de proposer au lecteur une synthèse des grandes lignes/dimensions qui structurent ce domaine de la modélisation psychologique et informatique du comportement humain. La psychologie, l'ergonomie et l'intelligence artificielle sont, en effet, parmi les disciplines à avoir noué des liens et échangé sur cette question de longues dates (par exemple Newell et Simon [211]; Bonnet, Hoc et Tiberghien [50]; etc. . .). De plus, nous traitons essentiellement des modèles du sujet individuel comprenant une composante " cognitive", ou s'appuyant pour le moins explicitement sur des données mettant en évidence le fonctionnement d'une telle composante. Compte tenu de l'ampleur du domaine, nous ne visons clairement pas l'exhaustivité. C'est pourquoi nous ne traitons pas de façon réellement séparée les modèles psychologiques et les modèles informatiques.

L'organisation du document est la suivante. Après une première partie introductive concernant la modélisation du comportement et quelques définitions ou clarifications, ce texte présente un certain nombre de modèles, du point de vue de leur fondation empirique, d'une part, et les propriétés des architectures utilisées pour la simulation, d'autre part.

Chapitre 2

Quelques clarifications/définitions

2.1 Modèle(s)

Un modèle est initialement une " maquette, réduction, reproduction d'un objet sous une forme simplifiée pour être soumis à des mesures, des calculs, des tests physiques qui ne pourraient être appliqués commodément à l'objet lui-même (...) " (Encyclopédia Universalis, p 121 ; cité par [167]). Par une extension récente, est aussi considéré comme un modèle toute " figurations ou reproductions qui servent les buts de la connaissance " (Encyclopédia Universalis, p 121 ; cité par [167]).

Trois éléments nous apparaissent important à souligner, au delà du détail de cette définition.

Un modèle est d'abord une simplification : modéliser consiste à retenir seulement certaines caractéristiques " pertinentes " de l'objet ou de la situation figurée, et rend explicite certaines des propriétés et relations reliant ces caractéristiques. Le fait qu'un modèle ne soit pas " complet " n'est par conséquent pas une critique recevable ; à l'inverse, la question cruciale concerne le choix des sous-ensembles de caractéristiques représentées et non représentées.

Tout modèle est exprimé au moyen d'une notation plus ou moins formelle, en d'autres termes un code. Par exemple, il peut s'agir d'une expression mathématique, d'un graphe, de diagrammes, de boites et de flèches, voire une collection de descriptions littéraires. Plus généralement pour tout objet considéré et son modèle, n'importe quelle notation ou formalisme de représentation peut a priori être utilisée. Il en découle, entre autres conséquences, que l'objet ne partage pas les propriétés ni n'est réputé avoir la même nature que le formalisme de notation exploité pour le figurer, quelle que soit la discipline d'emprunt et l'épistémologie dudit formalisme. Ainsi, utiliser une expression mathématique pour décrire le raisonnement ne présuppose ainsi pas que le raisonnement soit mathématique. De même, l'usage de représentation des connaissances sous forme de réseaux de neurones ou de règles de production ne présuppose pas l'existence concrète de telles structures dans la tête du sujet humain. Certes, certains formalismes

ont probablement des relations plus étroites que d'autres avec l'objet modélisé : il peut s'agir d'une analogie ou alors de propriétés véritablement communes.

Enfin, un modèle est un outil. Il est conçu pour servir à quelqu'un, de façon à faire quelque chose. Un modèle n'est donc pas absolu ni unique. Au contraire, il y a une infinie variété de modèles potentiels pour un seul objet donné. L'usage et le type d'utilisateur influencent les critères et les objectifs concrets à atteindre en termes de modélisation. Il existe certes des catégorisations génériques de modèles, selon l'objectif qui est visé ; par exemple :

- les modèles structurels/analytiques décrivent les composants et les interrelations entre ces composants ;
- les modèles fonctionnels décrivent les rôles associés à chaque composant et ce sur quoi porte l'action de chaque composant ;
- les modèles téléologiques décrivent les finalités de chaque composant, les conditions nécessaires à l'accomplissement des buts, ainsi que les valeurs entre lesquelles se situent les conditions de fonctionnement correct ;
- les modèles comportementaux décrivent la façon dont l'objet se comporte, l'ordre d'activation des composants et les comportements de ceux ci, comment ils réagissent à certains facteurs, comment ils interagissent entre eux et quels effets ils produisent.

2.2 Modélisation et Comportement (en psychologie)

Le comportement est une " manière d'être et d'agir des Animaux et des Hommes, manifestation objective de leur activité globale " (d'après Piéron, 1907 ; cité in Grand Larousse de la Psychologie). Un synonyme est la conduite. Ainsi, pour le psychologue, le comportement est un ensemble de phénomènes observables, qu'il faut distinguer des activités mentales (e.g. raisonnement) ou encore des variables internes au sujet (e.g. motivation). La démarche consiste ensuite à inférer le fonctionnement interne du sujet à partir de son comportement.

Le domaine de la modélisation du comportement humain est par conséquent varié, vaste, et multi-paradigmatique. Vaste et varié, d'une part, par les aspects et la granularité des " objets " qui sont modélisés, depuis des processus perceptifs ou cognitifs élémentaires jusqu'à la résolution de problèmes riches et complexes (tels que le diagnostic médical, l'apprentissage de l'informatique, la conduite de hauts-fourneaux etc.), depuis le sujet individuel jusqu'au fonctionnement des groupes et des organisations. Vaste et varié, d'autre part, par les cadres théoriques et les formalismes utilisés. Vaste et varié, enfin, par les objectifs propres à chaque perspective disciplinaire, et les finalités éventuelles en termes de développement.

On distingue couramment deux domaines dans la modélisation selon qu'elle porte sur des processus mentaux de niveau sub-symbolique ou symbolique. Sans que cela puisse être exactement confondu avec la dichotomie précédente, on peut aussi distinguer entre, d'une part, les modélisations orientées plutôt vers la physiologie ou la biologie des fonctions et des structures mentales et, d'autre part, les modélisations orientées vers les processus cognitifs associés au raisonnement, au langage et à la manipulation d'information symbolique . Paillard [220] oppose deux épistémologies principales

dans les sciences étudiant le comportement : d'un côté, la Psychologie de la Cognition dont le fondement relève essentiellement d'une " causalité linéaire " et, de l'autre côté, la Neurophysiologie du mouvement associée majoritairement à la construction d'une " causalité circulaire ".

En Psychologie, en effet, l'approche majoritaire analyse le comportement du sujet humain en assimilant ce dernier à un Système de Traitement de l'information (Figure 2.1) selon un paradigme d'étude établissant une causalité linéaire entre les propriétés d'une situation ou d'un stimulus et les réponses observées (S->R). Il s'agit d'une approche fonctionnelle, dans la mesure où l'on cherche à rendre compte de l'activité mentale de façon indépendante du substrat neurophysiologique. Les comportements sont étudiés dans le contexte de tâches donnant lieu à une activité symbolique, laquelle est vue essentiellement comme un calcul rationnel (la rationalité considérée peut être limitée, par exemple par les connaissances ou les informations dont dispose le Sujet).

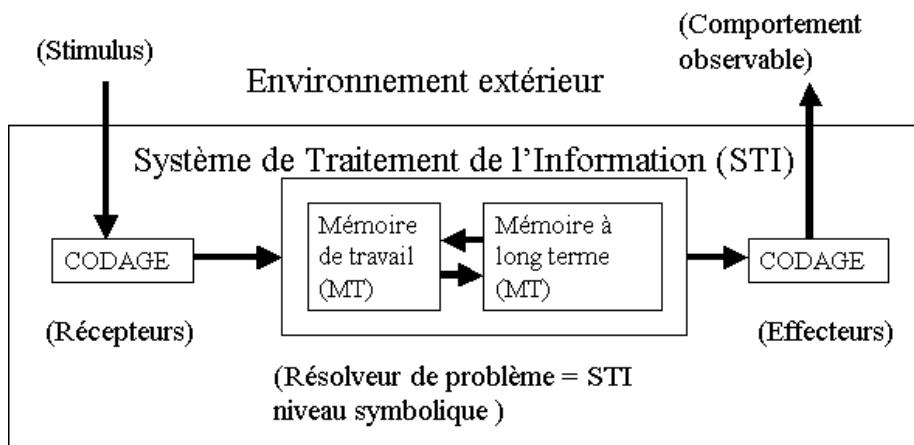


FIG. 2.1 – La cognition humaine en tant que Système de Traitement de l'Information (exemple adapté de [107])

De façon différente, en Neurophysiologie du mouvement, le comportement est abordé sous l'angle du geste et du contrôle moteur selon un paradigme " causalité circulaire " établissant les liens et dépendances entre les différents systèmes et sous systèmes du mouvement. Le comportement est abordé selon trois aspects privilégiés d'étude que sont les postures, les attitudes et le mouvement. L'approche est fortement liée au substrat neurophysiologique et à la modélisation des différentes boucles de régulation et niveaux de contrôle. A l'inverse, le versant cognitif de ces activités est peu étudié / intégré dans les modèles et les situations expérimentales du domaine si ce n'est à travers les différences liées à la variable " expertise " souvent invoquée dans les travaux du domaine. Parmi les exceptions notables, citons justement les travaux de Paillard [220]. Enfin, de façon plus importante que dans les approches cognitives du comportement, la dimension émotionnelle est intégrée dans la modélisation.

Les modèles du comportement se répartissent entre deux pôles extrêmes. A une

extrémité, on trouve des modèles élémentaires se concentrant sur une relation fonction/objet élémentaire dans une situation très spécifique, et qui sont généralement assez prédictifs [167]. A l'autre extrémité, on trouve des modèles plus larges de l'activité qui constituent généralement en fait " de simples analogies ayant pour fonction essentielle de caractériser une situation, de proposer un cadre d'étude, une manière de traiter un problème ". Quels que soient l'approche et l'angle disciplinaire privilégiés, il est utile de distinguer, parmi ces modèles, ceux qui portent sur les résultats ou la performance et ceux qui portent sur le processus amenant à ces résultats. L'existence d'un modèle donné, même validé empiriquement, à un certain moment, ne devrait pas aboutir à figer l'analyse psychologique des comportements. Comme le souligne Leplat (2003, p 21), " la réussite à une même tâche peut être obtenue par des activités équivalentes sous l'angle de cette réussite (vicariance). (. . .) A l'adaptabilité de l'activité doit donc correspondre l'adaptabilité des modèles et la connaissance des conditions de passage d'un modèle à l'autre. "

Dans le cas où la modélisation informatique se place explicitement dans le champs de (et pour) la psychologie, il doit être clair que toute implantation informatique ne peut être considérée sans précaution comme un modèle. Ainsi, " les programmes informatiques simulant un traitement cognitif selon une architecture donnée à base de règles, de cas ou encore de réseaux de neurones formels, par exemple, ne sont pas forcément des modèles, mais ils peuvent l'être s'ils les implémentent réellement point par point. De même, tout ajustement, même très étroit, d'une fonction mathématique (probabiliste par exemple) à des données comportementales n'est pas forcément un modèle comportemental " [278].

Pour finir, il nous semble utile de souligner que, en particulier dans un contexte pluridisciplinaire, des modèles différents peuvent être considérés comme autant de manières d'aborder et de caractériser un comportement, une situation. L'articulation entre ces différents modèles est un enjeu à la fois pratique et scientifique majeur pour les recherches à venir.

2.3 Objectifs associés à la modélisation

La question de la simulation du comportement humain, et en particulier dans sa composante de mouvement en 3D, est considérée récemment de façon importante par les développements en Réalité virtuelle. Selon la discipline et le contexte dans lequel l'élaboration puis l'utilisation du modèle sont situées, des objectifs différents.

De façon certes caricaturale, il nous semble néanmoins utile de distinguer entre trois grandes familles d'objectifs en regard de trois enjeux disciplinaires distincts.

2.3.1 Pour le développeur dans le domaine de l'animation

Le but essentiel associé à l'utilisation de modèles du comportement, pour le développeur, est de pouvoir programmer directement un but ou un comportement abstrait, plutôt que de devoir spécifier la succession d'actions ou d'états correspondante ([198], p 47) : " le développeur cherche par exemple à donner un ordre concret à son personnage de synthèse " gare toi derrière la pendule de la gare ". Cet ordre induit un

comportement, qui se traduit par des actions physiques (le déplacement d'une voiture) " .

Il s'ensuit des critères propres à cette perspective, pour évaluer la puissance, et l'intérêt des modèles. Un " bon " modèle permet d'engendrer, l'objectif étant décrit plutôt que la séquence d'actions, une succession d'actions conduisant à l'atteinte du but, i.e. la voiture est garée. Le " modèle " a rempli sa tâche en permettant de " programmer " un certain type de comportement, de façon plus ou moins " abstraite ", et en laissant une autonomie plus ou moins grande au personnage de synthèse. Le modèle peut aussi être considéré comme d'autant plus satisfaisant que le comportement obtenu serait jugé " subjectivement " comme " réaliste " ou naturel par un observateur externe de la scène (sans préjuger du paradigme d'évaluation utilisé pour évaluer cette dimension naturelle [139]).

2.3.2 Pour le psychologue et l'ergonome

Le chercheur intéressé par la psychologie du comportement ou les sciences du mouvement ne se satisfera généralement pas des seuls critères de puissance et " programmabilité " du modèle. En effet, l'élaboration d'un modèle psychologique a 3 types de finalités [20], et par conséquent des critères supplémentaires sont à prendre en compte pour la simulation du comportement :

Décrire. Un modèle peut être utile afin de décrire un objet en insistant sur certains aspects (Sperandio 2003). Dans le contexte de l'ergonomie de conception, par exemple, le(s) modèle(s) vise(nt) à mettre en avant les dimensions ou caractéristiques importantes pour une bonne adaptation de l'artefact au comportement de la population des futurs utilisateurs.

Expliquer. Le modèle vise à expliquer pourquoi les choses se passent d'une certaine façon, dès lors qu'il existe au moins une alternative. L'explication est dépendante des théories et des paradigmes privilégiés par l'analyste ou le chercheur. Lorsqu'il s'agit de l'Homme - ou de l'Animal - on peut dégager trois grandes postures qui placent l'explication de façon préférentielle au niveau (a) des caractéristiques de l'environnement extérieur, (b) des propriétés internes au sujet, ou (c) l'interaction entre des propriétés internes du Sujet et externes liées à l'environnement.

Prédire. La finalité est, à travers l'animation du modèle, d'anticiper " correctement " i.e. de façon mesurable et valide les comportements ou changement d'état de l'objet modélisé. La prédiction peut elle-même avoir des objectifs variés, allant de la validation empirique du modèle sur le plan des connaissances scientifiques, à l'évaluation de certains aspects des facteurs humains en amont de la conception, grâce au prototypage virtuel par exemple.

L'utilisabilité des programmes permettant la modélisation et la simulation est, dans ce contexte, un enjeu pour un développement dans les recherches psychologiques. L'utilisabilité, aujourd'hui loin d'être acquise, est un axe important pour améliorer et continuer à développer la recherche, comme l'argumente une synthèse récente [85].

2.3.3 Pour le chercheur en intelligence artificielle

L'un des grands courants de l'Intelligence Artificielle (IA) consiste à " développer des techniques dans le but de rendre compte de certains phénomènes observés par les psychologues (Kayser, 1992).

Il ne s'agit pas de la seule approche possible. Des objectifs d'efficacité quant à la résolution d'un problème, voire d'optimisation dans les implantations choisies peuvent être considérés comme premiers (voir e.g. la discussion dans Kayser (1992). Dans ces deux cas, la " plausibilité " psychologique des modèles proposés n'est plus forcément recherchée. Une perspective complémentaire associant Psychologie, Ergonomie et IA consiste à s'intéresser aux modèles psychologiques et informatiques du comportement dans le but d'améliorer la puissance de simulation des premiers, en même temps que la validité écologique et l'utilisabilité des seconds. Dans le domaine de la Réalité Virtuelle, cette approche a donné lieu à des travaux récents, centrés sur les techniques de génération de comportements (Pew and Mavor, 1998 ; SEMB 1998) ou centrés sur l'intégration et l'utilisabilité de la simulation informatique des modèles cognitifs (Ritter, Shadbolt, Elliman, Young, Gobet and Baxter, 2001).

Chapitre 3

Modèles psychologiques du comportement humain

3.1 Introduction

Si l'on s'intéresse au comportement humain, il est nécessaire de s'intéresser à un certain nombre de sujets tels que la compréhension des mécanismes sous-tendant les fonctionnements du langage (production et perception), de la mémoire, de la perception, du contrôle musculaire ou encore des émotions. En résumé, il faut s'intéresser au fonctionnement des différentes facultés qui constituent ensemble l'esprit humain, sans oublier leur relation avec le corps. En complément de l'étude de ces mécanismes généraux sous-tendant tout comportement humain, des travaux portent aussi sur l'étude des facultés humaines dans des circonstances beaucoup plus circonscrites telles que lors de l'exercice d'un métier ou d'une activité comme, par exemple, la conduite automobile, activité partagée par un grand nombre de personnes. Il existe plusieurs courants en ce qui concerne l'étude du comportement humain : le premier, très systémique, consiste à partir des travaux menés par les sciences neuronales et à regarder ainsi à l'intérieur de l'activité cérébrale de patients soumis à des stimuli divers, selon des protocoles opératoires bien définis. Les techniques utilisées sont l'imagerie cérébrale : PET (Positron-Emission Tomography), fMRI (Functional Magnetic Neuro Imaging) ou encore la mesure de l'activité électrique : ERP (Event Related Potentials) [233] ; le second, plus symbolique, consiste à modéliser le comportement humain de manière plus abstraite sous la forme de modules, éventuellement structurés hiérarchiquement, décrivant chacun un mécanisme et des relations de séquentialité ou de parallélisme existant entre eux [27]. Nous avons été plus intéressé par la seconde approche, à la fois par sa vision plus macroscopique et par sa proximité d'une architecture de type composants logiciels. En effet, notre problématique n'est pas de reproduire l'intelligence humaine mais de proposer une architecture permettant de modéliser des comportements crédibles d'acteurs virtuels anthropomorphes évoluant en temps réel dans des mondes virtuels. Ces derniers peuvent représenter des situations particulières étudiées par des psychologues du comportement ou encore correspondre à un univers imaginaire décrit par un scénariste.

L'étude bibliographique que nous présentons montre la diversité, voire l'antagonisme, des approches et l'absence de modèles fédérateurs. Nous avons donc été amené à faire des choix, discutables et complètement personnels, quant à l'assemblage de théories et de modèles différents et incomplets.

3.2 L'humain : un être en continuelle interaction avec son environnement

La compréhension des comportements humains nécessite des compétences dans des domaines aussi variés que les neurosciences, la psychologie ou la biologie comportementale. Dans les théories sur les fonctions cérébrales et sur le comportement, deux types d'approches peuvent être distinguées. La première que nous appelons approche symbolique cherche à décrire les processus mentaux sous la forme de symboles, de jugements et de mécanismes d'inférence logique. La seconde, que nous dénommons approche systémique, se focalise plus sur des notions de transmission de signal dans des réseaux, de contrôle et de retour d'état. Les deux approches ont des avantages différents : la première permet de s'abstraire des processus biophysiques présents au sein du cerveau et de proposer une modélisation du comportement basée sur les compétences, tandis que la seconde approche plus proche des données neurophysiologiques sera plus adaptée à la modélisation des activités neuronales. Les deux approches peuvent être utilisées pour la modélisation de l'ensemble des fonctions cérébrales. Nous allons essayer dans cette section de rendre compte d'un certain nombre de résultats issus des travaux de recherche des psychologues du comportement, principalement au sein de l'approche symbolique, dans le but de pouvoir définir ce que pourrait être un modèle crédible du comportement d'humanoïdes synthétiques.

Von Uexküll [323] a défini l'environnement comme la partie du monde extérieur avec laquelle un organisme peut naturellement interagir. L'organisme humain est en interaction constante avec son environnement par le biais de capteurs et d'effecteurs, comme l'illustre la figure 3.1 [183]. Il existe plusieurs types de retour des effecteurs vers les capteurs :

1. l'homéostasie : boucle de régulation interne de l'organisme correspondant au maintien des paramètres biologiques face aux variations du milieu ambiant ;
2. le comportement d'acquisition : partie du comportement utilisée pour améliorer la perception ;
3. les interactions avec l'environnement : boucle de retour la plus importante.

Dans un premier temps, de façon simplificatrice et abstraite, considérons l'être humain comme composé de capacités de perception, de traitement, d'action et de mémorisation. Il s'agit d'une vision simplificatrice mais néanmoins illustrative de l'architecture comportementale de l'être humain. En effet, l'être humain est de toute évidence doté d'une part de capacités de perception extéroceptives, lui permettant d'appréhender à travers ses cinq sens le monde extérieur et d'autre part de capacités proprioceptives lui permettant d'être à l'écoute de son propre corps en prenant en compte des sensations telles que la faim, la soif, ou encore la fatigue. Il est aussi doté de capacités de décision

3.2. L'HUMAIN : UN ÊTRE EN CONTINUELLE INTERACTION AVEC SON ENVIRONNEMENT 21

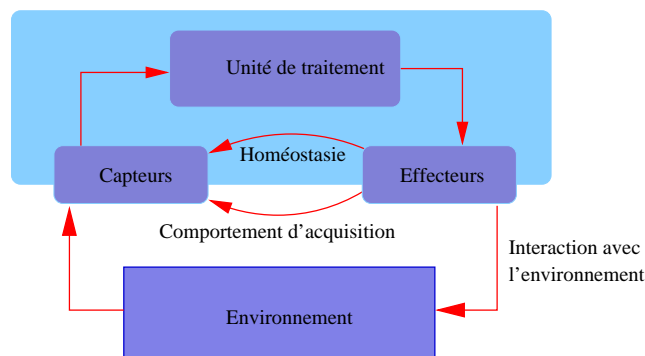


FIG. 3.1 – Les différentes boucles de rétro-action.

en faisant appel aux données perçues mais aussi à ses connaissances et à ses facultés de raisonnement. Enfin, il est à même d'agir sur lui-même et sur son environnement.

H. Mallot [182] classe les comportements humains en différents niveaux de complexité et en illustre quatre (cf figure 3.2) :

- Le premier niveau représente des comportements réflexes de type attraction, répulsion et peut être défini simplement par une interconnexion entre des capteurs et des effecteurs ;
- Le niveau suivant représente des comportements qui nécessitent une intégration interneuronale sur des couches cachées et qui permet de décrire des comportements de type manœuvre, nécessitant une intégration spatio-temporelle ;
- Le troisième niveau traite de la plasticité de l'intégration spatio-temporelle, mais ce comportement d'apprentissage reste complètement déterminé par l'état des données sensorielles ;
- Le quatrième niveau, appelé cognitif, ne dépend plus seulement des stimuli sensoriels, mais aussi d'un but courant poursuivi par la personne.

En psychologie comportementale, les deux écoles les plus fréquemment référencées sont :

l'école américaine qui s'intéresse aux processus cognitifs comme le raisonnement symbolique, et plus particulièrement aux représentations mentales qui leurs sont associées ;

l'école allemande qui étudie plus particulièrement la volonté et la formation de la volonté.

D'après H. Mallot [183], le mot *cognition* se réfère généralement à des processus mentaux variés tels que l'attention, la reconnaissance des lieux et des objets, la planification et le raisonnement. Traditionnellement, l'étude de ces processus se fait en se focalisant sur les états mentaux et leurs représentations plutôt que sur des critères comportementaux. H. Mallot constate que la plupart des fonctions cérébrales servent à organiser le comportement d'un organisme vis-à-vis de son environnement. À partir de ce constat, il définit une théorie de la cognition qu'il nomme théorie de la cognition orientée comportement. Cette théorie diffère de l'approche purement biologique

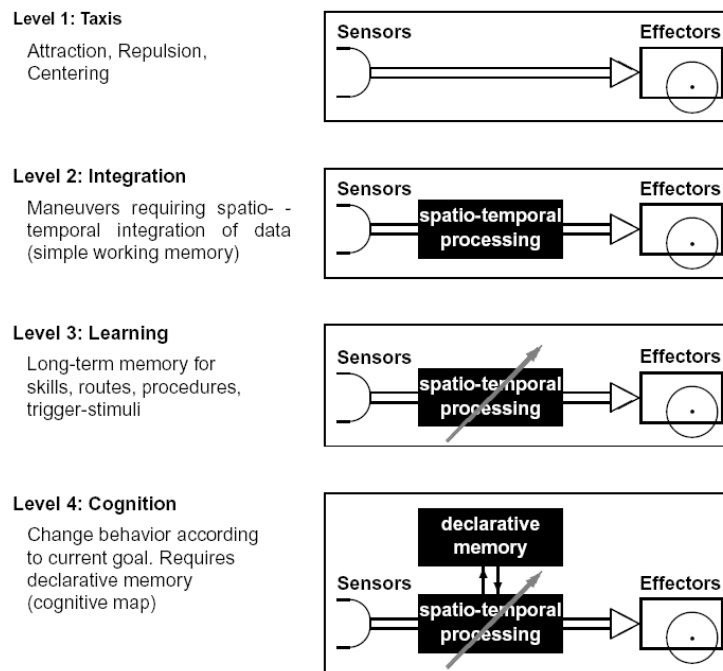


FIG. 3.2 – Les quatre niveaux de complexité dans les comportements selon Mallot [182].

de stimulus-réponse parce qu'elle reconnaît l'existence de représentations mentales. Cette théorie tente de répondre aux deux questions suivantes :

1. Quels sont le mécanisme et la représentation les plus simples requis pour expliquer un comportement observé ?
2. Quel est le comportement le plus simple qui requiert un type donné de représentation mentale ?

Le comportement qui repose sur les représentations mentales est très proche des vues classiques de neuro-éthologie développées pour des comportements simples. Cependant il a été montré que des comportements apparemment complexes comme la navigation ou l'orientation visuelle peuvent s'expliquer de façon simple en termes de stimulus-réponse, ce qui souligne l'importance de la première question.

3.3 La théorie du contrôle

La théorie du contrôle provient directement des biologistes qui ont étudié les comportements des êtres vivants dans des situations d'asservissement. Les notions de régulation et de contrôle proviennent de celles développées dans les théories proposées

par l'automatique. Le concept de base en est l'asservissement qui signifie que lorsque le comportement (i.e. la sortie) d'un système (ici d'un organisme) est quelque peu différent de celui (i.e. celle) désiré, le système (ici l'organisme) va modifier l'action (i.e. l'entrée), déclenchant ce comportement (i.e. la sortie), via un système de contre-réaction de la sortie sur l'entrée, de manière à minimiser cet écart. D'une manière plus générale, l'existence d'une boucle de rétroaction de la sortie du système sur son entrée permet, dans certaines conditions bien étudiées dans le cas de systèmes artificiels traités par l'automatique, le contrôle et la régulation des comportements de ce système. La théorie du contrôle en psychologie comportementale, telle que la décrivent R. Lord et P. Levy [169] reprend le principe des boucles de rétro-action, tout en l'étendant à l'ensemble des processus comportementaux de la tâche d'asservissement à la régulation des comportements sociaux. Pour Lord et Levy, la généralité des boucles de rétro-action pour la description du comportement provient de la nature hiérarchique des systèmes de contrôle, même si la nature des activités de contrôle peut être très différente en fonction des niveaux : par exemple, au niveau le plus haut, on traitera de planification d'action, tandis qu'au niveau le plus bas, il s'agira, par exemple, d'une boucle d'asservissement d'un muscle ou d'un ensemble de muscles.

Le point commun entre tous ces niveaux réside dans la comparaison entre un état perçu et un état attendu et dans le maintien de l'erreur dans des limites acceptables. L'organisation hiérarchique des systèmes de contrôle de l'organisme comprend différents niveaux. Il existe beaucoup de travaux sur l'identification de ces niveaux [169, 241]. Dans l'ensemble, ils donnent une classification à deux axes : l'abscisse donne le niveau de complexité, tandis que l'ordonnée représente l'unité de temps. Par exemple, Frese et Zapf [98] ont proposé un modèle hiérarchique impliquant quatre niveaux de régulation : heuristique, intellectuel, motif d'actions flexibles et sensori-moteur. Dans *Unified theories of cognition*, A. Newell [210] présente un résumé de ces travaux en regroupant certains niveaux de la hiérarchie en domaines (biologique, cognitif, rationnel et social). Il affirme que l'architecture cognitive humaine est constituée d'une hiérarchie de systèmes de contrôle stables et bien que ces niveaux soient liés par transport d'information, ils opèrent indépendamment les uns des autres, sans avoir de connaissances détaillées sur le fonctionnement interne des autres niveaux (cf figure 3.3). La décomposition proposée par A. Newell est intéressante puisqu'elle fournit à la fois les niveaux de complexité du comportement et les échelles de temps nécessaires à chaque processus.

Le problème soulevé par Lord et Levy [169] et relativement peu abordé par ailleurs, est celui de la transition qu'il y a à effectuer entre le raisonnement symbolique, communément appelé la *pensée* et les systèmes sensori-moteurs gérant l'action dans le monde réel. Les travaux de Lord et Levy sont fondés sur l'hypothèse émise par A. Newell [210], qui suggère que les processus symboliques n'ont lieu que localement, sur des petits problèmes dont l'espace de représentation a une durée de vie limitée. Les interactions entre les processus symboliques et les processus sous-symboliques se font dans ce qu'on appelle la mémoire de travail, par opposition à la mémoire dite à long terme qui contient l'ensemble des informations dont dispose l'être humain¹. La mémoire de travail sert donc de base d'échanges entre les processus symboliques et les processus

¹Nous reviendrons par la suite sur les modèles de mémoire.

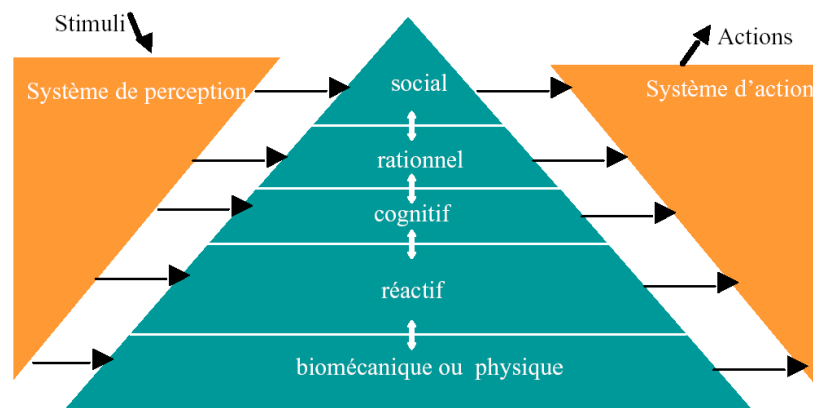


FIG. 3.3 – La nature hiérarchique des activités de contrôle.

de plus bas niveau. Selon Lord et Levy, résoudre la transition entre pensée et action, consiste à expliquer l'insertion et la maintenance de l'information dans la mémoire de travail. Les actions dépendent de règles de type condition-action stockées dans la mémoire à long terme, tandis que la mémoire de travail est vue comme une zone qui contient essentiellement des liens vers la mémoire à long terme. Pour J. Kuhl [156], le traitement des tâches doit être protégé des interruptions, surtout si les tâches sont complexes, d'où l'importance des mécanismes inhibiteurs qui empêchent ce qui n'est pas réellement utilisé de pénétrer dans la mémoire de travail. Le contrôle est effectivement hiérarchique selon une approche descendante, mais aussi ascendante dans les situations exceptionnelles (c'est-à-dire des situations où les informations perçues sont contradictoires avec la poursuite d'une des actions courantes). Lord et Lévy [169] émettent l'hypothèse que le contrôle des processus humains est produit par une interaction réciproque entre deux mécanismes « *top-down* » et « *bottom-up* » que nous nommerons respectivement descendant et ascendant. Le contrôle descendant est conceptuel et est très fortement lié aux intentions courantes et aux plans établis tandis que le contrôle ascendant est plus guidé par les données, relayant ainsi les informations fournies par le système perceptif pour reconnaître les discordances. Lord et Lévy postulent qu'il existe un mécanisme de la volonté qui, afin de protéger un comportement en cours des interruptions, va inhiber directement tous les comportements compétiteurs. Ils émettent plusieurs propositions :

Proposition 1 : l'instanciation d'un but va privilégier l'information catégoriellement proche :

- (a) en augmentant la vitesse à laquelle on peut accéder à cette information ;
- (b) en augmentant l'envie d'accéder à une telle information.

Proposition 2 : l'activation d'un but va supprimer l'instanciation de buts compétiteurs :

- (a) en augmentant la latence de leur activation ;
- (b) en réduisant l'envie d'accéder à de telles informations ;
- (c) en produisant des effets primaires négatifs.

Proposition 3 : la réalisation normale d'un but désactive les structures référentes, en libérant le système cognitif des effets positifs et négatifs.

Proposition 4 : l'échec répété d'un but peut désactiver les structures référentes, en libérant le système cognitif des effets positifs et négatifs.

Proposition 5 : le suivi et la détection automatiques de discordances est un mécanisme de contrôle ascendant important qui intègre des besoins biologiques ainsi que des traitements au niveau symbolique.

En conclusion, pour Lord et Lévy, la régulation ascendante est un complément nécessaire du mécanisme de contrôle descendant, assurant ainsi que le système cognitif notera et répondra correctement aux demandes physiologiques et psychologiques. Cependant, la détection de discordances au niveau structurel correspondant à la gestion des tâches ne doit pas créer trop de surcharge cognitive au niveau structurel correspondant au raisonnement symbolique. Par contre, les discordances sont capables d'interrompre la pensée pour rediriger l'attention et sont génératrices de nouveaux modèles aptes à les surmonter.

3.4 La mémoire

3.4.1 Introduction

Une des premières théories générales de la mémoire est le modèle modal de mémoire proposé par Atkinson et Shiffrin en 1968 [18]. Pour eux, la mémoire est constituée de plusieurs étages (cf figure 3.4) et il n'y a pas une mais trois sortes de mémoires : les registres sensoriels, la mémoire à court terme et la mémoire à long terme. Les registres sensoriels correspondent aux cinq sens : toucher, goût, odorat, vue et ouïe. La mémoire à court terme est éphémère et réduite dans le temps tandis que la mémoire à long terme est plus ou moins permanente et a une capacité potentielle très importante.

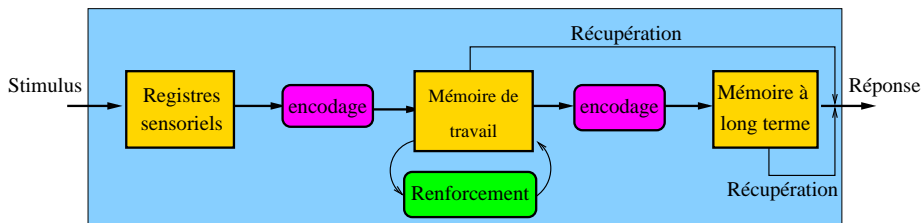


FIG. 3.4 – Le modèle modal de la mémoire.

Baddeley et Hitch [23] montrent que la mémoire à court terme est activement engagée dans les processus cognitifs et qu'elle ne doit pas être considérée comme ayant un rôle secondaire de porte de passage, mais comme une mémoire de travail active stockant et manipulant de l'information pour des tâches cognitives complexes. La figure 3.5 présente l'architecture de la mémoire de travail vue par Baddeley [21]. Les deux systèmes de stockage au sein du modèle (boucle phonologique et bloc visuo-spatial) sont vus comme des systèmes esclaves chargés du stockage temporaire d'informations

visuelles et spatiales. Le processeur central est l'élément le plus important de cette architecture [22]. Il est en charge du mécanisme attentionnel de sélection d'action décrit par Shallice [266].

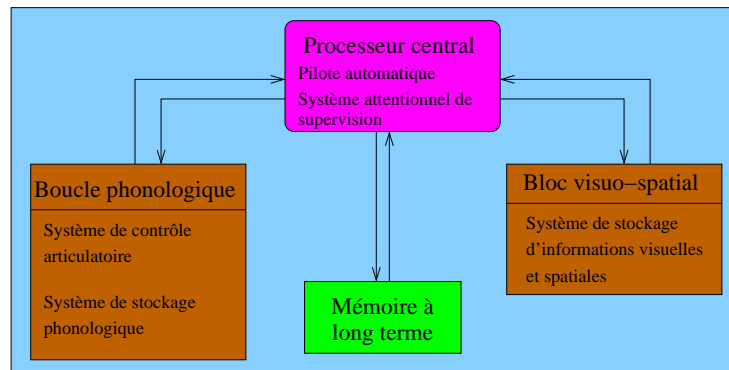


FIG. 3.5 – La mémoire de travail selon Baddeley.

Shallice [266] a proposé deux types de mécanismes attentionnels pour la sélection des actions : le « système attentionnel de supervision » (*Supervisory Attentional System*) et le « pilote automatique » (*Contention Scheduling*).

Ce système de « pilotage automatique » intervient pour sélectionner de manière automatique les actions à effectuer lorsque la situation est routinière. L'exemple typique est celui de la conduite automobile : une fois la période d'apprentissage effectuée, le conducteur peut changer de vitesse tout en discutant avec ses passagers ou en écoutant la radio. Par exemple, dans la conduite automobile, du moins après la période d'apprentissage, la sélection des différentes actions s'effectue le plus généralement de manière automatique. Le sujet peut effectuer un changement de vitesse, qui implique une manipulation simultanée de la pédale d'embrayage et du levier de vitesse, tout en conversant avec ses passagers, écoutant la radio ou encore pensant à programmer ses activités du week-end. Lorsque le sujet est confronté à une situation nouvelle ou lorsque des paramètres d'une situation routinière changent, le « pilote automatique » ne peut plus intervenir, puisqu'il ne peut sélectionner lui-même les actions adéquates. Dans ce cas, c'est le système attentionnel de supervision qui contraint les choix effectués par le « pilote automatique ». Le système attentionnel de supervision est un système avec une capacité limitée, utilisé pour une variété de desseins, incluant :

- des tâches impliquant de la planification et de la prise de décision ;
- des situations troublées dans lesquelles le processus automatique de réaction apparaît en difficulté ;
- des situations nouvelles ;
- des situations techniquement difficiles ou dangereuses.

D'autres théories postulent au contraire qu'il y a unicité de la mémoire et que les différences ne résident pas dans la séparation physique mais dans la multiplicité des modes de représentation utilisés pour penser ou percevoir sur des événements lorsqu'ils se produisent [88].

Squire et al. [279] distinguent deux types de mémoire à long terme : la mémoire procédurale et la mémoire déclarative². La mémoire déclarative correspond à la notion de *savoir que* et consiste en le stockage de connaissances sur le monde au sein d'un réseau de connections, tandis que la mémoire procédurale représente le *savoir comment* et stocke des connaissances sur comment faire les choses. La connaissance déclarative est factuelle par nature et peut être représentée par des propositions tandis que la connaissance procédurale concerne des opérations mentales ou comportementales et peut être représentée par un système de production de règles de type condition-action. Il est en outre postulé que la connaissance déclarative est disponible pour l'introspection consciente tandis que la connaissance procédurale est inconsciente. Ce qui est conscient, c'est seulement les percepts, images, pensées qui viennent à l'esprit quand la connaissance procédurale inconsciente opère sur la connaissance déclarative elle-même inconsciente.

3.4.2 Mémoire implicite et explicite

Une distinction est introduite par certains auteurs entre la mémoire dite explicite et la mémoire dite implicite. La mémoire explicite fait référence au souvenir conscient d'événements passés, révélés par un mécanisme de rappel et de reconnaissance, tandis que la mémoire implicite fait simplement référence aux résultats de l'expérience, de la pensée ou de l'action d'une personne qui sont attribuables à un événement passé, indépendamment du souvenir conscient de cet événement. Kihlstrom [149] énumère différentes expériences, notamment liées à l'amnésie, qui tendent à corroborer l'existence parallèle et indépendante de ces deux sortes de mémoire.

Les théories les plus populaires en neurosciences cognitives sont celles qui postulent que les mémoires explicite et implicite sont complètement dissociées. Tulving et Schacter [307] ont ainsi proposé que la mémoire implicite est fondée sur plusieurs systèmes de représentation perceptuels localisés dans différentes parties du cortex et qui stockent des représentations spécifiques à la modalité concernée, mais pas le sens du stimulus. Squire et al. [280] postulent quant à eux que la mémoire explicite est localisée dans et à proximité de l'*hippocampe*. A l'inverse, d'autres théories postulent que ces deux mémoires explicite et implicite ne sont que deux types de requêtes à un même système mémoriel unique [184].

Une autre distinction est introduite entre mémoire directe et indirecte décrivant ainsi le fait que les items étudiés sont présents ou non au moment de l'accès à la mémoire. Ainsi les mécanismes de rappel et de reconnaissance sont forcément explicites et directs car ils nécessitent de la part du sujet un mécanisme de rappel conscient d'items étudiés précédemment. La table 3.1 présente les typologies de mémoires selon Kihlstrom [149].

²Le modèle ACT-R présenté en 4.3.2 est fondé sur cette séparation.

<i>Mémoire</i>	<i>explicite</i>	<i>implicite</i>
<i>directe</i>	rappel reconnaissance	complétion d'un radical complétion à partir de fragments
<i>indirecte</i>	inhibition proactive inhibition rétroactive	association libre génération de catégories

TAB. 3.1 – Types de mémoire.

3.5 Théorie de l'activité et coordination attentive

Selon W.J. Clancey [59], la théorie de l'activité est une forme antérieure de la cognition située. Les trois niveaux de la théorie de l'activité sont :

- l'activité (motivations) : les forces agissant sur la prise de décision ;
- l'action (buts) : ce qui doit être fait ;
- l'opération (conditions) : comment cela doit être effectué.

L'activité est un engagement construit socialement, situé dans un monde réel, prenant du temps, nécessitant des efforts et l'application de connaissances. L'activité a des bornes temporelles bien définies (début et fin) mais pas de buts au sens des modèles de type résolution de problèmes. Un certain nombre d'activités intellectuelles ne sont pas organisées par un mécanisme de délibération (plan-but). A l'inverse, l'attention est régulée par des relations dynamiques de perception, réflexion et déplacements. Pour comprendre l'activité il faut prendre en compte l'aspect fondamentalement social de l'action humaine. Notre activité en tant qu'être humain est toujours forgée, contrainte et est rendue signifiante par nos interactions continues avec les mondes du travail, de la famille et d'autres communautés auxquelles nous appartenons. Une activité est ainsi non seulement une chose que nous faisons, mais une manière d'interagir. M. Sierhuis [269] définit l'activité de la manière suivante :

Une activité est une collection d'actions réalisées par un individu, construite socialement, située dans un monde physique, prenant du temps, demandant des efforts et nécessitant l'application de connaissances. Une activité possède des début et fin bien déterminés, mais peut être interrompue.

L'activité est indissociable des outils et des objets utilisés. M. Sierhuis utilise la notion d'artefact qui introduit la notion de transformation de l'objet par l'homme. L'étymologie du mot artefact, artis factum, « fait de l'art », rappelle qu'il s'agit d'un phénomène artificiel, souvent dû à l'intervention de l'expérimentateur. L'artefact peut être défini comme un objet ayant subi une transformation même minime par l'homme et se distinguant ainsi de tout objet dont la modification serait due à un phénomène naturel. M. Sierhuis définit un artefact comme étant un objet physique du monde. Toute personne utilise et crée des artefacts dans à peu près toutes les activités dans lesquelles elle est engagée. C'est l'usage d'un artefact dans l'activité (son rôle), qui le transforme en outil ou produit de l'activité. La figure 3.6 présente les différentes relations qui existent entre les artefacts et les usagers.

Toute activité humaine est réfléchie, mais un but n'est pas forcément un problème qui doit être résolu et chaque action ne doit pas forcément être motivée par une tâche à

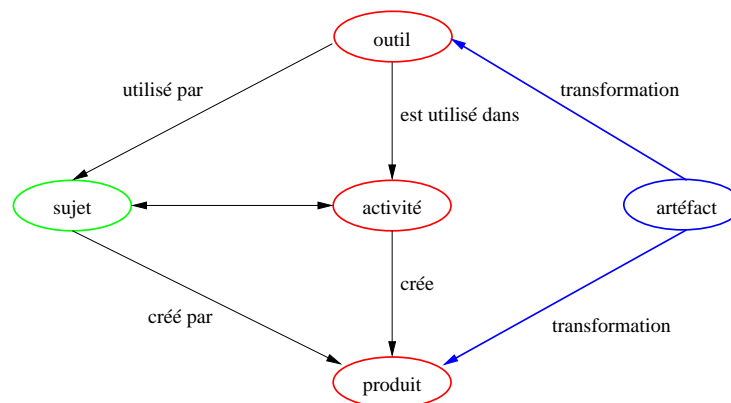


FIG. 3.6 – Relations médiatisées d'artefacts au sein d'activités.

accomplir. W.J. Clancey [58] prend l'exemple d'une personne qui écoute de la musique tout en conduisant sa voiture sur le trajet la ramenant à son domicile. Cette activité fait partie de la pratique de la conduite pour beaucoup de personnes mais n'est pas du tout un sous-but nécessaire pour atteindre sa destination. Selon Clancey, les motifs sous-tendant les comportements humains ont été imparfaitement caractérisés au travers de la théorie de la résolution de problème introduite par Allan Newell dans sa théorie unifiée de la cognition [210]. Tous les comportements orientés buts ne sont pas obtenus par inférence ou compilation. Certaines actions reproduisent simplement des motifs culturels, tandis que d'autres sont coordonnées sans délibération moyennant des mécanismes d'attention et d'adaptation. Clancey discute de la notion de parallélisme de tâches. Une personne n'effectue pas du multitâche en parallèle, mais plusieurs tâches vont se dérouler en fusionnant attentivement plusieurs intérêts parallèles. Il dit que la conceptualisation de cette notion est encore primitive et que sa nature n'est pas développée dans les théories neuropsychologiques.

A l'inverse de l'approche *résolution de problème*, Clancey défend qu'une activité n'est pas forcément interrompue lorsque le besoin s'en fait sentir comme, par exemple, si une autre activité devient pressante ou si une condition externe vient interrompre ce que la personne était en train d'effectuer. Un mécanisme d'activation compétitive est impliqué. La terminaison et le processus de démarrage d'une activité sont plus subtils qu'une décision purement orientée but. Clancey dit encore qu'il n'y a pas d'opposition séquentiel/parallèle mais un couplage. Les sous-systèmes couplés vont s'organiser ensemble en temps réel. Le parallélisme permet de combiner plusieurs activités en même temps, tandis que le sérialisme contraint le traitement de formes ordonnées de séquences d'action. Le parallélisme est fondamental pour coupler des comportements et les ordonner dans le temps, notamment lorsque cela implique plusieurs modalités sensorimotrices. Il n'est pas suffisant de calculer rapidement la vision, l'audition, ou encore la verbalisation : la coordination conceptuelle implique une intégration de ces différentes dimensions au cours du temps de l'action.

La théorie du couplage structurel postule que chaque acte de délibération se produit comme un comportement immédiat. Chaque acte de parole, de mouvement de stylo, chaque geste ou idée est produit par une architecture cognitive unique et ceci au sein du même processus par lequel la coordination s'effectue à un niveau neurologique. Le contraste n'est pas entre le comportement immédiat et le comportement délibéré [210] mais entre la coordination intégrée et les résultats d'une séquence de tels circuits sensori-moteurs au cours du temps. Les processus de couplage structurel sont non linéaires et codépendants et ne sont pas de la forme *entrée cause sortie*.

3.6 La cognition incarnée située

Un certain nombre de comportements sont orientés vers l'achèvement de buts futurs et de ce fait sont relativement indépendants de la perception immédiate de l'environnement dans lequel se situe la personne. D'autre part, il est nécessaire d'expliquer comment un système cognitif achève ses buts malgré des perceptions ambiguës et incomplètes. L'idée de la modélisation interne est fondamentale pour permettre aux sciences cognitives de répondre à la question suivante [145] :

- Par quel facteur le comportement peut-il être dirigé quand cette direction n'est pas fournie par l'état courant des capteurs sensoriels ?

Il est courant de considérer que seule l'approche symbolique peut être utilisée pour modéliser les comportements cognitifs, car ces derniers ont souvent été introduits comme étant des problèmes à résoudre formulés sous la forme condition/actions. Mallot [182] propose de lever cette ambiguïté en considérant la cognition comme un phénomène comportemental observable et non comme un mécanisme de calcul mental. Cependant, cette approche traditionnelle des sciences cognitives et de l'intelligence artificielle a été confrontée à des problèmes tels que :

- *the chinese room problem* ou problème de la pièce chinoise : John Searle [264] s'attaque au test de Turing et cherche à démontrer avec son problème de la chambre chinoise qu'il n'y a aucunement besoin d'intelligence pour passer ce test. Il s'attaque aussi par la même occasion à l'intelligence artificielle dite classique et à son corollaire, l'approche symbolique des sciences cognitives. Voici ce que dit John Searle sur son test : *Supposons que je sois dans une pièce fermée avec la possibilité de recevoir et de donner des symboles, par l'intermédiaire d'un clavier et d'un écran, par exemple. Je dispose de caractères chinois et d'instructions permettant de produire certaines suites de caractères en fonction des caractères que vous introduisez dans la pièce. Vous me fournissez l'histoire puis la question, toutes deux écrites en chinois. Disposant d'instructions appropriées, je ne peux que vous donner la bonne réponse, mais sans avoir compris quoi que ce soit, puisque je ne connais pas le chinois. Tout ce que j'aurai fait c'est manipuler des symboles qui n'ont pour moi aucune signification. Un ordinateur se trouve exactement dans la même situation que moi dans la chambre chinoise : il ne dispose que de symboles et de règles régissant leur manipulation.*

Ce texte a eu un effet considérable et a généré beaucoup d'écrits [144, 189, 9] cherchant à démonter son argumentation. John Searle a proposé depuis un nouvel argumentaire avec toujours pour objectif de démonter l'idée qu'un cerveau

puisse être assimilé à un ordinateur. L'argument est qu'un ordinateur n'est pas intrinsèque, c'est-à-dire qu'il n'existe pas indépendamment d'un observateur ; n'est ordinateur que quelque chose à laquelle a été assignée une interprétation [263]. La seule chose qui ait effectivement lieu dans un ordinateur qui est en train de fonctionner, ce sont des flux électriques. Nous, nous pouvons leur associer des symboles mais la machine, elle, n'en contient pas.

- *the frame problem* ou problème du cadre : ce problème est apparu pour la première fois dans le domaine du calcul situationnel à propos de la prise en compte de l'évolution du monde [119]. Des axiomes sont utilisés pour définir les changements produits par une action, mais il est aussi nécessaire de définir des axiomes pour les non-changements et ainsi apparaît l'explosion combinatoire liée à la prise en compte de toutes les conséquences d'un choix. D'autre part, le système sera fragile car il risque d'être employé dans une situation non prévue, qu'il ne pourra donc pas appréhender. Il y a ainsi un problème de fermeture sémantique définissant le cadre correct de fonctionnement d'un tel système.
- *the symbol grounding problem* ou problème de l'ancrage des symboles : d'après Harnad [115], les symboles doivent acquérir leur sens de la réalité, c'est ce qu'il appelle le problème de l'ancrage des symboles : un système artificiel fondé entièrement sur la manipulation de symboles n'entrevoit jamais la sémantique qui leur est associée. Afin de trouver une solution au problème, il propose que les symboles soient fondés sur un processus d'extraction d'invariants à partir de signaux sensori-moteurs, défini en trois étapes :

Iconisation : la transformation des signaux en représentations iconiques ou icônes ;

Discrimination : la capacité de juger si deux entrées sont identiques ou différentes et si elles sont différentes, comment ;

Identification : la capacité à assigner une réponse unique (un nom) à une classe d'entrées, les traitant toutes comme équivalentes d'une certaine manière.

Un symbole n'est pas une partie de la réalité physique, mais il la représente, il est une abstraction simplifiée de la réalité. Traditionnellement, les symboles sont définis comme des représentations internes avec lesquelles des calculs ou raisonnements peuvent être effectués. Les symboles les plus typiques sont les nombres et les signes linguistiques (lettres, mots, . . .). Dans les travaux de Harnad, les symboles sont définis comme étant des noms définissant des catégories ou classes d'activité sensori-motrice. P. Vogt [322] propose pour sa part d'associer un symbole à une relation structurelle entre la réalité et une activation sensori-motrice d'un agent, la réalité pouvant être un objet du monde réel ou un état interne.

Au cœur de ces problèmes réside le fait que les symboles manipulés ne sont ni situés ni incarnés. Plusieurs chercheurs du domaine des sciences cognitives incarnées présumant que quand les symboles sont nécessaires pour décrire la cognition, ils doivent être définis comme un couplage structurel entre les objets et leurs catégories, ce qui est assez proche de la théorie de Peirce [229] décrivant un signe comme consistant en une triade intitulée « Representamen-Interpretant-Object » : *la forme que le signe prend* (Representamen), *le sens donné au signe* (Interpretant) et enfin *l'objet*

auquel le signe réfère (Object). Cette relation entre les trois éléments constitutifs de la triade est obtenue par le jeu de deux déterminations successives du signe S par l'objet O et de l'interprétant I par le signe S, de façon que I soit déterminé par O à travers S. Steels introduit une terminologie plus familière à travers le triangle sémiotique (cf figure 3.7).

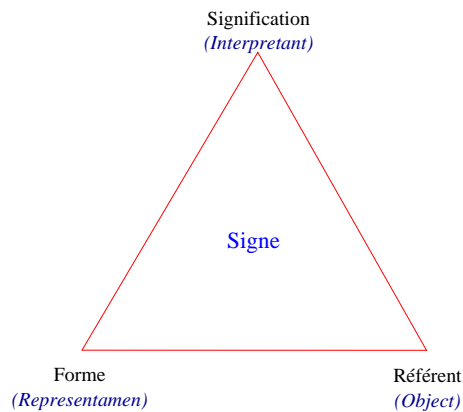


FIG. 3.7 – Le triangle sémiotique de Steels et sa correspondance Peircienne

La signification d'un symbole sémiotique peut être vue comme une relation fonctionnelle entre la forme et le réfèrent. Cette relation est fondée sur l'expérience corporelle de l'agent et l'interaction avec le réfèrent. L'expérience d'un agent est fondée sur l'histoire de ses interactions antérieures avec de tels objets. Chaque interaction entre un agent et un réfèrent peut activer ses expériences passées et mettre en avant une nouvelle expérience. La manière dont les expériences corporelles sont représentées et mémorisées forment la représentation interne du sens. L'interaction concrète entre un agent et un réfèrent définit la relation fonctionnelle. Le symbole sémiotique est ainsi incarné et situé car acquis à travers l'interaction réelle entre un agent physique et son environnement.

La représentation est la notion centrale des sciences cognitives traditionnelles au détriment du contexte corporel et environnemental dans lequel les systèmes cognitifs sont amenés à opérer. En réaction à cela, la situation et l'incarnation sont devenues des concepts importants en science cognitive à la fin des années 1980 [340]. Dans cette approche, la cognition n'est plus réduite à une manifestation cérébrale mais elle implique aussi le corps et l'environnement. Le corps de l'agent ainsi que l'environnement dans lequel il opère procurent un certain nombre de structures que les appareils cognitifs internes de l'agent cognitif vont utiliser pour résoudre les problèmes de l'agent [145]. Tandis qu'il y a un consensus dans la communauté dite de la cognition située et incarnée pour dire que l'approche traditionnelle de la cognition en tant que processus calculatoire est incomplète voire erronée, il n'y a par contre pas de consensus sur ce que sont les fondements de cette nouvelle approche. Keijzer [145] présente, par exemple, la notion de cognition incarnée dynamique, en considérant les agents cognitifs comme des systèmes dynamiques et en mettant en avant le rôle central joué par les relations

temporelles dynamiques impliquées dans les interactions entre le système neuronal, le corps et l'environnement.

La science cognitive incarnée a des racines en intelligence artificielle où elle est devenue populaire en tant que nouvelle intelligence artificielle. En plus de l'IA, elle a aussi des racines dans d'autres disciplines des sciences cognitives telles que la psychologie, la linguistique, les neurosciences. Brooks [43] et d'autres ont montré qu'un certain nombre de comportements *intelligents* d'un agent peuvent s'expliquer au niveau du contrôle sensori-moteur. Des mécanismes très simples connectant les capteurs et les effecteurs d'un agent permettent d'exhiber des comportements complexes sans avoir recours à des représentations symboliques. Si ainsi un certain nombre de comportements peuvent être exprimés grâce à l'hypothèse de l'ancrage physique, la question reste posée pour des fonctions cognitives de plus haut niveau faisant intervenir notamment le langage [322].

Dans la science cognitive incarnée, il est assuré que l'intelligence peut être décrite comme la somme des expériences corporelles antérieures de l'agent acquises au travers de son interaction avec son environnement. En d'autres termes, l'intelligence d'un agent est fondée sur ses interactions antérieures avec le monde physique [322]. Certains prétendent que les représentations symboliques ne sont pas nécessaires pour mettre en œuvre des comportements d'agents intelligents. Brooks [43] a ainsi introduit l'hypothèse de l'ancrage physique : cette hypothèse statue que l'intelligence d'un agent doit être fondée sur l'interaction entre l'agent physique et son environnement.

Ceci est vrai pour décrire des comportements réactifs de bas niveau tels que des évitements d'obstacle et de la reconnaissance de formes simples, mais les comportements cognitifs de plus haut niveau requièrent des représentations symboliques. La complexité réside dans le fait que ce système symbolique doit être incarné et situé : il doit être incarné pour vivre des expériences dans le monde environnant et il doit être situé pour acquérir des connaissances au travers de ses interactions avec ce monde. Tom Ziemke effectue une analyse critique de l'apport de la nouvelle intelligence artificielle au problème de l'ancrage des symboles et conclut en disant que même s'ils sont incarnés, la vie elle ne semble pas être présente [339].

3.7 Approche écologique de la perception

W. Warren [327] dit que « *Le but de la perception n'est pas de fournir la description générale d'une scène mais d'extraire une information spécifique pour la tâche impliquée dans l'activité en cours.* » et rejoint ainsi J. Gibson [106] qui propose une approche écologique de la perception, théorie qui associe une sémantique en terme de comportements à chaque objet de l'environnement. J. Gibson a développé une théorie dite des *affordances*, terme difficilement traduisible mais qui correspondrait aux disponibilités physiques perceptibles d'un objet ou d'un lieu. L'accent est mis non pas sur la nature de l'observé mais sur la nature de l'observateur qui va tout de suite accéder aux caractéristiques de l'objet qui l'intéresse. Ainsi, un environnement va fournir directement à l'entité comportementale l'ensemble des comportements possibles vis-à-vis des objets qui le constituent. Gibson définit une typologie des affordances : le milieu, les substances, les surfaces et leur disposition, les objets, les autres personnes et animaux,

les lieux. Cette théorie postule qu'il est plus utile de connaître à l'avance la nature des interactions avec un objet que d'avoir des notions précises de sa géométrie et de reconstruire à partir de cela ses caractéristiques.

Les « *affordances* » introduites par J. Gibson sont des opportunités pour l'action qu'un objet, un lieu ou un événement procurent à l'agent cognitif. Elles réfèrent aux ressources rencontrées par l'agent cognitif dans l'environnement. Cette notion d'affordance n'est pas dissociable de celle de capacité ou aptitude (certains disent *effectivité*). Par exemple, l'affordance d'une chaise est liée à notre capacité de plier le bassin et les genoux pour nous asseoir. L'aptitude est un moyen d'agir qu'un agent cognitif peut utiliser pour réaliser une affordance particulière. La perception des affordances a été montrée comme dépendante du corps de l'observateur et ce dernier est à frontière variable car dépendant de l'utilisation ou non d'outils (la canne d'un aveugle par exemple). Selon Hirose, les frontières du corps sont démarquées par les processus de perception et d'action et de ce fait, l'usage d'un outil modifie la boucle perception-action [124]. Avant usage, l'outil est un objet à part entière, séparé du corps de l'agent cognitif. Il a des affordances spécifiques et procure des opportunités d'action. Pendant l'usage, un outil n'est plus un objet, il s'agit d'une extension fonctionnelle de l'agent. Il joue un rôle central en étendant les aptitudes de l'agent pour réaliser les affordances de l'environnement. Quand un outil étend les capacités d'un agent, il étend aussi son corps.

Gibson a été critiqué pour avoir fondé sa théorie seulement sur la perception en négligeant le processus cognitif.

3.8 Centralisme vs. parallélisme

Un certain nombre de modèles proposent une décomposition fonctionnelle du comportement humain :

- la perception elle-même décomposée en différentes modalités sensorielles ;
- l'attention ;
- la mémoire ;
- le contrôle moteur ;
- le raisonnement.

Ces modèles proposent pour la plupart une architecture séquentielle du traitement de l'information : les modules sont activés l'un après l'autre, chacun utilisant comme entrée les résultats produits par le module précédent. D'autres modèles, souvent récents, postulent que le traitement peut s'effectuer en parallèle et que l'ensemble des résultats est intégré au sein d'un module final de réponse. Il y a donc cette notion de processeur central, dans lequel l'information arrive de différentes sources, est stockée temporairement et manipulée, et qui a en charge la sélection d'actions. Par exemple, dans les modèles de mémoire classiques, la mémoire de travail, guidée par l'attention, reçoit des informations de la mémoire à long terme et de la mémoire sensorielle, traite cette information et fournit une réponse appropriée en sortie. La mémoire sensorielle est dans certains cas décomposée en plusieurs modules fonctionnels différents (boucle phonologique, module visuo-spatial) [22]. Pour B. Bakker [27], il n'y a aucune donnée

issue des sciences neuronales qui nous indique qu'un tel processeur central ou espace de travail existe. L'approche dite du comportement adaptatif propose quant à elle de ne pas utiliser de processeur central ni d'espace de travail, mais de décentraliser le contrôle en le distribuant au sein de contrôleurs locaux qui fonctionnent en parallèle. Chaque contrôleur local réalise une tâche simple. L'interaction des contrôleurs locaux entre eux, ainsi qu'avec leur environnement, permet de faire *émerger* un comportement comme un tout sans qu'à aucun moment il n'y ait eu de contrôle par un processeur central, on parle aussi d'*auto-organisation*. Ce type d'approche est fondé sur une méthode ascendante : on sélectionne un certain nombre d'assemblages possibles de blocs élémentaires et seules les meilleures combinaisons sont gardées, afin d'avancer dans le processus itératif de filtrage et de mutation génétique visant à trouver la configuration optimale pour réaliser à bien une tâche particulière. Afin d'apprendre le fonctionnement des systèmes conçus par la nature, ce type d'approche est utilisé pour tenter de reproduire le processus évolutionniste développé par un organisme vivant au cours de son cycle de vie.

3.9 La psychologie sociale

La description de la psychologie des personnages est un point important et délicat. La psychologie sociale étudie les manières dont les gens perçoivent, interagissent et s'influencent mutuellement. Les théories psychanalytiques classiques n'offrent pas une approche satisfaisante pour la modélisation. L'analyse transactionnelle est une théorie de la psychologie sociale développée par Eric Berne [30], psychiatre américain, et dédiée à la compréhension de l'ensemble des mécanismes sous-jacents aux transactions entre individus. Dans cette théorie, l'être humain est caractérisé par trois éléments appelés les *états du moi* : parent, adulte et enfant. L'analyse transactionnelle se fonde sur une théorie de la personnalité qui doit autant à un certain behaviorisme qu'à la tradition freudienne. La personnalité se fonde sur des *états du moi* qui sont distincts mais qui peuvent cependant, dans certaines conditions, être simultanément présents à la conscience : les *états du moi* peuvent ainsi être intégralement conservés de façon permanente.

Le concept de base de l'analyse transactionnelle est celui des trois états du moi, formés au cours de la petite enfance et qui constituent la structure de toute personnalité : ce sont le Parent, l'Adulte et l'Enfant. On les représente généralement par trois cercles superposés (cf figure 3.8).

Tous trois sont aussi importants l'un que l'autre, et ce qui se passe dans nos rapports interpersonnels et dans nos vies dépend en grande partie de l'état du moi à partir duquel nous agissons, dans telle ou telle situation.

- L'état Enfant est celui d'où proviennent notamment la créativité, le jeu, l'intuition, les pulsions et les sentiments ; s'il peut être spontané, intuitif et créateur, l'Enfant peut aussi être capricieux, rebelle ou soumis.
- L'état Parent, pour sa part, est responsable, réconfortant et protecteur ; il recèle l'appris, le sens éthique et les normes, ce qui constitue la base du respect de soi et d'autrui ; il est *civilisé*, mais peut être critique, dévalorisant et contraignant.
- Quant à l'état Adulte, il sert de fonction équilibrante entre le Parent et l'Enfant,

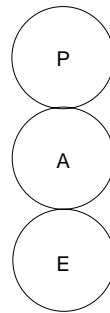


FIG. 3.8 – Le PAE, ou triple moi.

sachant quand donner du lest à l'un ou l'autre ; il évalue, réfléchit et fonctionne de manière rationnelle en fonction de la situation du moment. L'état Adulte est un genre d'ordinateur ; en ce sens, il n'est ni négatif ni positif.

Les états du moi régissent à la fois notre vie intérieure et nos relations avec les autres. Une unité de rapport social est appelée transaction. Une transaction est l'aller et retour, verbal ou non verbal entre deux interlocuteurs qui communiquent. La figure 3.9 illustre toutes les transactions possibles entre deux individus. Les transactions sont dites complémentaires lorsque l'émetteur émet l'un de ses états du moi et vise un des états du moi de son interlocuteur et que celui-ci répond de l'état du moi visé vers l'état du moi émetteur [31]. Elles caractérisent une communication aisée qui peut se poursuivre sans heurt ni conflit. Les transactions sont dites croisées lorsqu'un émetteur qui s'adresse à un état du moi de son interlocuteur s'entend répondre depuis un autre état du moi que celui visé par un message destiné à un autre état du moi que celui préalablement utilisé par l'émetteur. C'est le signal d'un conflit, d'un malentendu ou encore d'une incompréhension entre les deux interlocuteurs. Nous reviendrons sur cette théorie dans le chapitre consacré à la fiction interactive, notamment pour la modélisation des relations entre les personnages.

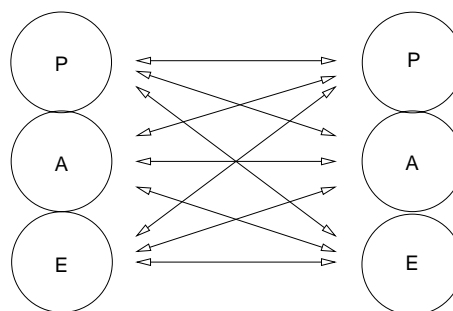


FIG. 3.9 – Les transactions possibles.

3.10 Navigation et cognition spatiale

3.10.1 Introduction

La tâche de navigation piétonnière est une tâche pratiquée quotidiennement par tout être humain doué de capacités motrices. Il s'agit donc d'un des comportements les plus répandus et qui a l'avantage de pouvoir mettre en œuvre un certain nombre de fonctions différentes et ceci de manière évolutive. Au sein de la psychologie, au moins deux communautés se sont intéressées à la cognition spatiale : la première étudie les mécanismes de la mémoire spatiale et du jugement, tandis que la seconde se focalise sur la navigation et cherche à isoler la contribution individuelle de chaque système sensori-moteur [312]. B. Tversky soulève le problème de la non-coopération entre ces deux communautés, alors que le problème sous-jacent concerne l'intégration du corps et de l'esprit. La communauté de l'esprit s'intéresse à des problèmes liés au jugement spatial, tels que la direction d'une ville par rapport à l'autre, leur distance respective, ou encore la planification d'un chemin. A partir de questions soigneusement choisies, il est ainsi possible de déterminer comment sont représentées et utilisées les informations spatiales. La seconde communauté se focalise sur l'étude des boucles visuelle, auditive, kinesthésique et vestibulaire au sein du processus de déplacement. Ce type de recherche a tendance à réduire la quantité de stimuli, ainsi que la richesse de l'environnement afin de se focaliser sur le réglage fin d'un système sensori-moteur particulier, relativement à une caractéristique spécifique de l'environnement.

3.10.2 La navigation

Un des problèmes auxquels un être humain est confronté lorsqu'il navigue dans un environnement est celui du repérage de sa propre localisation dans l'espace. Une approche consiste à considérer que l'être humain possède une carte cognitive géocentrique de l'espace dans lequel il navigue. B. Tversky [311] indique que les espaces diffèrent par les fonctions qu'ils servent et décrit différents espaces relativement à soi : l'espace du corps, l'espace autour du corps, l'espace de navigation et l'espace abstrait. Ce dernier espace concerne l'ensemble des représentations abstraites utilisées dans notre pensée telles que dessins, diagrammes, courbes ou encore graphes. B. Tversky postule que chaque espace est représenté schématiquement au sein du cerveau et que les éléments et les relations spatiales varient en fonction de la nature de l'espace : il n'y a aucune raison pour que les représentations spatiales soient cohérentes entre elles [311]. En ce qui concerne l'espace de navigation, l'évidence de sa schématisation provient des erreurs observées systématiquement dans les jugements sur les espaces mémorisés³.

Les lieux marquants (*Landmarks* en anglais) sont définis comme étant des endroits dont la localisation est relativement mieux connue et qui servent pour définir la localisation de positions adjacentes. Beaucoup de tâches spatiales requièrent d'un individu qu'il utilise des lieux marquants afin d'établir une mémoire des lieux [326]. Ainsi, un nouveau visiteur dans une ville utilisera quelques lieux marquants à proximité de son

³Nous reviendrons sur ces erreurs plus loin.

hôtel pour mémoriser sa localisation. Cette mémoire de place lui permettra de reconnaître son hôtel lorsqu'il arrive dans son voisinage et peut être utilisée pour guider la navigation afin de retourner d'un lieu distant à celui-ci. Waller et al. organisent ainsi une expérimentation dans laquelle une personne naviguant dans un environnement virtuel dispose de trois lieux marquants comme repères pour établir sa propre localisation dans l'espace. Ils montrent que l'apprentissage des lieux est un composant important pour la navigation fondée sur les lieux marquants et qu'un utilisateur est à même de déterminer sa direction même s'il a une vue complètement inédite sur les lieux marquants : il est ainsi postulé que l'être humain dispose de capacités de raisonnement géométrique lui permettant, quelle que soit sa position par rapport à des lieux marquants, de déterminer son orientation pour atteindre un but.

Wender et al. [329] étudient la connaissance des chemins, élément qui fait partie du mécanisme de construction d'une carte cognitive d'un environnement. Une telle carte ne se développe pas en une seule phase mais en plusieurs étapes au cours du temps. La première étape concerne la connaissance des lieux marquants, puis celle des chemins et enfin une connaissance de la topographie des lieux. A l'aide d'une série d'expériences, ils montrent qu'il y a une dépendance du contexte dans le mécanisme de rappel d'un chemin et ils postulent ainsi que la connaissance d'un chemin ne peut pas être ramenée à une simple association entre lieux marquants.

3.10.3 Repérages égocentriques et allocentriques

R.L. Klatzky [152] décrit les principes de base des systèmes de repérage allocentrique et égocentrique. Un système de représentation locative égocentrique décrit une représentation spatiale à partir de la position et de l'orientation intrinsèque d'une entité, tandis qu'une représentation locative allocentrique fait référence à un repère global de l'espace de représentation dans lequel tout point de vue perceptif est omis. Ce dernier peut être défini au minimum par un point et une direction telle que l'axe Nord-Sud sur une carte.

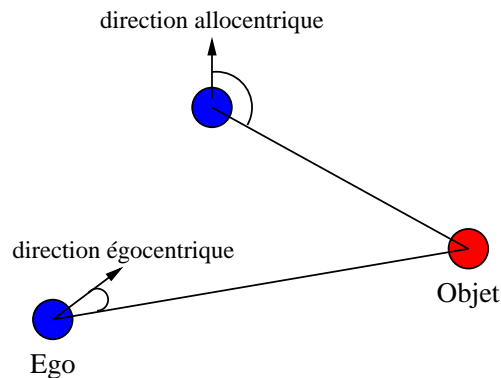


FIG. 3.10 – Repères allocentrique et égocentrique.

A. Franck [96] donne une caractérisation plus fine des types de représentations

en croisant les représentations égocentrique et allocentrique avec les représentations absolue et relative telles qu'illustrées dans le tableau 3.2.

		égocentrique (ancrage = locuteur)	allocentrique (ancrage = objet)
relatif	orientation liée au locuteur	égocentrique	rétinal (orientation = ligne locuteur-objet)
	orientation liée à l'objet		intrinsèque
absolu	cardinal	égocentrique cardinal	allocentrique cardinal
	vertical	égocentrique vertical	allocentrique vertical

TAB. 3.2 – Types de représentation.

Sholl [262] présente un modèle de repérage égocentré développé pour expliquer la recherche d'informations spatiales au sein de la mémoire à long terme. A partir de ses expériences, il postule que :

1. le système de repérage égocentrique met à jour la position mentale du corps relativement au repérage inter-objets ;
2. il y a un couplage fort entre la position du corps dans l'espace physique et dans l'espace de représentation égocentrique ;
3. les systèmes de repérage égocentriques sensori-moteur et symbolique présentent un recouvrement au sein de l'architecture physique.

Zacks et al. [338] étudient deux types de transformations spatiales opérées mentalement : les transformations égocentriques et celles liées à des objets, et montrent qu'elles ont lieu dans des parties différentes du cerveau.

3.10.4 Les représentations mentales sous-jacentes

Dans les domaines du raisonnement spatial qualitatif et des systèmes d'information géographique, un certain nombre de modèles à base de relations méreo-topologiques ont été proposés. Deux des approches les plus connues sont la théorie RCC de Randell et al. [244] et le modèle dit d'Egenhofer [86], qui sont deux ensembles de huit relations topologiques équivalents mais construits de manière différente. Knauff et al. [153] se sont posés la question de savoir si ces modèles avaient un sens d'un point de vue psychologique pour illustrer la cognition spatiale humaine. Ils montrent qu'il y a une adéquation cognitive conceptuelle⁴ entre les modèles RCC8 et d'Egenhofer à huit relations et les connaissances spatiales humaines. Ils ont montré par ailleurs que parmi les notions de topologie, d'orientation et de métrique, la topologie était prépondérante pour la verbalisation de configurations spatiales (utilisée seule dans 62.1% des cas et combinée ou non aux autres dans 95.4% des cas). Ils concluent donc à la nature topologique des relations spatiales stockées dans la carte mentale [153]. Alan Penn [230]

⁴L'adéquation cognitive conceptuelle est définie par les auteurs comme pouvant être proclamée si et seulement si une évidence empirique supporte l'hypothèse que le système de relations est un modèle des connaissances conceptuelles humaines sur les relations spatiales.

indique que l'ensemble des travaux menés jusqu'à présent montre le faible impact des propriétés métriques de l'espace sur la planification de chemin, mais par contre l'élément prépondérant est celui du nombre de changements de direction.

Contrairement à beaucoup d'autres propositions, Oman et al. [218] concluent de leur expérimentation que dans certains cas une mémorisation tridimensionnelle est nécessaire. Il s'agit d'une expérience développée pour des astronautes de la NASA car ceux-ci ne bénéficient pas, dans un espace sans gravité, de l'orientation relative des repères les uns par rapport aux autres. Les sujets étaient testés dans une chambre cubique représentant un module de la station spatiale. L'image d'un objet était présentée au centre de chaque mur et il leur était demandé de mémoriser les relations spatiales entre les six objets et d'apprendre à prédire la direction d'un objet si leur corps se trouvait dans une configuration donnée.

McNamara [191] propose une nouvelle théorie de la mémoire spatiale qui met en avant un système égocentrique. Il postule que pour apprendre la position d'un ensemble d'objets dans un nouvel environnement, un repère intrinsèque à la collection d'objets est utilisé. D'autre part, il postule que deux types de représentations sont effectuées, la première concerne les relations spatiales inter-objets tandis que la seconde est une mémoire visuelle des vues effectuées. La structure spatiale d'un environnement est représentée en terme de système de référence intrinsèque. Les axes du repère sont déterminés à partir de différents types de caractéristiques. Ce modèle concerne seulement les relations spatiales inter-objet et non les relations spatiales entre un individu et les objets l'environnant.

3.10.5 Distorsion des représentations mentales

Certaines théories hiérarchiques des représentations spatiales postulent que la mémoire spatiale contient plusieurs niveaux de détail reliés entre eux [331]. Étant donné la subjectivité de la perception, ainsi que les caractéristiques physiques des espaces, des entités géographiques peuvent être groupées ensemble afin de former des méta-entités abstraites reliées entre elles par des graphes de type entités-relations. Mallot indique que l'énonciation de l'existence de cette hiérarchisation des connaissances spatiales provient d'un nombre important d'expérimentations sur l'étude de la mémoire spatiale humaine qui ont révélé l'existence de distorsions. Par exemple, Stevens et Coupe [283] ont montré que les directions relatives entre villes sont distordues vers les orientations principales des états dans lesquelles elles se trouvent (distorsion hiérarchique). Dans leur étude, les sujets plaçaient la ville de Reno (Nébraska) au nord-est de San-Diego, alors qu'elle se trouve en fait au nord-ouest. Barbara Tversky [310] s'est intéressée quant à elle aux distorsions dues aux rotations. Elle a ainsi demandé à des sujets de décrire, par exemple, la position relative de Berkeley par rapport à Palo Alto (donnée à l'est au lieu du nord). Son interprétation est que les sujets effectuent une rotation pour se repérer par rapport à un axe de référence nord-sud. Wiener et Mallot [331] montrent, à partir d'une expérience de navigation immersive au sein d'un environnement virtuel, qu'il y a une influence des régions d'un environnement sur le comportement de choix d'un chemin. Ils en déduisent que la représentation des informations spatiales est hiérarchisée et contient ces notions de région, et que la planification de chemin utilise, en plus de la connectivité entre positions spatiales, la connectivité entre régions spatiales.

De plus, un humain a des capacités de perception consciente des régions de l'espace nécessaire pour établir une représentation spatiale hiérarchique.

Plus récemment Portugali et al. [240] ont introduit une nouvelle forme de distorsion systématique intitulée effet *lisière* en cherchant à étudier conjointement les deux effets précédents. Ils ont ainsi demandé de localiser plusieurs villes d'Israël et de la côte californienne afin d'étudier l'impact qu'avait la localisation des villes selon qu'elles se trouvent à proximité de la côte ou non. Ils ont ainsi pu montrer que selon la localisation ou non sur la côte des villes, et ce pour une même direction, il y avait un résultat différent. Leur constat est que la conclusion des travaux de Stevens et Coupe, qui indique que la distorsion n'est due qu'à la nature hiérarchique des données manipulées, est erronée. D'autres effets interviennent dans la distorsion des représentations spatiales mentales et ils ont montré l'impact du positionnement relatif des objets spatiaux par rapport à la frontière d'un espace englobant structurant.

3.10.6 Planification de chemin

A. Tom et M. Denis étudient l'usage des lieux marquants et des noms de rues dans le processus de navigation [302]. Ils montrent que les noms de rues sont beaucoup moins utilisés que les lieux marquants du fait de leur plus faible apport pour le processus de guidage. Schneider et al. [261] étudient deux types de représentations spatiales : le parcours et la vue topographique, afin de déterminer lequel des deux est utilisé pour les représentations mentales. Comme d'autres chercheurs avant eux, ils arrivent à la conclusion que les deux sont utilisées. S. Steck et H. Mallot [282] étudient le rôle des lieux marquants locaux et globaux et montrent que les deux sont utilisés dans le processus de planification de chemin, mais toutes les personnes n'appliquent pas la même stratégie, certains n'utilisant que des lieux marquants locaux, d'autre que des globaux et enfin un troisième groupe combinant l'usage des deux. Plus récemment, J. Wiener et H. Mallot [331] se sont penchés sur la notion de niveaux de détails dans les représentations spatiales utilisées pour la navigation. Ils postulent qu'au moins deux niveaux hiérarchiques sont utilisés, manipulant les notions de place et de région, une région étant un agglomérat de places. Pour eux la planification de chemins se fait localement au niveau de la place, tandis qu'en dehors de l'aire d'influence du lieu marquant local, elle s'effectue au niveau des régions (cf figure 3.11).

3.11 Comportement du conducteur de véhicule

Il existe beaucoup de travaux concernant spécifiquement l'étude du comportement des conducteurs de véhicules. Du fait du nombre réduit de paramètres le caractérisant, le comportement de conduite sur autoroute ou sur voies rapides impliquant une circulation en sens unique est le modèle le plus décrit et le plus simulé, même si ce n'est pas le plus accidentogène. Un certain nombre de travaux se sont focalisés sur des comportements très bas niveau tels que le suivi de voie et la négociation de virage. Les tâches de base du conducteur sont :

- le suivi de voie ;
- le contrôle de la direction ;

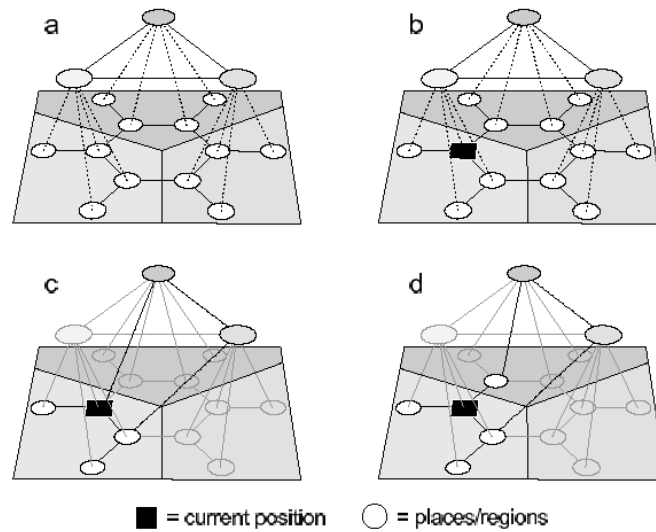


FIG. 3.11 – Représentation mentale hiérarchique pour la navigation [331].

- la régulation de vitesse ;
- les changements de file.

Les modèles de suivi de voie et de contrôle de la direction sont fondés sur la prise d'information géométrique dans l'environnement et sur le contrôle angulaire par rapport à une position désirée. Les modèles de contrôle proposés sont souvent de type contrôle proportionnel-dérivé. En ce qui concerne la régulation de vitesse et les changements de file, une variable est particulièrement importante : il s'agit du *headway* ou marge de manœuvre devant soi. La régulation de vitesse se fait en comparant le *headway* désiré et le *headway* courant. Si le *headway* courant est un certain seuil plus bas que le *headway* désiré et si la configuration le permet, un changement de file sera tenté pour dépasser le véhicule devant soi, sinon il y a régulation et adaptation à la vitesse du véhicule précédent. Certains chercheurs ont proposé des modèles intégrant à la fois des comportements de bas niveau et des comportements cognitifs et de prise de décision. Par exemple, Salvucci et al. ont proposé un modèle de conducteur fondé sur l'architecture cognitive ACT-R [257]. Ils proposent un modèle composé de quarante-cinq règles de comportement décomposées en trois grandes familles : le contrôle, le suivi et la prise de décision.

La participation au trafic routier étant une activité à risque, l'étude psychologique du comportement des conducteurs a généré ce qu'on appelle des modèles de risque. D'après H. van der Molen et A. Bötticher [319], ces modèles sont généralement incomplets de par leur structure, ce qui les rend inutilisables même pour des tâches simples (un changement de file par exemple). C'est pourquoi ils proposent de hiérarchiser le modèle de risque, et donc de comportement (figure 3.12). Le niveau opérationnel concerne les facultés de conduite de bas niveau comme le maniement du volant ou des

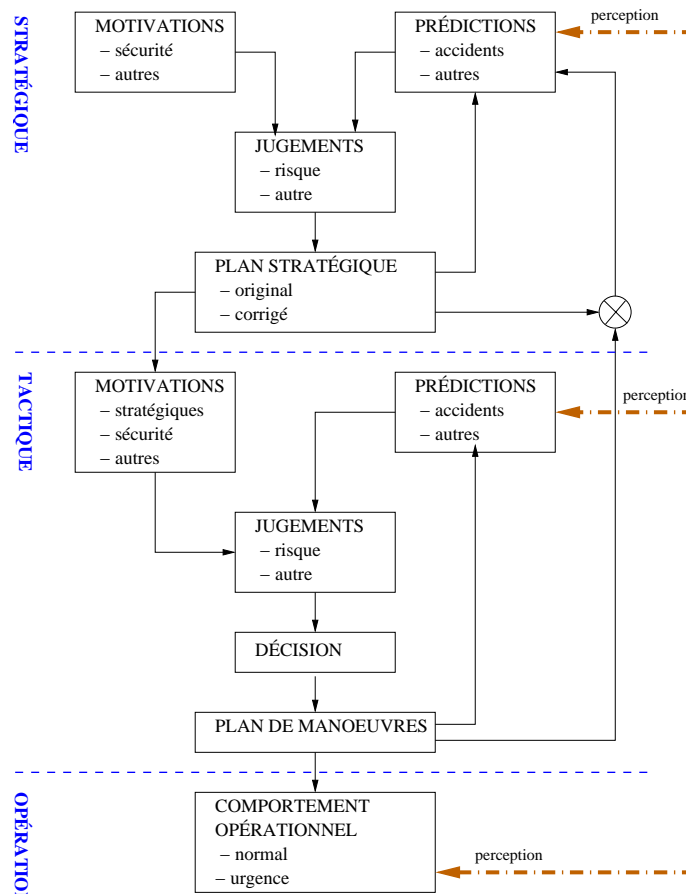


FIG. 3.12 – Un modèle hiérarchique de risque pour les participants au trafic routier

pédales. C'est aussi à ce niveau que les opérations urgentes sont traitées, d'où l'utilité de la perception. Le niveau stratégique traite plutôt les choix d'itinéraires, tandis que le niveau tactique résout les problèmes liés au trafic courant (changements de file, dépassements...). Le modèle proposé par van der Molen et Bötticher est compatible dans l'esprit avec les notions de théorie du contrôle que nous avons vues précédemment : à chaque niveau, une comparaison entre la réalité et les prédictions est effectuée. D'ailleurs les auteurs rappellent qu'en plus de cette hiérarchie, il doit y avoir dans tout modèle de conducteur un flot de contrôle qui permet de passer d'un niveau à l'autre au moment requis. Si l'on s'intéresse maintenant à la structure des parties décisionnelles envisagées, le niveau opérationnel est complètement automatisé sous forme de boucles de contrôles fermées, alors que le niveau tactique est largement constitué de structures *si situation alors action*.

Dans ce modèle, la conduite se compose de quatorze manœuvres qui sont constituées elles-mêmes de six tâches basiques :

1. orientation visuelle ;
2. adaptation de la vitesse ;
3. contrôle de la direction ;
4. applications des règles de priorité ;
5. contrôle du moteur ;
6. utilisation des accessoires de la voiture (clignotants, essuie-glaces, feux...).

Il existe d'autres modèles de risque, mais le modèle proposé par van der Molen et Bötticher peut être vu comme une synthèse de ces travaux. Des travaux étendent le modèle de risque en distinguant le risque objectif (réel) du risque subjectif. I. Howarth [128] montre que si l'hypothèse d'un comportement fondé sur le risque subjectif est souvent formulée, le comportement réel se fonde plutôt sur un risque objectif : l'exemple choisi est celui du risque encouru à la sortie des écoles lorsque les enfants traversent la rue. En effet, la probabilité de l'accident pour un enfant, sachant qu'il y a une voiture à proximité oscille entre 10^{-5} et 10^{-4} , si ni l'enfant ni la voiture n'essaie d'éviter l'accident. En cas de manœuvre de l'automobiliste ou du piéton, le risque est encore largement diminué. Par contre, le risque subjectif, grâce à de nombreuses campagnes de prévention, est particulièrement élevé. Howarth s'est donc intéressé au comportement des automobilistes en présence de piétons (adultes et enfants) sur la chaussée. Il s'avère que la vitesse moyenne des véhicules ne diminue que d'environ 7% (pour une vitesse moyenne de 55 km/h) en présence d'enfants et augmente même en présence d'adultes ! Il y a deux explications possibles à ce phénomène : soit tous les conducteurs sont des assassins en puissance, soit le comportement est implicitement et inconsciemment fondé sur le risque objectif plutôt que sur le risque subjectif. C'est naturellement la deuxième hypothèse qui est retenue par Howarth. C'est aussi celle-ci que nous retiendrons, sous la forme suivante : dans le cadre restreint de la simulation de conduite, nous nous limiterons au risque objectif, c'est-à-dire aux données perçues ou aux situations prédites.

D. Salvucci [256] s'est aussi intéressé à la modélisation de la distraction du conducteur, notamment lors de réalisation de tâches secondaires telles que l'utilisation de téléphones portables. La tâche d'utilisation du téléphone a ainsi été ajoutée au sein du modèle ACT-R du conducteur et un scénario a été développé, consistant en une tâche de suivi d'un autre véhicule qui va de temps en temps freiner intempestivement. Afin d'étudier l'impact de la tâche secondaire, des simulations ont été effectuées avec et sans l'exécution de cette tâche. Les résultats montrent un impact net de la tâche avec une augmentation du temps de réaction qui doit être contrebalancée par une réaction plus brusque.

3.12 Comportement du piéton

3.12.1 La locomotion

La locomotion est un des comportements humains les plus fondamentaux et qui joue un rôle central dans un certain nombre d'activités humaines. Afin d'être adaptatif, il doit être guidé par des informations sur l'environnement et ainsi le contrôle visuel

de la locomotion est une capacité perceptuelle fondamentale [327]. Le suivi de voie est une activité prépondérante tant pour le piéton que pour le conducteur de véhicule. Dans cette activité, l'entrée principale concerne la forme de la voie, ce qui correspond à son squelette et sa largeur. Goffman [108] décrit les techniques qu'emploie un piéton dans le but d'éviter les collisions avec d'autres usagers de la voirie et appelle cela le code social de la route. Le lien social entre passants est caractérisé par le silence et l'indifférence [250]. Pour maintenir ce lien d'indifférence civile entre passants, plusieurs comportements sont mis en œuvre :

- Le premier comportement appelé *externalisation* exprime le fait que les gens sont constamment en train de fournir des informations sur leurs intentions (direction, vitesse et résolution du pas) par des mouvements pouvant émaner de tout ou partie du corps. Chaque piéton se doit de rendre ces informations perceptibles aux autres personnes occupant la zone d'interaction.
- Le second comportement appelé *scrutation* est un processus par lequel chaque piéton regroupe de manière sélective un ensemble d'informations externalisées par d'autres piétons. Golson et Dabbs [110] ont observé que les femmes passaient plus de temps à cette tâche de scrutation que les hommes.
- Le troisième comportement, appelé *minimisation des ajustements* exprime le fait que l'ajustement de la trajectoire est effectué à une distance de quelques mètres pour être rendu perceptible assez tôt par les autres, dans le but de minimiser l'interaction avec les autres usagers et d'éviter une coordination.

Lee et Watson ont montré que pour limiter au maximum les interactions, même sans marquage explicite des voies de circulation, l'organisation globale des flux respecte les règles du code de la route [164], permettant ainsi à chacun de prédire aisément la trajectoire normale des autres usagers. Goffman introduit aussi la région ovale de sécurité (cf figure 3.13) dont la profondeur, qui correspond à l'aire d'anticipation, est dépendante de la vitesse du piéton lui-même, tandis que la largeur détermine la distance acceptable pour passer à côté d'une personne ou un obstacle ou encore pour longer un mur. Daamen et Hoogendoorn [67] proposent une équation pour calculer l'aire $A(V)$ de l'espace frontal d'un piéton en fonction de sa vitesse V de déplacement :

$$A(V) = A_{embouteillage} - 0.52 \cdot \ln \left(1 - \frac{V}{V_{libre}} \right)$$

avec V_{libre} , la vitesse de déplacement moyenne d'un piéton dans un déplacement non contraint (en moyenne 1.34 m/s) et $A_{embouteillage}$, l'espace minimal utilisé par un piéton lors d'un trafic très dense (en moyenne 0.19 m^2).

Yamori [335] propose lui une loi qui relie la vitesse d'un piéton à la densité de l'aire locale dans laquelle il se déplace. Il définit ainsi la distance d parcourue par un piéton entre l'instant t et l'instant $t + 2$ par :

$$d = d_{max} \cdot \exp\left(-k_d \cdot \frac{\rho}{\rho_{max}}\right)$$

avec d_{max} , la valeur maximale de cette distance obtenue quand ρ , la densité, tend vers sa valeur maximum ρ_{max} , k_d étant une constante du modèle.

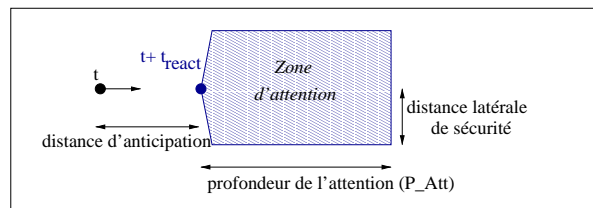


FIG. 3.13 – La zone de sécurité selon Goffman.

Goffman postule aussi l'existence d'une loi dite des changements minimaux qui veut dire qu'un piéton essaiera au cours de son trajet de réduire le nombre et l'amplitude des changements d'orientation. Hillier et al. [123] montrent que la majorité des mouvements pédestres se produit le long de lignes de vue qu'ils nomment lignes axiales. Azimazadeh et Klärkvist [19] ont étudié l'impact de ces lignes de vue sur le choix d'un chemin parmi plusieurs possibles. Ils montrent entre autre que les chemins aller et retour d'un lieu à un autre peuvent ne pas être les mêmes du fait de la prise en compte de ces lignes de vue.

M. Relieu [251] introduit la notion de discrimination urbaine, décrivant ainsi le fait que le piéton va focaliser son attention à l'intérieur de sa région courante afin de sélectionner l'information pertinente à la poursuite de l'activité dans laquelle il est engagé. Le cas particulier de la traversée de rue a été étudié du fait de la dangerosité due au croisement du trafic automobile. Lors de la traversée de rue, la communication entre le piéton et les conducteurs de véhicules ainsi que l'évaluation des situations vont influencer les décisions du piéton. Firth [92] décompose l'activité de traversée de rue en six étapes : sélection du lieu de traversée, observation, perception, jugement, décision et traversée. Harrell [116] s'est intéressé au risque pris par les piétons lors de la traversée. Il a ainsi mesuré le temps séparant l'instant de départ du piéton du bord du trottoir et celui de l'arrivée du véhicule sur le passage du piéton [117]. Les groupes présentent ainsi un comportement plus hardi en acceptant des ouvertures temporelles moins grandes et en forçant davantage les conducteurs de véhicules à ralentir. Wagner [325] s'est intéressé quant à lui au comportement des suiveurs lors de la traversée en groupe à un carrefour et il différencie trois types de comportements : la ligne de front, les suiveurs et le piéton solitaire.

3.12.2 Comportement de foules

Il est connu que dans les mouvements de foules, les flux de piétons marchant dans des directions opposées ont tendance à se séparer, conduisant ainsi à la formation dynamique de files de piétons allant dans la même direction. Lorsque la densité des piétons dans un espace devient grande, il est montré qu'il est possible d'effectuer une approximation de la tendance générale en utilisant les lois sur l'évolution des fluides⁵. Dans les situations de panique, les piétons souhaitent se déplacer beaucoup plus vite que d'habitude et de ce fait vont jusqu'au contact physique avec les autres. Ils ont aussi

⁵Ce qui explique le pourquoi de certains modèles macroscopiques présentés en section 4.4.8.

tendance à développer des comportements mimétiques de ceux les précédant dans le flux. Turner [308] utilise une théorie des normes pour suggérer que l'homogénéité se développe dans une foule non pas parce que des personnes ayant les mêmes prédispositions se sont assemblées spatialement, mais parce que les membres de la foule ont tendance à se conformer à une norme émergente. Selon Yamori [335], cette notion de norme est accompagnée inévitablement de la notion de régulation, comportement qui n'est pas inné mais acquis comme élément normatif au sein d'une certaine macrostructure ou collectivité. Cependant, de petits groupes peuvent servir de levier pour faire bouger de plus grandes unités, jouant ainsi le rôle du cœur.

Boles [36] a observé des structures de bandes au sein des foules de piétons se déplaçant sur des trottoirs et il a montré que les piétons avaient tendance à utiliser ce type de structure afin de maintenir le maximum d'efficacité au sein du trafic piétonnier. K. Yamori a cherché à étudier ces structures de bande d'un point de vue macroscopique [335]. Il postule que pour que ce type de structure existe, il est nécessaire qu'une densité critique de personnes soit atteinte, et il cherche à déterminer les facteurs qui déterminent l'émergence de ces structures. Milgram et Toch [196] ont noté qu'une structure en anneau émergeait lorsque les membres d'une foule disposaient d'un point d'intérêt unique commun. Cette formation circulaire peut être observée au sein des foules regroupées par exemple autour d'artistes de rue. Un des problèmes cruciaux mis en avant par Yamori [335] concerne les relations entre les comportements micro et macroscopiques au sein d'une foule. L'enjeu est d'expliquer comment un individu peut affecter une collectivité et comment en retour la collectivité va agir sur le comportement individuel au cours du temps. Yamori se focalise sur l'étude de la formation des structures de bandes macroscopiques sur des passages-piétons dans un cas de trafic piétonnier très dense comme c'est le cas au Japon. De l'étude, il postule qu'une masse critique doit être atteinte afin qu'émerge une structure en forme de bandes.

3.13 Conclusion

Les différentes études psychologiques résumées ci-dessus montrent la difficulté de proposer une architecture permettant de relier ensemble les différentes fonctions en œuvre dans un comportement humain le plus simple soit-il : à minima des fonctions perceptive, de traitement et motrice. Les différentes approches mettent l'accent préférentiellement sur l'une ou l'autre de ces fonctions ou sur une modalité particulière de leur relation. Partant de l'observation de l'existence de ces trois fonctions et de leur nécessaire coopération, ces différentes approches peuvent être mises en commun au sein d'un modèle informatique mettant en œuvre comme concepts de base ces trois fonctionnalités sous la forme d'une boucle « perception-décision-action » dans laquelle le processus décisionnel est temps réel, et constitué d'activités concurrentes et hiérarchisées, ayant des échelles de temps différentes. La construction de tels systèmes pour la simulation interactive nécessite la conception d'un système réactif de traitement de flots de données en provenance ou à destination de l'environnement. Il est nécessaire de pouvoir définir le comportement d'une entité de manière modulaire et hiérarchique, chaque niveau d'abstraction ne manipulant pas les mêmes concepts et ne prenant pas en compte les mêmes éléments de l'environnement. Il est de même nécessaire de pouvoir

gérer plusieurs fils d'activité en parallèle et de proposer des mécanismes d'activation compétitive permettant une coordination fine de plusieurs activités. Ceci doit être effectué par le biais d'un système de contrôle d'activité et de préemption. Ainsi, à notre sens, un modèle permettant la spécification du comportement réactif d'une entité doit-il intégrer les paradigmes suivants : hiérarchie, parallélisme, modularité, réactivité. En ce qui concerne la perception, il apparaît nécessaire de disposer, en plus des informations géométriques sur la scène, d'une base de connaissance topologique et sémantique décrivant la nature et la structure de l'ensemble de ses constituants. En ce qui concerne les comportements cognitifs, il est nécessaire de traiter du problème de l'ancrage des symboles ou autrement dit de l'incarnation et de la situation du modèle cognitif dans un univers donné. Ceci passe par la proposition d'une architecture complète de perception et de mémorisation individualisée.

Chapitre 4

Modélisation des comportements d'humanoïdes autonomes

4.1 Introduction

Le modélisation n'est pas une fin en soi : elle suppose un objectif, car un modèle est une réduction de l'objet d'étude, une reproduction simplificatrice à des fins d'étude, de mesure ou de calcul. Plusieurs notions sont importantes dans la modélisation :

Réduction de la complexité : Il s'agit de retenir les caractéristiques intéressantes et pertinentes pour l'objectif de l'étude.

Formalisation : Choisir une ontologie.

Instrumentation : Déterminer les paramètres importants qui devront être tracés afin d'observer l'évolution du modèle.

Le comportement est quant à lui la manifestation objective de l'activité globale d'un animal ou d'un être humain. Il s'agit donc d'un ensemble de phénomènes observables de l'extérieur à la différence de la connaissance de l'état des variables internes sous-tendant les activités.

La modélisation du comportement peut être effectué dans différents buts :

- Pour la psychologie, les neurosciences, l'ergonomie, il s'agit de décrire, expliquer ou prédire un comportement. Plusieurs niveaux de modèles existent, ceux s'intéressant à l'homme en général et ceux s'intéressant à l'étude du comportement humain pour un domaine d'activité particulier (la conduite automobile par exemple).
- Pour l'intelligence artificielle, il s'agit de développer des techniques dans le but de rendre compte de certains phénomènes observés par les psychologues.
- Pour la réalité virtuelle et plus largement les mondes synthétiques habités, il s'agit de proposer un environnement de programmation abstrait permettant d'intégrer la richesse des comportements humains perceptibles tout en restant simple

d'utilisation du fait de la contrainte du temps-réel.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter des architectures cognitives, puis des modèles de type systèmes multi-agents et enfin nous présenterons les travaux menés en animation comportementale.

4.2 Modèles cognitifs

4.2.1 Introduction

Par le terme de modèle, on entend ici essentiellement les modèles cognitifs du comportement. Il existe une diversité de sens associée au terme de modèles. Pour certains (e.g. Ritter, et al. [85]), il s'agit de l'implantation informatique (ou de la formalisation mathématique) d'une théorie appliquée à des situations spécifiques ou des classes de situations. Pour notre part, nous entendons par modèle (cognitif) du comportement, la figuration plus ou moins formelle d'aspects du fonctionnement interne -mental-, inférés et validés à partir de comportements observés, pour une classe de sujets et une classe de situations.

A la suite d'autres (e.g. Sperandio, 2003 [278]), il nous paraît utile de distinguer le modèle psychologique de sa modélisation informatique. D'un côté, des modélisations cognitives intéressantes à considérer ne sont pas forcément implantées, à ce jour. D'un autre côté, il est rare que les modélisations informatiques respectent la contrainte de validité psychologique dans l'intégralité de leur implantation. Dans la majeure partie des cas, seul un sous-ensemble des composants et mécanismes *cognitifs* implantés a pour vocation à opérer la *simulation* du modèle.

Une autre approche en modélisation consiste à vouloir, non pas rendre compte d'une classe particulière de situation (par exemple résoudre le problème de la tour de Hanoi), mais à vouloir au contraire concevoir un modèle qui tente d'*unifier* ce que l'on sait des propriétés les plus régulières de la cognition humaine, au sein d'un même modèle. On parlera alors plutôt d'architectures cognitives. Ce terme d'architecture admet deux sens également, de façon similaire au terme de modèle :

- *the specifications of the main modules and mechanisms underlying human cognition* ;
- *the computer program implementing these specifications (Ritter et al., 2001 p 11 [85]).*

Les deux approches, modélisation d'une classe de tâches et de situations, et architecture générique sont complémentaires en ce qu'elles peuvent s'enrichir mutuellement.

4.2.2 Quelques dimensions des modèles cognitifs

Classes de sujets modélisés

Les classes de modèles de sujets ont une double détermination : (a) empirique, d'une part, et (b) théorique, d'autre part : (a) la facette empirique concerne les sujets et

les situations dont proviennent les données empiriques utilisées pour concevoir le modèle/nourrir le modèle ; (b) la facette théorique concerne l'ambition associée au modèle, en termes de sa portée et de sa généralité. Trois familles de modèles peuvent être distinguées selon cette double détermination du *sujet* sur lesquels elles sont construites. Les premiers concernent l'Homme en général (Sperandio, 2003), du fait des précautions méthodologiques (simplification et contrôle expérimental des facteurs extrêmes) et/ou des ambitions vouées au modèle par leur auteur. Ces modèles présupposent généralement que tous les sujets sont interchangeables en ce qui concerne la tâche figurée dans le modèle ; de ce fait, le modèle figure souvent une propriété, un comportement ou une performance moyenne, éventuellement sa variabilité. Pour l'essentiel, il s'agit du *Sujet Humain*, tel qu'il est considéré par les branches disciplinaires dites *fondamentales*.

Les évolutions majeures dans le champ de la psychologie fondamentale ont cependant pour base, dans une large part, des données recueillies sur des *opérateurs* placés dans des situations écologiques. Ce sont à ces travaux que l'on fait référence dans la seconde famille qui regroupe les modèles concernant des opérateurs experts, c'est-à-dire des sujets ou des catégories de personnes, généralement au travail, dont *on étudie les activités dirigées vers les buts à atteindre*[278].

Enfin, une troisième famille de modèles concerne des *utilisateurs*, c'est-à-dire des sujets ou catégories de personnes en situation d'interaction avec une machine un dispositif[278].

Classes de tâches modélisées

En psychologie, plusieurs types de tâches ont été étudiées. Plusieurs domaines de l'activité humaine sont concernés. Des modèles plus ou moins formels ont été proposés, certains ayant débouché sur des programmes informatiques permettant la simulation. Parmi ces types de tâches, on peut évoquer :

La résolution de problèmes. Les situations de résolution de problèmes sont largement étudiées en psychologie dans un cadre expérimental, pour laquelle la Psychologie a construit un cadre d'analyse dénommé *paradigme espace-problème*. Selon cette perspective théorique, tout problème peut être décrit à partir de quatre caractéristiques : l'état initial, l'état but du problème, les opérateurs permettant de passer de l'état initial à l'état but final, les restrictions d'application sur les opérateurs. L'idée est que pour tout état situé entre l'état-initial et l'état-but du problème, il est possible d'engendrer un nombre fini d'états potentiellement atteignables en appliquant chaque opérateur valide ; cet ensemble d'états constitue l'espace problème de la solution, et la procédure de résolution peut alors être décrite comme un cheminement à l'intérieur de cet espace-problème [273, 107]. Trois types de tâches problèmes ont été classiquement décrits dans ce contexte ([134], p 139) :

- les problèmes de transformation d'état ; l'exemplaire le plus typique est la tour de Hanoi
- les problèmes d'arrangement ; par exemple l'anagramme, ou le rébus de cryptarithmétique
- les problèmes d'induction ; la résolution y consiste essentiellement à identifier

les relations liant un ensemble d'éléments donné, comme par exemple dans l'analogie à quatre termes.

En outre, d'autres dimensions importantes peuvent caractériser les situations de résolution de problèmes. Nilsson, cité par [151], distingue deux grandes catégories de problèmes, selon qu'ils fassent intervenir ou non un adversaire dont il faut tenir compte :

1. Les problèmes avec *adversaire* se caractérisent par le fait que *a rational opponent must be faced who is trying to undo the solver's attempt* ([151], p 86) ;
2. Les problèmes *sans adversaire*, où les *solvers are faced with non-responsive materials that are not trying to defeat the solver's purposes* ([151], p 86).

Plus généralement, on peut proposer qu'il existe des problèmes (a) autogènes dont la résolution est individuelle - (b) extérogènes, dont la résolution, bien qu'individuelle, implique une relation équilibrée avec d'autres agents (adversaires ou partenaires) - (c) pseudo autogène, où il y a déséquilibre et non réciprocité des relations avec le ou les autres agents. (d) à l'intérieur d'un collectif.

D'autres propriétés des problèmes ont été mises en avant pour catégoriser la tâche de résolution.

- On a souvent distingué entre les problèmes *sémantiquement riches* de ceux *sémantiquement pauvres*. Les premiers ont ceci de particulier que leur résolution implique des connaissances/compétences dépendant du domaine, i.e. *domain-dependent skills* ([151], p 86). Cependant, cette notion de compétence liée au domaine est porteuse d'ambiguïté, dans la mesure où plus que le problème lui-même, cette dimension caractérise en réalité l'expérience de celui qui résout le problème. Comme le soulignent Gilhooly et Green ([151], p 86) : *to a large extent, this distinction refers to the solver's view of the problem area*.
- On peut aussi distinguer les problèmes selon leur degré de définition et d'ouverture. Par exemple, les problèmes de physique ou de mathématique sont généralement *bien définis* et fermés. A l'inverse, les problèmes de conception sont typiquement caractérisés comme mal définis et ouverts.

Les tâches de Mémorisation et d'Apprentissage. Plusieurs paradigmes ont été développés dans ce champs, historiquement (depuis le behaviorisme jusqu'au cognitivisme), comme en termes de fonction ou processus concernés (associations S-R, mémoire sémantique, Abstraction, imitation, compilation, analogie, etc.)

Les tâches ou processus cognitifs liés à un domaine et une expertise particulière.

La psychologie ergonomique est en grande partie à l'origine de ce type d'études menées avec des objectifs variés (conception, formation, recueil d'expertise pour une base de connaissances, etc.) Durant ces dernières années, l'analyse ergonomique des tâches - et les méthodes et formalismes associés- ont aussi été fortement développés dans le cadre de la conception des systèmes interactifs (e.g. [66, 114, 113, 174]). Des domaines très variés sont explorés et de nombreux modèles ont été développés, concernant (a) la prise de décision, (b) la conduite automobile, (c) le diagnostic médical, (d) le diagnostic de pannes, (e) l'interaction Humain-Machine, etc. Les méthodes d'analyse et

les formalismes utilisés sont eux-mêmes assez divers, pouvant se regrouper dans trois grandes familles selon l'origine ([73], p 91) :

- les formalismes initialement issus de la linguistique, e.g. grammaire de type BNF, permettent d'effectuer des comparaisons entre interfaces à un niveau demeurant essentiellement au niveau des actions. Des exemples sont TAG, ETAG, ETIT.
- Les formalismes issus de modèles hiérarchiques orientés-tâche (notamment à la suite de HTA) dont le principe consiste à décomposer hiérarchiquement la tâche globale en sous-tâches élémentaires pour mettre en évidence les informations nécessaires à l'utilisateur pour chaque but et sous-but. Des exemples sont CLG, GOMS, KLM, CCT, UAN, GTA et MAD*.
- Les formalismes issus de modèles de la connaissances, dont l'objectif est d'explicitier la connaissance utilisée dans une tâche. Des exemples sont TAKD ou TKS.

Le comportement social. A notre connaissance, peu de modèles implantés ont été proposés à ce jour. Toutefois, un recensement des travaux dans le domaine serait probablement utile, les auteurs du présent document n'étant pas des spécialistes de la modélisation informatique appliquée aux phénomènes de groupes et plus largement au champs social de la psychologie.

4.3 Les architectures cognitives

4.3.1 Introduction

Les architectures cognitives visent à unifier au sein d'un même modèle un ensemble de propriétés communément admises au sein d'une communauté scientifique sur la cognition humaine. Nous allons présenter maintenant les principaux modèles d'architectures logicielles permettant une modélisation du comportement humain.

Nous avons choisi de classer les architectures classiquement utilisée en IA selon un découpage fondé sur des hypothèses cognitives, i.e. selon le modèle du raisonnement humain qu'elles simulent. Quatre types sont proposés : ceux fondés sur la logique formelle, ceux fondés sur l'idée de mémoire associative, ceux fondés sur la modularité et ceux fondés sur l'automatisme.

4.3.2 Les architectures fondées sur la logique formelle

Les systèmes de production

Hypothèses cognitives

La mémoire à long terme est représentée par des jeux de règles. La mémoire à court terme est représentée par une base de faits que l'interpréteur utilise. Et le processeur de résolution de problème est représenté par le moteur d'inférence. Cette architecture simple devient plus puissante si l'on permet au système de transformer les règles ou

encore si on inclut un processus pour sélectionner les meilleures règles. Un système capable de varier l'ordre dans lequel il applique les règles peut modéliser un comportement adaptatif, i.e. que une même situation, on fera les choses différemment la prochaine fois. Un système qui peut réécrire ses propres règles (qui traite des règles comme des faits) peut modéliser l'apprentissage.

Description

Un système de production est un algorithme qui permet de manipuler des structures symboliques. Un système de production est une généralisation de règles de réécriture. Une règle de réécriture élémentaire prend une chaîne de symboles pour la transformer en une autre chaîne de symboles. Il existe un mécanisme automatique qui utilise les règles : le moteur d'inférence. Il permet d'appliquer un jeu de règles aux faits (données) en mémoire. Un système de production comprend donc un jeu de règles de production, une base de faits et un moteur d'inférence.

Dans un système de production simple, le moteur d'inférence découvre une certaine situation (appelée condition) dans la base de faits, la règle est réveillée et prête à être utilisée. Donc la première fonction du moteur d'inférence est évaluative ou interprétative. Il cherche dans une base de faits afin de trouver des règles qu'il peut appliquer. Dans un moteur d'inférence élémentaire, si une règle correspond à une situation, elle est exécutée. En règle générale, la partie action de la règle est utilisée pour transformer la base de faits. Donc, au lieu d'utiliser les termes de situation et d'action, on peut également utiliser les termes de si-alors ou de condition-conclusion. Il s'agit d'une interprétation plus logique d'une règle de production qui privilégie la fonction du contenu des clauses et non pas la manière dont une règle est manipulée.

Dans un moteur d'inférence plus complexe, si le moteur trouve plusieurs règles applicables, il choisit la meilleure des règles. C'est sa fonction de contrôle. Souvent il utilise un autre jeu de règles. Il s'agit alors de sélection heuristique de règles et ces règles de choix sont des méta-règles. Le chaînage avant et le chaînage arrière sont les deux méthodes élémentaires d'utilisation de règles.

Chaînage arrière : le moteur tente de prouver la partie alors de la règle. Le alors représente une sorte de but qui est résolu si la partie si est vérifiée. Le chaînage arrière part d'un but général, le divise en sous-buts et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il trouve dans la base de faits des données qui prouvent un sous-but.

Chaînage avant : le moteur est poussé par les faits et attend les faits.

Ces deux mécanismes peuvent être combinés.

L'idée de base des modèles comme GPS, SOAR et ACT-R est de proposer un modèle général de la capacité humaine à résoudre des problèmes. GPS est le premier de ces systèmes, il a été créé à partir d'études cliniques avec des sujets. Il est basé sur 5 points : Le raisonnement humain pour la résolution de problèmes peut être représenté comme un système de traitement de l'information. Cette représentation peut être formalisée en détail. Ce formalisme permet d'implémenter l'ensemble du traitement de l'information. Il y a différentes manières de résoudre un problème. L'environnement de la tâche détermine le comportement du problème solveur. C'est l'environnement qui est

complexe. Celui qui résout des problèmes humains doit réduire cette capacité pour être capable de trouver une solution.

GPS

Le General Problem Solver (GPS) de Newell et Simon est le système de résolution de problème le plus important en IA [212]. Il est fondé sur un mécanisme centre d'analyse moyens-fins (means-ends analysis) et sur un modèle de la mémoire centrale. Il a été le premier modèle complet du traitement humain de l'information. Le mécanisme de moyens-fins (means-ends analysis) s'appuie sur le fait qu'un problème est la différence entre un état courant et l'état désiré du monde. Le problème génère le but de réduire cette différence. Ensuite, il faut trouver les moyens.

Un problème peut être décrit avec des objets et des opérateurs. Les objets sont décrits par leurs attributs et par leurs différences entre paire d'objets. Un opérateur est un objet qui peut être appliqué à une classe bien définie d'objets pour les transformer ou pour créer de nouveaux objets. Le GPS contient une table de différences qui dépend du type de tâche à résoudre. Il fait partie de l'environnement de la tâche qui contient également la description du problème ainsi que le but. Pour poursuivre un but, le GPS doit décomposer un problème en sous-problèmes plus simples auxquels il peut appliquer des opérateurs.

Lorsqu'on donne un problème au GPS, il crée d'abord le but de transformer un objet A en objet B. Le programme va s'arrêter s'il ne trouve pas la différence entre A et B. Sinon il va appliquer un opérateur O à l'objet A. Si cette procédure permet de créer un objet A' qui a des attributs identique à ceux de B, il s'arrête avec succès. Sinon il procède graduellement et essaie de créer un objet A' et ainsi de suite Cet algorithme possède trois types de stratégies opérationnelles :

1. transformer un objet ;
2. réduire la différence ;
3. appliquer un opérateur.

Soar

SOAR (State, Operator And Result) est le successeur du GPS [132]. Il s'agit d'un nouveau système de résolution de problème universel centré sur la recherche heuristique des espaces de problèmes. Partant d'un état initial, le système tente d'appliquer un certain nombre d'opérateurs pour arriver à l'état désiré. Lorsque le programme rencontre une difficulté, il crée un sous-but et le traite comme problème indépendant à résoudre. Il définit donc des hiérarchies de buts ayant des espaces de problèmes indépendants. Contrairement à GPS, le système choisit des méthodes de résolution différentes selon la nature du problème. SOAR possède une capacité d'apprentissage. Il peut se souvenir des séquences de résolution de problème ayant eu des succès et les réutiliser dans les nouvelles situations.

Un des efforts les plus ambitieux pour unifier différents aspects de la cognition est le système Soar [160] issu des travaux de Allan Newell sur une théorie unifiée de la

cognition [210]. Soar peut être décrit comme une architecture symbolique pour l'intelligence qui intègre des mécanismes de base pour la résolution de problèmes, l'utilisation de connaissances, l'apprentissage et les comportements sensori-moteurs. Soar a une architecture unique pour toutes les tâches, sous-tâches, une représentation unique des connaissances permanentes et des connaissances temporaires, un mécanisme pour générer des buts et un mécanisme d'apprentissage. Dans Soar, toutes les décisions sont faites à partir de l'interprétation des données perçues, du contenu de la mémoire de travail créée pour la résolution de problèmes antérieurs et de toute connaissance retrouvée à partir de la mémoire permanente. Soar est fondé sur l'hypothèse que tous les comportements délibérés orientés buts peuvent être représentés par la sélection et l'application d'opérateurs à des états. Un état est la représentation de la situation courante d'un problème à résoudre actuellement en mémoire. L'application d'un opérateur va changer l'état courant en un nouvel état, en changeant la représentation de celui-ci dans la mémoire. Un but est une issue désirée de l'activité de résolution de problème. Soar applique continuellement des opérateurs choisis pour réaliser le but à atteindre.

Soar possède deux types de mémoire : la mémoire de travail et la mémoire à long terme. La mémoire de travail contient les descriptions de la situation courante incluant les données provenant des capteurs. La mémoire de travail est organisée en objets eux-mêmes décrits à travers leurs attributs. L'état courant est la somme des objets contenus dans la mémoire de travail avec les valeurs courantes de leurs attributs. La mémoire à long terme (appelée aussi mémoire de production) contient les productions, règles de type conditions-actions. Si les conditions d'une production sont vérifiées au sein de l'état courant contenu dans la mémoire à court terme, alors les actions associées à la production sont exécutées. Soar a une notion primitive en ce qui concerne l'apprentissage : il s'agit de l'apprentissage par l'expérience qui va permettre de produire de nouvelles règles de production.

La coordination dans Soar est modélisée sous la forme de trois types de planification :

- étendue : abstraction et sélection de buts ;
- hiérarchique : sélection d'opérations pour réaliser les buts en accord avec un plan déterminé au préalable ;
- réactive : sélection d'actions motrices.

Ainsi l'apprentissage déplace de la connaissance du niveau planification étendue vers le niveau intermédiaire de l'action délibérée et aussi vers le niveau inférieur des réflexes.

EPIC

EPIC[147, 148] est l'acronyme de Executive-Process/Interactive Control. L'objectif associé au développement de l'architecture EPIC est de fournir une simulation précise du traitement de l'information par le sujet humain avec en particulier une description détaillée des activités perceptives, cognitives et motrices impliquées (Figure 1). Une caractéristique importante d'EPIC est son orientation vers la simulation de situations de gestion de tâches multiples.

EPIC implante une synthèse entre, d'une part, un système de production représentant les connaissances manipulées et, d'autre part, la simulation de systèmes parallèles

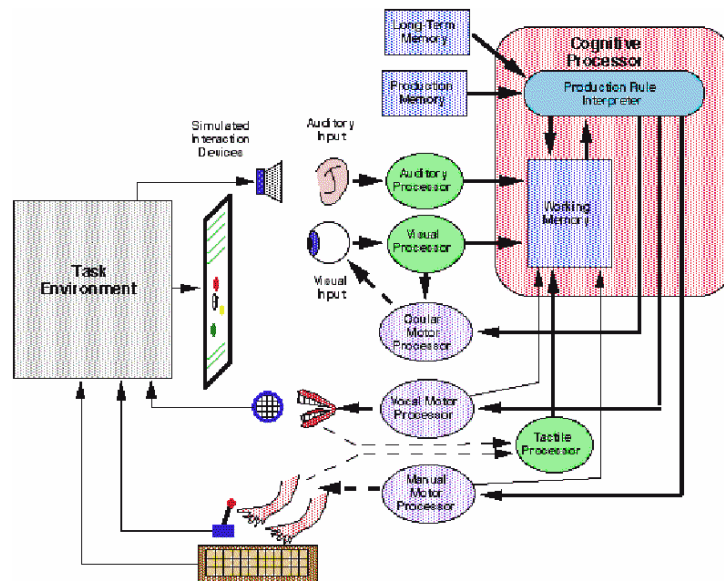


FIG. 4.1 – L'architecture EPIC (Executive-Process/Interactive Control) d'après [147]

de traitement de l'information à travers les différents " circuits " sensori-moteurs. EPIC admet deux catégories de paramètres [49] :

standard, which are system parameters believed to be fixed across all tasks, and typical, which are free to vary across task situations, but have more-or-less conventional values. A standard parameter in EPIC is the duration of a production cycle in the Cognitive Processor, this is 50 ms. An example of a typical value is the time it takes the Visual Processor to recognize that a particular shape represents a right arrow, which is 250 ms.

Cependant, EPIC ne simule pas les processus sensoriels et moteurs en tant que tels, il en simule plutôt l'ordonnancement temporel et les durées, en tenant compte des contraintes de coordination et de partages de ressources entre les différents étages des traitements sensoriels et moteurs. Par exemple, en ce qui concerne la simulation de la réalisation de gestes et d'actions, les phases de préparation et de réalisation sont distinguées. Dans EPIC un seul mouvement peut être en cours de préparation, en même temps qu'une seule action peut être en cours de réalisation [49] :

" The time to prepare a movement is dependent on the number of movement features that must be prepared for each movement and the features of the last movement prepared. Features that have been prepared for the previous movement can sometimes be re-used, saving time. EPIC can make repeated identical movements rapidly because there is no feature preparation time necessary if the movements are identical. If they are not identical, the amount of savings is a function of how different the current movement is from the previous one (. . .) The execution time for a movement corresponds roughly to the time it physically takes to execute the movement; the execution time for aimed movements of the hands or fingers are governed by Fitts 's Law. "

Comparativement à SOAR, le système de production présente une différence importante: il n'y a pas de limitation du nombre de règles de production pouvant être déclenchées au cours d'un cycle du processeur cognitif et ; le niveau de granularité des règles est beaucoup plus élevé, autorisant [49] un parallélisme à tous les niveaux de l'architecture, y compris à l'étage cognitif. De ce fait, EPIC est fortement orienté vers l'élaboration de modèles prédictifs des performances de sujets ayant à gérer plusieurs tâches en parallèle. Pour cela, à côté des connaissances sur la tâche, un autre ensemble de règles dites d'exécution (executive knowledge) est également mobilisé dans la simulation [49] : When more than one task is being performed, the tasks can execute in parallel. However, many of the perceptual-motor processors are effectively serial. People only have one set of eyes that can only be aimed at one place at a time, so if multiple tasks are ongoing and they both require the eyes, there must be something that arbitrates. In EPIC, this additional knowledge about how to manage multiple tasks is termed "executive" knowledge, and the productions which implement this knowledge execute in parallel with the productions implementing the task knowledge.

ACT-R

ACT-R (Automatic Control of Thought) [12] est une architecture cognitive visant comme SOAR à proposer une vision cohérente de la cognition humaine. L'architecture d'ACT-R 5.0 [11], la version la plus récente, est une architecture modulaire, chaque module étant dédié au traitement d'un type d'information. La coordination des comportements est effectuée au sein d'un système de production central. Ce processeur central n'a pas un accès direct aux données des modules et ne peut répondre qu'à un minimum d'information déposée dans les buffers des différents modules. Ainsi un individu ne sera pas réceptif à l'ensemble de l'information se trouvant dans son champ visuel mais seulement à celle des objets auxquels il est attentif. De la même manière, il n'a pas conscience instantanément de tout le contenu de la mémoire à long terme, mais seulement des faits récupérés. La figure 4.2 présente l'architecture globale d'ACT-R.

Dans ce schéma, on peut remarquer une association entre les boîtes et les régions corticales dans lesquelles sont supposés avoir lieu ces traitements. Par exemple, DLPFC veut dire *DorsoLateral PreFrontal Cortex* et VLPFC *Ventrolateral PreFrontal Cortex*. On distingue aussi deux types de mémoire à long terme : la mémoire déclarative et la mémoire procédurale. L'architecture suppose un mélange de traitements effectués en séquence et en parallèle. A l'intérieur d'un module, il y a un fort parallélisme. Par exemple, le système visuel traite simultanément l'ensemble du champ visuel et le système déclaratif exécute des recherches parallèles au travers de la mémoire en réponse à une requête de récupération d'information. Les traitements effectués au sein des différents modules sont exécutés en parallèle de manière asynchrone et il n'y a que deux goulets d'étranglement dans le système. Le premier est que le contenu d'un buffer est limité à une seule unité de connaissance, appelé *chunk* dans ACT-R. De cette manière, seul un élément peut être récupéré de la mémoire à long terme à chaque cycle et de la même manière un seul objet peut être encodé à partir du champ visuel. Le second goulet est qu'une seule production peut être sélectionnée à chaque cycle, se différenciant ici de Soar.

Nous donnons une description succincte de chacun des modules d'ACT-R et ren-

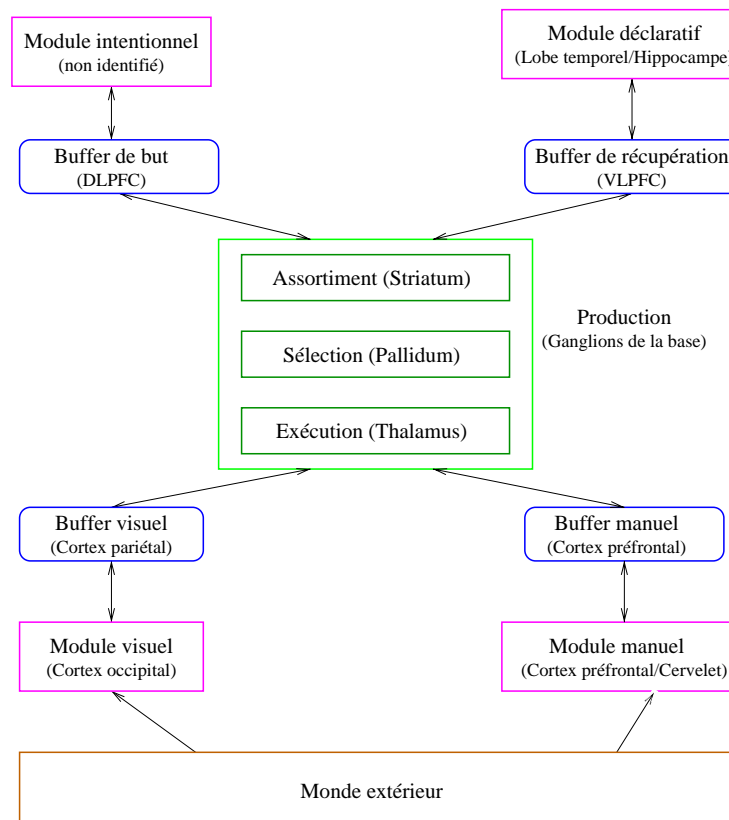


FIG. 4.2 – Architecture d'ACT-R.

voyons le lecteur intéressé à [11].

Le système sensori-moteur : la vision est décomposée en deux modules ayant chacun un buffer associé : un module dédié à la localisation (*where*) et un autre à la dénomination (*what*). Une requête au module *what* va provoquer un déplacement de l'attention visuelle à cet emplacement, traiter l'objet s'y trouvant et générer un bloc dans la mémoire déclarative décrivant cet objet.

Le module but : il a juste pour objet de garder une trace des intentions afin que le comportement serve ce but.

Le module mémoire déclarative : Plusieurs éléments contrôlent la récupération d'information dans la mémoire déclarative (les équations d'activation et d'apprentissage de bloc, la probabilité et le délai de récupération).

Le module mémoire procédurale : il contient des règles de production qui possèdent chacune une évaluation de son utilité, donnée qui servira dans le processus de sélection de production. L'utilité intègre dans son calcul la notion de probabilité de succès.

ACT-R peut être utilisé pour développer des simulations d'un grand nombre de phénomènes cognitifs ayant trait à la mémoire, à la résolution de problèmes et à l'acquisition de capacités.

CoLiDeS

CoLiDeS (Comprehension-Based Linked Model of Deliberate Search) vise à modéliser la façon dont un utilisateur explore une nouvelle interface. Contrairement aux trois systèmes précédents, il n'est pas fondé sur des règles de production mais sur le modèle de construction-intégration développé par Kintsch [150]. CoLiDeS est fondé sur un processus dont les composants et la logique diffèrent grandement des cycles des systèmes de production. Chaque cycle comprend deux phases distinctes: la phase de Construction et la phase d'Intégration. Byrne [49] résume les propriétés des deux phases de la façon suivante : " In the construction phase, an initial input (e.g., the contents of the current display) is fed into a weakly-constrained rule-based process which generates a network of propositions. Items in the network are linked on the basis of their argument overlap. Once the construction phase completes, the system is left with a linked network of propositions. What follows is the integration phase, in which activation propagates through the network in a neural network-like fashion. Essentially, this phase is a constraint-satisfaction phase, which is used to select one of the propositions in the network as the "preferred" one. Une autre différence réside dans le degré de connaissances dont le modèle est doté initialement ; alors que dans les systèmes de production, les connaissances sont celles qui caractérisent la tâche à réaliser, CoLiDeS modélise un niveau minima de connaissances associé à des instructions minimales [49]. Ainsi, un apport important du modèle est de simuler la façon dont l'utilisateur engendre des buts appropriés en tentant de mener à bien la tâche indiquée par la consigne. Récemment, des mécanismes de régulation de l'attention ainsi que l'intégration de LSA (Latent Semantic Analysis, [163]).

Conclusion

Les deux concepts de chaînage avant et arrière utilisé dans les modèles fondés sur la logique formelle ont une utilité pour la modélisation. Les deux méthodes de raisonnement correspondent plus ou moins à des aspects importants de l'activité de l'esprit humain. Une activité de résolution de problème est guidée à la fois par un raisonnement plus logique qui cherche à prouver une intention, une théorie, etc. et par un raisonnement plus immédiat qui propage ses conclusions à partir de faits vers l'avant. Le mécanisme de chaînage avant, qui déclenche des règles, permet de simuler la perception d'un fait, en insérant un fait dans la base de faits. Ces règles aboutissent à des conclusions qui, à leur tour, déclencheront des règles, etc. Cette méthode correspond à la modélisation d'un type de raisonnement spontané, rapide ou routinier. Le mécanisme du chaînage avant peut également être utilisé pour modéliser la création de buts, le partage d'un problème en sous-but, ainsi que la poursuite simple de buts. Le mécanisme de chaînage arrière permet de vérifier si une affirmation ou une hypothèse est juste. Si le fait correspondant n'est pas trouvé dans la mémoire, d'autres règles sont appliquées jusqu'à la prouver ou à conclure la tâche impossible.

Il y a un certain nombre de similarités entre ces deux modèles. Les règles de production de la mémoire procédurale de ACT-R correspondent aux règles de production de la mémoire à long terme de Soar. Les faits contenus dans la mémoire déclarative d'ACT-R correspondent aux objets de la mémoire de travail de Soar. Les buts d'ACT-R correspondent aux opérateurs de Soar. Dans Soar et ACT-R, la délibération est opposée et disjointe de la coordination perception/action immédiate. La délibération est vue comme un état du système existant pour quelques cycles temporels au moins dans l'espace se trouvant entre la perception et le mouvement indépendamment de l'activité. Clancey leur oppose que la délibération n'est pas une sorte de pause pour l'action (*time-out for action*). La délibération se produit comme une expérience sensori-motrice et n'a pas lieu avant ou entre la perception et l'action. La délibération n'est pas un processus de plus haut-niveau dans le sens du contrôle mais dans le sens de l'organisation de la manière dont nous percevons, ordonnons ou donnons du sens aux matériaux ou expériences déjà créés.

4.3.3 Modèles fondés sur l'idée de mémoire associative

Hypothèses cognitives

Un grand nombre de chercheurs en psychologie et en IA postule l'existence de structures cognitives complexes. La mémoire humaine contient un grand nombre d'informations et il est très coûteux de les associer à chaque fois qu'il en est nécessaire. C'est pourquoi, certains éléments doivent être regroupés dans des structures comme les réseaux sémantiques, les scripts ou les frames. Minsky a travaillé sur l'idée de mémoire associative et sur la notion de frame. Sa théorie est basée sur le postulat qu'un grand nombre d'expériences en psychologie cognitive suggèrent que les gens utilisent des structures de connaissances larges constituées à partir d'expériences précédentes pour comprendre de nouvelles situations et pour agir. Quant au raisonnement à base de cas, il est basé sur un grand nombre d'observation en psychologie cognitive qui montre l'importance des expériences du passé pour résoudre un problème. Dans certaines activités professionnelles comme celles de la résolution de cas juridiques, ce type de raisonnement est dominant à cause du rôle important de la jurisprudence.

Les réseaux sémantiques

De nombreuses représentations doivent fournir un moyen de désigner les objets et de décrire les relations qui existent entre eux. La syntaxe d'un réseau sémantique est simple : il y a des objets et des relations entre les couples d'objets. Les réseaux sémantiques sont des graphes dont les nœuds représentent des concepts et les arcs définissent les liens entre ces concepts. Les mécanismes élémentaires des réseaux sémantiques sont ceux qui font passer des descriptions de classes à des descriptions particulières (héritage), déterminent des descriptions en l'absence de savoir spécifique (démons), spécifient les procédures à employer pour traiter les descriptions (valeur implicite) et permettent aux descriptions de dépendre du contexte (point de vue). Les réseaux sémantiques ont un faible niveau inférentiel et déductif.

Les scripts

Les scripts ont été inventés par Schank, un linguiste de Yale avec la théorie de la dépendance conceptuelle. Les scripts servent à interpréter des événements fréquemment rencontrés [247]. Les scripts décrivent des connaissances stéréotypées. Ils permettent de créer des attentes sur les objets que l'on peut s'attendre à trouver et de faire des prédictions sur la suite des événements. Par exemple, si le contexte est un restaurant, on peut s'attendre à avoir un menu, des couverts, à manger, à payer l'addition. Les scripts permettent aussi de définir des actes primitifs (se déplacer, attraper, changer d'état), des actes instrumentaux (produire un son, attendre), des actes mentaux (construire des informations à partir d'autres informations, conceptualiser). Un analyseur permet d'analyser les choses sous-entendues (" John a mangé le pain " sous-entend qu'après il n'y a plus de pain). Un parseur heuristique permet de faire des inférences (causalité, back inférence). Un planificateur permet d'établir la chaîne de causalité. Un langage permet de représenter des plans qui ont des buts et des préconditions. Il est difficile de dire si les scripts représentent réellement les structures mises en place dans le cerveau humain. De plus, il est difficile de savoir comment ces scripts pourraient se créer et s'adapter, quel serait leur niveau de généralité, comment on les activerait ou les désactiverait.

Les frames

Les frames sont les successeurs des réseaux sémantiques. Ils ont été créés par M. Minsky. Sa théorie " A framework for representing knowledge " propose des structures (frames) paramétrées modifiables en fonction de la situation (Minsky, 75). Alors que les scripts modélisent des événements qui définissent des situations stéréotypées, les frames modélisent des unités de mémoires qui comprennent du savoir et du savoir-faire très complexes. Le concept de frame s'apparente au concept de schéma utilisé en psychologie. L'essentiel de la théorie de Minsky dit que quand une personne se trouve dans une nouvelle situation, elle doit sélectionner dans sa mémoire i.e structure de connaissances, un cadre référentiel. Pour s'adapter à un grand nombre de situation, un frame est très dynamique. Il peut être adapté et transformé en fonction des détails. L'approche dynamique de la pensée que l'on retrouve dans la théorie des frames peut être résumée de la façon suivante : un acte de pensée commence toujours par des images et des plans suggestifs, imparfaits qui sont peu à peu perfectionnés (voir même remplacés) dans le temps. Un frame est une structure de données représentant une situation stéréotypée. Les frames contiennent des informations comme la manière de l'utiliser, ce à quoi on peut s'attendre et ce qu'il faut faire si ce à quoi on s'attend n'arrive pas. Les frames sont des réseaux de nœuds et de relation dans un bloc. Au sommet se trouvent les choses générales (salle à manger) et en bas les choses particulières (couleur de la table). Des fonctions sont associées à tous les niveaux de frames. Des comportements par défauts sont implémentés (e.g. salle à manger suédoise peut être remplacée par une salle à manger campagnarde). Les comportements par défaut sont remplacés lorsqu'on obtient des informations. Un réseau discriminant permet de récupérer le (les) frame(s). Et un mécanisme de matching permet de vérifier quel type de frame correspond à la situation. Les frames sont limités comme les systèmes de production par l'axiomatisation (faits-actions). S'il y a beaucoup de faits, il y a beaucoup d'actions. Si les faits

changent alors de nombreux problèmes peuvent apparaître. Les frames fonctionnent par transitivité, ce qui peut poser des problèmes. Par exemple, Reims est près de Paris, Paris est près de . . . alors Reims est près de Shanghai.

Limite de ces approches

Les limites des réseaux sémantiques, des frames et des scripts viennent de l'interprétation des modèles en logique du premier ordre. Ils ne possèdent pas n'ont plus de référence conceptuelle. Il est difficile d'introduire des notions de point de vue ou de croyances.

Le raisonnement à partir de cas

Le raisonnement à base de cas est une méthode de raisonnement analogique. Il signifie raisonner à partir de cas ou d'expériences anciennes pour résoudre un problème, critiquer des solutions, expliquer des situations anormales ou interpréter des situations.

Comme toujours en IA, certaines structures et certains mécanismes de connaissances sont à la fois utilisés pour interpréter une situation et pour agir. Le principal style de raisonnement à base de cas est utilisé pour la résolution de problèmes. Les solutions sont dérivées vers des problèmes nouveaux en utilisant des solutions anciennes comme guide. D'anciennes solutions suggèrent comment générer une solution nouvelle et peuvent fournir des avertissements concernant les erreurs à éviter. Ce raisonnement est utile pour la résolution de problèmes comme la planification de tâches, le diagnostic et la création d'objets.

Le raisonnement à base de cas est basé sur la capacité humaine à retrouver des cas appropriés dans la mémoire. Inversement, il est crucial de bien indexer le vécu pour pouvoir le retrouver plus tard quand le besoin se manifeste. Curieusement, les personnes ne sont pas très habiles dans ce travail de gestion. Une fois qu'on a retrouvé un cas similaire dans la mémoire, il faut l'adapter au nouveau cas et opérer un certain nombre de raisonnements. Pour le raisonnement analogique, les humains et notamment les experts du domaine concernés sont très forts. Le raisonnement à base de cas est toujours très performant par rapport à des méthodes plus analytiques quand une personne connaît bien le domaine et quand la situation ne permet pas une analyse détaillée de sa logique de déroulement.

4.3.4 Modèles fondés sur la modularité

Les modèles objets

Hypothèse cognitive

Les modèles objets n'ont pas pour origine une hypothèse cognitive. Ils ont été surtout développés sur des hypothèses informatiques pour des raisons de simplicité de programmation.

Description

Il existe deux familles de langages à objets :

- Les langages de programmation par objets (PPO), comme Smalltalk, C++, ou Java, reposent sur la notion d'objet comme entité regroupant une structure et un comportement, tous deux définis dans la classe de l'objet, et donc communs à toutes ses instances. La structure représente le " c'est fait comment " d'un objet. Pratiquement cette structure permet d'organiser les objets en un réseau dont les nœuds sont les objets et les liens sont les relations entre objets. Le comportement est l'aspect " sait faire quoi ", et est représenté par une batterie de procédures, appelées méthodes, qui sont déclenchées par envoi de messages explicites. Enfin, les classes sont organisées en une hiérarchie d'héritage permettant la définition par addition de structure et de comportement.
- Les langages dits " centrés objets ", ou aussi de " représentation par objets " (RPO) reposent sur des structures de frames [176].

Les acteurs**Hypothèse cognitive**

Les acteurs sont basés sur une inspiration plus ou moins psychosociologique de la notion d'acteur et de rôle. Un acteur joue un rôle prédéfini (négociateur, coordonnateur, acheteur, vendeur) et communique avec les acteurs avec qui il peut communiquer.

Description

Les acteurs sont des objets avec des boîtes aux lettres, des comportements de remplacement et des états. Pour fonctionner, ils possèdent donc :

- une liste d'accointance (ce qu'il connaît, i.e. les autres acteurs) ;
- une liste de communication (forme de message qu'il accepte) ;
- une liste de variables locales ;
- une boîte aux lettres (file) ;
- un comportement de remplacement (script).

La communication des acteurs est asynchrone, non-déterministe et par message. L'inconvénient majeur des acteurs est qu'ils sont difficiles à synchroniser.

4.3.5 Systèmes multi-agent**Hypothèse cognitive**

Le terme agent est utilisé de manière assez vague. Cependant, on peut dégager une définition minimale commune : " *On appelle agent une entité réelle ou abstraite qui est capable d'agir sur elle-même et son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents et dont le comportement est la conséquence des ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents.* " [91].

On peut distinguer deux types d'agents :

- Les agents réactifs : ce sont des agents pas nécessairement intelligents individuellement mais dont le comportement global est intelligent. L'exemple le plus manifeste d'organisation émergente est celle de la fourmilière. Alors que toutes les fourmis se situent sur un plan d'égalité et qu'aucune d'entre elle ne possède de pouvoir d'autorité, les actions des fourmis se coordonnent de manière que la colonie survive et fasse donc face à des problèmes complexes tels que ceux posés par la recherche de nourriture, les soins à donner aux œufs, la construction de nids, la reproduction, etc.
- Les agents cognitifs : ce sont des agents complets coopérant pour résoudre un problème. Dans ce cadre, les problèmes de coopérations ressemblent étonnamment à ceux de petits groupes d'individus, qui doivent coordonner leur activité et sont parfois amenés à négocier entre eux pour résoudre leurs conflits. Les analogies sont sociales et nombre de chercheurs dans ce domaine s'appuient sur les travaux de sociologie et en particulier sur la sociologie des organisations et des petits groupes.

Description

Les agents sont en fait des acteurs qui possèdent des buts et une connaissance de l'environnement. Ils fonctionnent différemment selon leur type :

- Les agents réactifs : des mécanismes de réaction aux événements, ne prenant en compte ni une explicitation des buts, ni des mécanismes de planification, peuvent résoudre des problèmes qualifiés complexes.
- Les agents cognitifs : ils possèdent un modèle de la(es) tâche(s) à accomplir (vue partielle), un modèle de l'environnement, des connaissances, une expertise, les informations nécessaires à la gestion des interactions avec les autres agents et son environnement. On dit que les agents sont intentionnels, i.e. qu'ils possèdent des buts, des plans explicites leur permettant d'accomplir leurs buts.

Au cours de ces dernières années, les systèmes multi-agents ont été un des domaines de recherche privilégiés en intelligence artificielle. A. Sloman a proposé une architecture d'un agent intelligent en plusieurs niveaux d'abstraction, intégrant plusieurs routes entre la perception et l'action, une mémoire de travail, ainsi que le parallélisme entre tâches [275]. Un certain nombre de modèles formels ont été proposés [195], tels que le modèle BDI (Beliefs Desires Intentions) [42, 7].

BDI

Le mode de raisonnement associé aux agents BDI s'inspire de celui de l'être humain, et Bratman [40] est à l'origine de la première formalisation de ce type de raisonnement pratique. Comme son nom l'indique, les trois concepts clés du modèle sont :

Les croyances : elles correspondent à l'ensemble des connaissances que l'agent croit avoir sur le monde qui l'entoure. Il s'agit d'un modèle incomplet, du fait de la limitation des capacités de perception de l'agent et de la volonté de traiter la dynamique des relations avec le monde ;

Les désirs : ils correspondent aux motivations de l'agent, ce qui correspond au moteur de l'action de l'agent ;

Les intentions : elles regroupent l'ensemble des plans exécutés par l'agent pour satisfaire ses désirs.

Lorsque l'agent veut satisfaire un désir, il recherche un plan le réalisant, dont les conditions d'application sont remplies. Le modèle de base d'un agent rationnel est :

```
Boucle infinie
  Observer le monde environnant ;
  Mettre à jour le modèle interne du monde ;
  Délibérer sur quel doit être le prochain désir à réaliser ;
  Raisonner afin de trouver un plan pour satisfaire le désir ;
Fin boucle
```

Un certain nombre de fonctions sont introduites, qui agissent sur les trois concepts de base. Ainsi la fonction *brf* (pour *belief revision function*) modifie l'état des croyances à partir du traitement des nouvelles données perçues. D'autres fonctions sont définies pour le filtrage des intentions (*filter(B, D, I)*) ou la planification d'action (*plan(B, I)*). M. Wooldridge décrit dans [334] un formalisme logique BDI intitulé LORA (Logic Of Rational Agent) qui étend la logique BDI introduite par Rao et Georgeff [245] en ajoutant la prise en compte du temps et des effets des actions. Il s'agit de modèles purement formels qui restent cantonnés à la modélisation logique abstraite du monde et qui sont très éloignés de la cognition incarnée située.

PECS

PECS [260] est un modèle développé pour la simulation du comportement humain dans un contexte social. PECS est l'acronyme de : **Physical conditions Emotional state Cognitive Capabilities Social Status**. PECS est présenté par ses auteurs comme une alternative au modèle BDI. L'objectif affiché de PECS est de prendre en compte des variables d'états physiques, émotionnelles, cognitives et sociales, afin de couvrir l'ensemble des niveaux comportementaux.

L'architecture peut être divisée en trois couches horizontales différentes. La couche d'entrée comporte les composants *Capteur* et *Perception* et est responsable du traitement des données en entrée provenant de l'environnement de l'agent. La couche interne est constituée par les composants *Physique*, *Emotion*, *Cognition* et *Statut social* et correspond à la modélisation de l'état interne de l'agent. Finalement, la couche de sortie est constituée des composants *Comportement* et *Acteur*. Les auteurs ne rentrent pas dans les détails des modèles permettant de décrire chaque composant, ils se contentent d'en donner les grands principes [315].

Les exemples présentés sont loin de couvrir la complexité des objectifs annoncés. Le premier modèle, intitulé le modèle d'Adam, décrit le comportement d'un individu solitaire évoluant dans un univers constitué d'une grille bidimensionnelle (12x12), dans laquelle il va pouvoir trouver des sources de nourriture et des cases marquées comme dangereuses. Ses actions sont relativement limitées : planifier, explorer, examiner, marcher, manger la nourriture trouvée et s'échapper. Le second modèle traite de manière

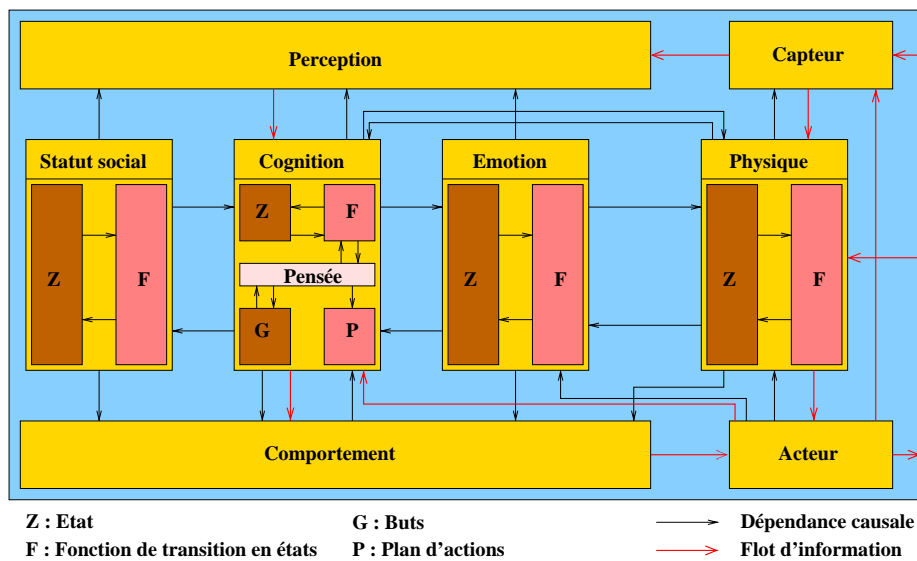


FIG. 4.3 – La structure d'un agent PECS.

abstraite de la notion de groupe et de la manière dont les agents forment ces groupes, travaillent ensemble et quittent un groupe. Les actions possibles d'un agent sont ainsi : choisir un groupe, rejoindre ce groupe, créer un groupe, quitter un groupe et démanteler un groupe.

Brahms

Brahms [4] est un langage orienté agent utilisé pour modéliser et simuler les activités humaines. Ce langage est issu des travaux sur la théorie de l'activité de J. Clancey présentés dans la section 3.5. Le langage est structuré autour des concepts suivants :

Agents et Groupes : description des agents, des groupes et de leurs relations. Chaque agent peut appartenir à plusieurs groupes. En définissant l'appartenance d'un agent à un groupe, il bénéficie ainsi des comportements de l'agent et de ceux liés au domaine d'activité du groupe ;

Objets et Classes : les objets sont des représentations d'artefacts dans le monde mais qui n'ont pas de comportement propre, ils réagissent seulement aux changements d'état du monde.

Croyances et Faits : les croyances sont liées aux agents tandis que les faits sont des états du monde communs à tous les agents. Chaque agent a un ensemble de croyances qui peuvent être changées par des événements tels que le résultat d'un raisonnement ou la réalisation d'une activité.

Activités : description des activités pouvant être effectuées par les agents. Celles-ci peuvent être décomposées en sous-activités. Un agent en train d'effectuer une

sous-activité est toujours engagé dans la méta-activité la contenant. Des mécanismes de suspension et de reprise d'activité existent. Chaque activité prend du temps pour se dérouler, et la durée d'une activité peut être fixée, choisie aléatoirement ou paramétrée par le résultat des croyances de l'agent. Il existe des activités unitaires ou primitives qui possèdent plusieurs caractéristiques [270] :

- une chaîne de caractère décrivant l'activité pour affichage
- une priorité,
- une durée minimale et une durée maximale,
- un booléen indiquant si la durée est choisie par tirage aléatoire entre les bornes minimale et maximale,
- les ressources utilisées.

Cadre de travail : à chaque activité est associé un état conditionnel. Si les conditions d'une règle font partie de l'état des croyances de l'agent, alors les activités qui lui sont liées sont réalisées. Le cadre de travail (*workframe*) permet de décrire de telles conditions.

Cadre de pensée : le principe est le même que pour le cadre de travail, sauf qu'aucune activité n'est associée aux conditions. Il s'agit ici de modéliser le déroulement d'un raisonnement et de décrire les conséquences associées à des préconditions et permettre ainsi de déduire de nouvelles croyances pour l'agent.

Géographie : description des lieux dans lesquels les agents vont effectuer leurs activités, ainsi que les parcours possibles entre lieux. Un changement de lieu est effectué par une activité de déplacement. Un agent peut aussi transporter des objets en utilisant les activités prendre et poser. Une relation d'appartenance permet de décrire la structure hiérarchique des lieux.

Voici un exemple décrit en utilisant le langage Brahms :

```
package projects.Atm;
group Student {
  attributes:
    public boolean male;
    public double howHungry;
    public int perceivedtime;
    public Diner chosenDiner;
    public boolean hasTakenCash;
  relations:
    public Account hasAccount;
    public Cash hasCash;
    public BankCard hasBankCard;
  initial_beliefs:
    (current.hasTakenCash = false);
    (Boa_Atm.location = BankOfAmericaUniversityBranch);
    (WF_Atm.location = WellsFargoUniversityBranch);
  activities:
    move MoveToLocation(Building loc) {
      priority: 1;
      location: loc;
    }
    primitive_activity FeelHungry() {
      priority: 1;
    }
}
```

```

    }
workframes:
  workframe wf_MoveToLocationForCash {
    repeat: true;
    variables:
      forone(Cash) cs;
      forone(Atm) at;
      forone(Bank) bk;
      forone(Building) bd;
    when( knownval(current hasCash cs) and
          knownval(at.location = bd ))
    do {
      MoveToLocation(bd);
      conclude((current.readyToLeaveAtm = false), bc:100);
    }
  }
}
thoughtframes:
  thoughtframe tf_ChooseBlakes {
    repeat: true;
    variables:
      forone(Cash) cs;
    when( knownval(current hasCash cs) and
          knownval(cs.amount > 15.00) and
          knownval(current.checkedDiner = false) and
          knownval(Campanile_Clock.time < 20))
    do {
      conclude((current.chosenDiner = Blakes_Diner), bc:100);
    }
  }
} // Student

```

Brahms semble adapté pour une description abstraite des tâches et de leur enchaînement mais il lui manque un lien vers le monde incarné situé de l'activité, dans lequel les acteurs évoluent et développent leur activité.

4.3.6 Modèles fondés sur l'automatisme

Hypothèse cognitive

L'informatique classique ne prend jamais en compte l'état global du monde. Elle conçoit un système comme un ensemble d'activité qui s'exécutent en parallèle et que le nomme processus. La notion de processus est difficile à définir. Pour le théoricien, comme Hoare (Hoare, 1985), un processus représente le comportement d'un objet. Pour l'automaticien, c'est un ensemble de tâches qui se déroulent séquentiellement ou en parallèle. Pour un informaticien, c'est un programme en cours d'exécution. L'intérêt de ce concept est de pouvoir décrire un comportement en ne s'intéressant qu'aux états initiaux et finaux d'actions considérées comme atomiques. Ces actions en s'exécutant donnent lieu à la production d'événements observables, la succession de ces événements permettant de définir un processus du point de vue de l'observateur. Les automates à états finis permettent de décrire facilement un processus, un automatisme ou le comportement d'un agent.

Description

Un automate à états finis est décrit par l'ensemble de ses états et par ce qu'on appelle sa fonction de transition qui spécifie l'état suivant en fonction de l'état actuel et des informations qu'il reçoit en entrée. On représente un automate à états finis sous la forme d'un graphe orienté dont les nœuds sont les états de l'automates et les arcs ses transitions. Sur les arcs on indique à la fois les événements qui le font passer d'un état à un autre et les actions qui doivent être entreprises lors de cette transition.

4.3.7 Conclusion

La modélisation du comportement humain en IA est un vaste champ d'étude. Les modèles IA nécessitent en principe une compréhension totale du processus à modéliser. La critique de l'IA montre qu'il s'agit ici d'un but trop ambitieux. De plus, un modèle IA doit être exécutable afin de pouvoir être testé intensivement. La plus grande faiblesse de la modélisation IA est sans doute la négligence très fréquente de l'environnement et de sa perception. En effet, les choix sont formulés et même faits selon la façon de percevoir un problème.

L'ensemble de ces modèles souffre de ce que l'on pourrait appeler une désincarnation des acteurs ainsi que d'une vision très abstraite du monde les environnant. Les modèles développés dans le cadre de l'IA sont difficiles à appliquer pour modéliser des comportements d'humains virtuels autonomes. Car en IA l'accent est mis sur le raisonnement et la prise de décision et moins sur les comportements perceptibles intégrant la composante sensori-motrice. De plus, les modèles développés en IA ne permettent pas toujours de satisfaire la contrainte temps réel des environnements virtuels.

Il est à noter que SOAR est utilisée pour simuler le fonctionnement cognitif de l'agent virtuel STEVE (Soar- Training Expert for Virtual Environments, [140]). STEVE a la particularité d'être un agent virtuel, représenté sous la forme d'un humanoïde, et doté d'une architecture qui lui permet d'apprendre des procédures, de les démontrer une fois apprises, de guider, surveiller et assister des apprenants en expliquant les étapes de la procédure et leur justification. Le premier environnement virtuel exploitant STEVE représentait de façon réaliste certaines parties des bâtiments de l'US Navy, afin de former des ouvriers qualifiés aux tâches procédurales de maintenance des compresseurs [140]. Des développements en cours visent à intégrer STEVE dans des environnements pour l'apprentissage des missions de maintien de la paix. Ces travaux sont menés en collaboration avec des professionnels du cinéma. Ils visent à pourvoir STEVE de nouvelles capacités langagières et mettent l'accent sur la scénarisation et l'utilisation d'effets spéciaux pour engendrer des émotions chez les utilisateurs/spectateurs.

Le chapitre suivant s'attache plus particulièrement aux architectures utilisées en animation comportementale et fondées sur certains des modèles que nous venons de présenter.

4.4 Animation comportementale

4.4.1 Introduction

L'animation comportementale vise à aborder une dimension nouvelle de l'animation par ordinateur : l'animation de scènes tridimensionnelles complexes en contexte multi-acteurs. L'animation est constituée d'un ensemble d'objets dynamiques doués d'une certaine autonomie et dont les évolutions dépendent des interactions qui peuvent se produire sous des formes très variées. L'animation comportementale s'intéresse au comportement externe ou interne d'organismes vivants. Le but est de simuler toutes sortes d'individus vivants (plantes, animaux, et êtres humains). Les modèles comportementaux peuvent être classés en deux catégories :

- les modèles de transformation interne, provoquant des changements externes de l'objet (croissance de plantes ou modèle de muscle par exemple) ;
- les modèles d'animation externe, définissant le comportement extérieur d'un être, ses actions et ses réactions, de manière individuelle (animal, humain) ou collective (nuée d'oiseaux, banc de poissons, troupeau de mammifères, foules d'humanoïdes).

Dans les modèles de transformation interne, les relations entre l'entité et son environnement sont quasi inexistantes, l'élément important étant de fournir une perception la plus réaliste possible du comportement de la plante (croissance) ou de l'individu (animation faciale, musculaire). Dans les modèles d'animation externe, ce sont au contraire les relations entre les acteurs et leur environnement qui seront prépondérantes. Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous nous sommes focalisé sur la modélisation du comportement de personnages anthropomorphes appelés aussi humanoïdes virtuels. Nous ne présenterons donc pas dans cet état de l'art les modèles dits de *vie artificielle* liés à l'éthologie, ni les modèles de croissance de plantes. Nous ne présenterons pas non plus les travaux sur les agents conversationnels expressifs visant à offrir des modèles de communication gestuelle et verbale entre un utilisateur et des agents autonomes [80, 171]. Le lecteur intéressé trouvera dans l'ouvrage édité par Justine Cassel (MIT, États-Unis) [55] ainsi que dans le support de cours du SIGGRAPH'99 intitulé Smart(er) Animated Agents [24], un panorama récent des travaux de recherches sur ce sujet.

4.4.2 Les premiers travaux

On peut situer historiquement les premiers travaux à la fin des années 80 avec notamment l'article de C. Reynolds sur l'animation de nuées d'oiseaux [252]. Un premier ensemble d'approches a été étudié en parallèle dans la littérature, jusque dans le milieu des années 90, pour la définition du modèle décisionnel [74] :

stimulus / réponses : cette approche définit le comportement des objets à partir d'un ensemble de capteurs et d'effecteurs reliés entre eux par un réseau de nœuds intermédiaires transformant l'information passée. Ce type d'approche comprend les modèles de type réseaux de neurones [303, 332, 318, 213]. La manière dont un objet se comporte dépend de la perception qu'il a de son environnement et de

la manière dont cette perception est transmise à travers le réseau aux effecteurs qui produisent le mouvement des objets. Cette approche a l'avantage de pouvoir générer une quantité très importante de mouvements différents (choix du jeu de paramètres) mais reste par contre à un niveau d'abstraction très faible. De plus il s'agit de modèles de type boîte noire dans lesquels il est impossible de modifier le moindre paramètre sans avoir à reprendre le processus complet de configuration. De plus, le pourcentage de bons contrôleurs décroissant de manière exponentielle avec la croissance du nombre de paramètres à prendre en compte, il est illusoire de vouloir contrôler un mouvement complexe avec cette approche.

règles de comportement : comme l'approche précédente, l'approche par règles de comportement prend en entrée des informations restituant une certaine perception de l'environnement et produit en sortie un certain contrôle sur la motricité des objets. Ici, le comportement des objets est défini par un ensemble de règles [252]. Les comportements possibles d'un objet peuvent être représentés par un arbre de décision, chaque branche représentant un comportement différent. Une action satisfaisant les conditions de l'environnement courant sera choisie par l'application d'un algorithme de parcours d'arbre. Les comportements permis par cette approche sont d'un niveau d'abstraction plus élevé que l'approche précédente. Le cœur du problème dans cette approche réside dans la pondération des différents comportements. La solution la plus simple consiste à faire un choix implicite sur l'ordre des règles (suite de si ... alors ... sinon), mais cette solution ne permet pas la spécification de comportements complexes. Le parcours de l'arbre des possibilités avec pondération des branches permet de ne pas privilégier toujours la même règle, tandis que la prise en compte d'une hiérarchie d'experts permet de confronter plusieurs comportements concurrents, le choix final restant à l'expert de plus haut niveau. On peut ainsi utiliser la panoplie des algorithmes de parcours d'arbre de décision intégrant des fonctions d'évaluation des différentes branches (essais successifs, séparation et évaluation progressive, glouton, parcours ascendant, etc.) [60, 306]

automates d'états finis : l'automate définit les différents enchaînements possibles entre comportements [37, 293]. Cette approche trouve très rapidement ses limites dès qu'il s'agit de modéliser un comportement un tant soit peu compliqué. La modélisation du comportement d'un conducteur a ainsi montré la nécessité de passer à l'utilisation de plusieurs automates dont il faut définir l'exécution coordonnée.

Le constat que l'on peut faire de ces différents travaux est que ce sont des modèles ad hoc conçus pour être appliqués à chaque fois sur des cas particuliers, dans lesquels les objets et leur environnement sont relativement simples et les champs de perception et d'action limités. Il existe en outre une grande disparité dans les comportements permis par chacune des approches :

- soit le niveau d'abstraction est très faible et seuls des comportements de type réflexes pourront être spécifiés (approche stimulus-réponse),
- soit le niveau d'abstraction est plus élevé mais l'environnement est réduit, voire complètement défini, et donc la perception et l'action de l'entité sont d'un niveau très faible.

Ces modèles demeurent relativement simples, avec des champs de perception et d'action limités, et en outre ils ne prennent pas en compte l'aspect temporel, qui est primordial (mémorisation, prédiction, durée d'une action, séquençement de tâches). Afin de rendre compte de la complexité décisionnelle, il est nécessaire de traiter conjointement les aspects continus et discrets, de coordonner les comportements concurrents et de gérer leur structure organisationnelle, c'est pourquoi les deux premières approches ont été assez vite abandonnées au profit de l'approche à base d'automates d'états finis dans leurs versions parallèles et hiérarchiques : piles d'automates (EPFL, Suisse) [214], ensembles d'automates communicants (PaT-Nets) (Université de Pennsylvanie, Etats-Unis) [26], hiérarchie d'automates parallèles (HCSM) (Université d'Iowa, Etats-Unis) [5] et systèmes de transitions parallèles hiérarchisés (HPTS) (IRISA, France) [77]. Le modèle HPTS est le seul qui permette de traiter les aspects temporels et non déterministes et qui intègre un langage de spécification couplé à un générateur de code [199] et à un interpréteur. Du côté industriel, un produit (Motivate) a été commercialisé par la société Motion Factory (orientation jeux) pour la spécification du comportement à base de machines à états finis hiérarchiques (HFSM) [154] et il est maintenant intégré au sein du logiciel d'animation Softimage sous le nom de RTK Behavior.

4.4.3 HPTS : un outil de spécification de comportements réactifs

Partant du constat qu'un modèle comportemental réactif devait avoir les propriétés suivantes : réactif, concurrent, préemptif, hiérarchique, modulaire, flot de données, nous avons proposé un modèle formel pour la spécification de ces comportements [76]. Ce modèle intitulé HPTS (Hierarchical Parallel Transition System) peut être vu comme un système multi-agent à contrôle hiérarchique et aussi comme un système réactif, de type systèmes de transition parallèles hiérarchisés et qui est composé d'une hiérarchie d'automates parallèles. Chaque état du système peut être vu comme un agent recevant un flot de données en entrée, délivrant un flot de données en sortie et possédant un contrôle continu et discret. Guillaume Moreau, dans le cadre de son travail de thèse [200], a proposé une mise en œuvre du modèle HPTS, a réalisé un langage de programmation associé et a développé un compilateur permettant de générer du code équivalent en C++. Ce langage a ensuite été repris et étendu [75].

HPTS est un modèle de description de comportements qui mélange l'approche automate et l'approche multi-agent. Au sens automate, il s'agit d'un modèle de type automates parallèles hiérarchiques. Au sens multi-agent, il s'agit d'un système de type temps réel à contrôle hiérarchisé. Chaque état de chaque automate est un agent possédant un état interne, pouvant recevoir des stimuli et pouvant en provoquer en réaction. Le modèle propose une approche unifiée de type de flots : contrôle et données. Un état du système peut être vu comme une boîte noire recevant un flot de données en entrée, délivrant un flot de données en sortie et possédant un contrôle continu et discret (cf figure 4.4). Un état du système est soit un état terminal, soit un état composite.

À chaque état correspond un paramètre d'activité qui a trois valeurs possibles : *actif*, *suspendu*, *inactif* et des états transitoires : *début*, *termine*, *attend*, *repré*nd (cf figure 4.5). Les paramètres de contrôle permettent d'influer, par décision externe ou interne à l'entité, sur le comportement à adopter. Par exemple, un sous-état peut avertir l'état-père qu'il s'est auto-terminé, tandis qu'un état peut avertir un de ses sous-états

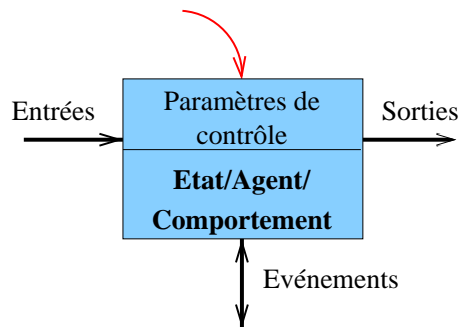


FIG. 4.4 – Un état d'HPTS.

qu'il doit débiter. Un bloc de code peut être associé tant aux états qu'aux transitions. Une fonction de filtrage gère la cohérence des actions proposées par les états actifs des différents sous-automates parallèles et fait une proposition cohérente qui est renvoyée à l'état englobant. Il existe deux modes de franchissement des transitions : dans le mode normal, on teste les transitions dans l'ordre de spécification et la première ayant une condition de franchissement valide sera choisie, tandis que dans le mode aléatoire, l'ensemble des transitions franchissables seront prises en compte et un tirage aléatoire sera effectué, prenant en compte les pondérations associées aux transitions. Un automate-père est toujours exécuté après ses automates-fils. Ce principe permet à des comportements de sélectionner et mélanger les propositions fournies par leurs automates-fils. Ainsi, des comportements concurrents peuvent tourner en parallèle et être arbitrés. D'autre part, deux modes d'exécution sont disponibles : le mode normal où une seule transition est franchissable par automate à chaque pas de temps et le mode TIMEGATE dans lequel les automates peuvent franchir plusieurs transitions lors du même pas de temps. Dans ce second mode, l'exécution au sein d'un cycle s'arrête lorsque plus aucune transition n'est passable ou que la dernière transition venant d'être franchie possède l'option TIMEGATE.

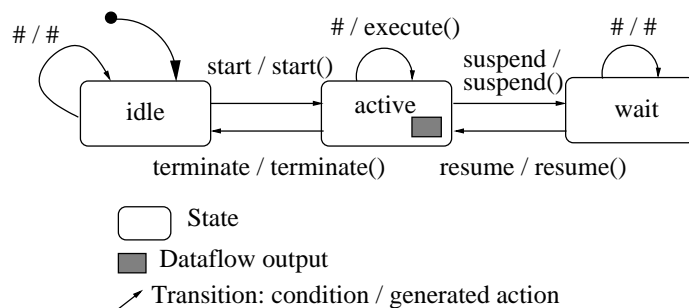


FIG. 4.5 – Les différents statuts d'un état.

Ce modèle a été utilisé avec succès pour modéliser le comportement de conducteurs de véhicules et de piétons. Des descriptions complètes de ces deux modèles sont décrites dans les thèses de Guillaume Moreau [200] pour le conducteur de véhicule et de Gwenola Thomas [294] pour le piéton. Le modèle HPTS a été utilisé et validé dans de nombreuses applications liées au domaine du transport (projet européen DIATS, projet SCE sur la simulation de tramway, projet PREDIT DELICE, ...). Dans le modèle HPTS, la coordination des comportements s'effectue au sein de la fonction d'intégration qui prend en compte pour un automate donné les propositions effectuées par l'ensemble des états actifs de ses sous-automates. La figure 4.6 montre des exemples de fonctions d'intégration sur des sorties numériques (vitesse) ou symboliques (action). Dans ce modèle, le contrôle est fait a posteriori sur les propositions d'action des comportements en cours, un feedback pouvant être renvoyé aux comportements pour qu'ils s'adaptent. Nous présentons dans la section suivante des travaux sur la sélection d'action.

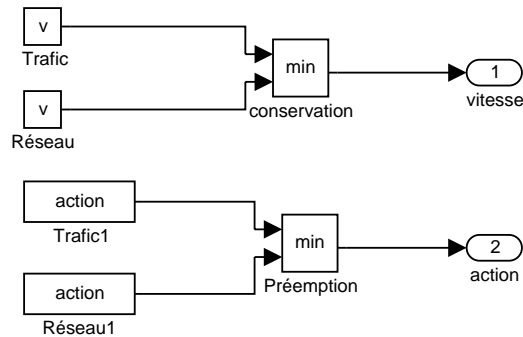


FIG. 4.6 – Exemple de fonction d'intégration sous forme de diagrammes-blocs.

4.4.4 Mécanismes de sélection de l'action

Selon Clancey [59], tous les comportements orientés buts ne sont pas obtenus par inférence ou compilation, mais des actions reproduisent simplement des motifs culturels et d'autres sont coordonnées sans délibération moyennant attention et adaptation. Une personne n'effectue pas du multitâche en parallèle, mais plusieurs tâches vont se dérouler en fusionnant attentivement plusieurs intérêts parallèles. Il est utile d'offrir un mécanisme permettant de dérouler des comportements en parallèle sans que l'utilisateur ait à synchroniser à *la main* leur exécution, et sans qu'il lui soit nécessaire, au moment de la description d'un comportement, d'avoir la connaissance de l'ensemble des autres comportements susceptibles de pouvoir s'exécuter en même temps.

Deux types de familles d'algorithmes de sélection de l'action existent : les approches coopératives et les approches compétitives (cf figure 4.7). L'approche coopérative permet de combiner plusieurs potentialités d'action, tandis que la seconde ne garde qu'une action parmi l'ensemble des actions potentiellement réalisables. La première approche, du fait de l'expressivité de la combinaison des actions s'exprime principalement par l'usage de fonctions arithmétiques sur des données de nature quantitative,

tandis que la deuxième approche grâce à l'utilisation de fonctions de coût couplées à des informations de nature plus qualitative va permettre de déterminer la meilleure action à réaliser selon le contexte. Au sein d'HPTS, nous proposons les deux approches à travers la notion de fonction d'intégration utilisable à chaque niveau de la hiérarchie. Il s'agit en fait d'une boîte noire programmable, et nous laissons ainsi au programmeur le choix de pouvoir faire du compétitif ou du coopératif, en fonction de la nature des comportements à traiter.

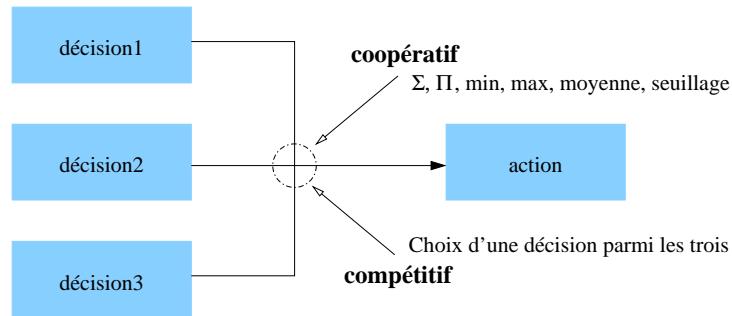


FIG. 4.7 – Mécanismes de sélection de l'action

En ce qui concerne l'approche compétitive, des algorithmes de sélection de l'action ont été proposés dans le domaine des systèmes multi-agents, la plupart étant des extensions de l'algorithme ASM (Action Selection Mechanism) de P. Maes (MIT, Etats-Unis) [178]. On peut citer l'algorithme de V. Decugis et J. Ferber (LIRMM, France) [70] qui s'intéresse à un problème intéressant : comment combiner réactivité et planification dans des applications temps réels (en l'occurrence la robotique). Ils ont ainsi proposé un ASM hiérarchique dans lequel les niveaux les plus bas concernent les comportements réflexes de base et les niveaux les plus élevés intègrent des comportements plus complexes (de la même manière que dans les modèles à base d'automates hiérarchiques). A chaque niveau un mécanisme d'arbitrage doit être utilisé pour choisir parmi les actions proposées par les ASMs parallèles. B. Rhodes a proposé lui aussi une autre extension des ASMs : il s'agit des PHISH-Nets [254]. Ce modèle autorise l'utilisation d'actions paramétrées et permet de définir des relations entre actions qui sont soit de type conflictuel (elles ne peuvent pas s'exécuter en même temps) ou de précedence (l'une doit avoir été effectuée avant les autres). Ces modèles permettent de faire de la planification réactive mais l'inconvénient concerne la spécification exhaustive de toutes les interactions possibles entre actions (hypothèse du monde clos). De plus il existe dans ces systèmes des cas pour lesquels aucune décision ne pourra être prise.

Fabrice Lamarche [162] a proposé d'automatiser le mélange des comportements en respect de leur importance relative, en utilisant l'approche coopérative du mécanisme de sélection de l'action. Pour illustrer la problématique de ce travail, prenons un exemple concret : une personne est devant une table, elle lit tout en buvant un café et en fumant une cigarette. Cette phrase décrit un comportement relativement simple pour un être humain, cependant en terme d'animation comportementale, il pose divers problèmes. D'une part, il est constitué de trois comportements « indépendants » qui

se déroulent en simultané : lire un document, boire un café, fumer une cigarette. Dans les modèles comportementaux décrits dans la littérature, simuler ce type de comportement est relativement complexe, il faut pouvoir les agencer de manière à respecter un certain nombre de contraintes telles que ne pas boire le café alors que l'on a une cigarette dans la bouche, ne pas manipuler une feuille de papier avec la main tenant la tasse de café. D'autre part, lorsque l'on dispose des trois comportements codés séparément sous forme d'automates, il n'est pas utile de recoder un automate spécifique à leur réalisation en simultané. L'objectif est de pouvoir les lancer et les laisser s'agencer automatiquement en fonction des circonstances, des envies et des contraintes physiques de l'agent. Les plus gros problèmes de synchronisation viennent de l'utilisation des ressources internes de l'agent. Par ressources internes, on entend la vue, les mains, les pieds, toute dépendance, physique ou non, limitant leurs déroulements en parallèle. Pour ce faire, trois nouvelles notions ont été introduites au sein du modèle HPTS :

ressources : par l'exclusion mutuelle sur l'utilisation de ces données (parties du corps, par exemple), cela permet de définir à tout moment l'ensemble des comportements compatibles et donc coordonnables ;

priorité : il s'agit d'un coefficient qui indique l'importance du comportement auquel il est associé dans un contexte donné. Ce coefficient peut illustrer soit l'adéquation (activation) soit l'inadéquation (inhibition) entre le comportement et le contexte. La priorité peut être définie dynamiquement et évoluer au cours du temps ;

degré de préférence : il s'agit d'une valeur numérique associée à chaque transition d'un automate. Cette valeur comprise entre -1.0 et 1.0 permet de décrire la propension de l'automate à utiliser cette transition lorsqu'elle est franchissable. Si la valeur est positive, la transition favorise la réalisation du comportement. Si la valeur est négative, cette transition ne favorise pas la réalisation du comportement, mais permet de décrire un chemin de libération de ressource ou de terminaison cohérente d'un comportement. Une valeur nulle n'influera pas sur le comportement.

Ce système permet de décrire les comportements de manière fine, avec toutes leurs possibilités d'adaptation. La description d'un nouveau comportement, grâce au mécanisme d'évitement des interblocages, ne nécessite pas la connaissance des comportements déjà décrits. La coordination de l'ensemble des comportements actifs devient ainsi générique et automatique. Une description complète de l'algorithme de coordination automatique est décrite dans la thèse de Fabrice Lamarche [161].

L'exemple du lecteur-buveur-fumeur cité en introduction a été réalisé et consiste en quatre comportements : boire, fumer, lire et manipuler les feuilles de papier. La figure 4.8 présente l'automate du comportement *déplacer un objet*, le comportement utilise plusieurs ressources : Hl (left hand), Hr (right hand), rHl (reserve left hand), rHr (reserve right hand), M (mouth) and E (eyes). Les ressources rHl/rHr sont utilisées pour gérer la réservation et le relachement des ressources Hl/Hr. L'ordonnanceur ne pouvant agir que sur la prochaine transition, et les mains étant des ressources nécessitant plus qu'un pas de temps pour être relâchées, un état utilisant seulement les ressources Hr/Hl est un état correspondant au comportement de libération de ces ressources. Le comportement a la capacité de s'adapter au contexte environnant. Par exemple si le comportement se trouve dans l'état *MoveAndWatch* et qu'un autre comportement a besoin du

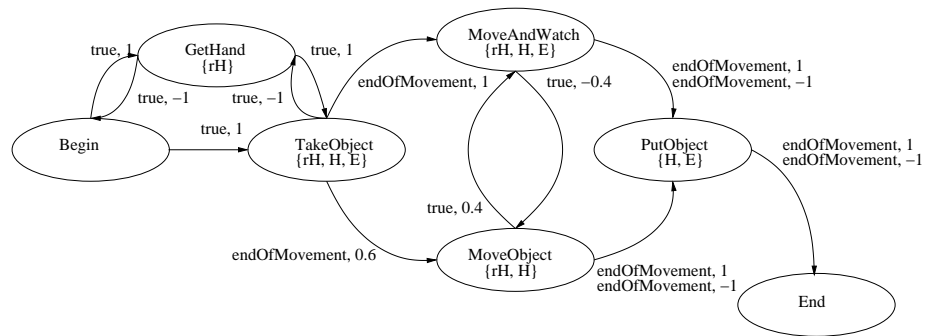


FIG. 4.8 – Comportement de déplacement d'un objet.

regard, la transition vers l'état *MoveObject* permet de libérer la ressource regard tout en continuant à effectuer le comportement, le regard n'étant pas une ressource fondamentale pour ce comportement entre les activités de préhension et de repose d'objet.

La figure 4.9 montre deux étapes du déroulement coordonné des quatre comportements, tandis que le tableau 4.1 montre l'activation des différents comportements au cours du temps.

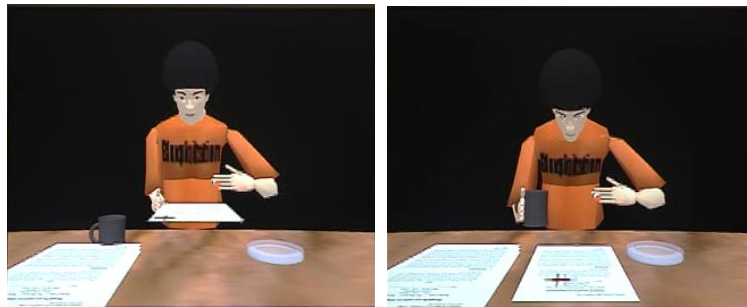
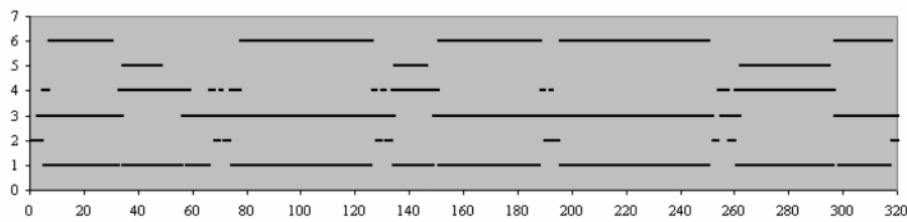


FIG. 4.9 – Coordination de plusieurs comportements.

Voici la légende des six activités :

1. lire le contenu d'une feuille de papier ;
2. déplacer la feuille de papier ;
3. fumer avec la main gauche ;
4. boire avec la main droite ;
5. manipuler la feuille de papier avec la main gauche ;
6. manipuler la feuille de papier avec la main droite.

Ce modèle HPTS++ a été jugé par un des rapporteurs de la thèse de Fabrice Lamarche comme une technique pouvant devenir une véritable référence dans la communauté. HPTS++ a été déposé à l'APP et a fait l'effet, dans le cadre du projet RIAM



TAB. 4.1 – Activation des différents comportements au cours du temps.

AVA MOTION, d'une intégration dans une plate-forme industrielle intitulée AVA (pour Agent Virtuel Autonome) développée par la société Dæsign. Il est aussi utilisé par d'autres personnes dans le projet SIAMES comme langage de programmation des comportements de personnages autonomes ou d'objets réactifs.

4.4.5 Approches cognitives

Les systèmes purement réactifs ne sont pas suffisants pour décrire l'ensemble des comportements, notamment au niveau rationnel et sociaux. Il est ainsi nécessaire de décrire spécifiquement les comportements cognitifs. Les modèles cognitifs s'intéressent à la représentation des connaissances d'un acteur (croyances, intentions). Les intentions permettent à un acteur de raisonner sur son état interne et sur celui des autres. Le centre d'un tel agent délibératif est sa propre représentation du monde qui inclut une représentation de son propre état mental et de celui des acteurs avec qui il est en interaction. Pour faire cela, Badler et al (Université de Pennsylvanie, Etats-Unis) [26] ont ajouté aux niveaux contrôle de tâche (SCA) et réactif (PaT-Nets) un planificateur qui, à partir de l'interrogation d'une base de connaissance, à travers le filtre d'un capteur de perception, va élaborer un plan et déterminer l'action à effectuer.

J. Funge a proposé un langage de modélisation de la cognition (CML), fondé sur le calcul situationnel, issu de travaux en intelligence artificielle [100]. Cette approche permet de raisonner sur des actions représentées de manière abstraite et de leur effet sur le monde (ce qui nécessite de modéliser l'impact de chaque action sur le monde). Avec ce modèle, il est possible de spécifier des buts à atteindre et de trouver une stratégie les satisfaisant, moyennant un temps de calcul assez important.

BCOOL est l'acronyme de *Behavioural and Cognitive Object Oriented Language*. Il s'agit d'un langage de description dont l'objectif est de modéliser la connaissance des agents et qui a été proposé par Fabrice Lamarche dans le cadre de sa thèse [161]. Dans un monde peuplé d'objets et d'agents, ce langage permet de définir les relations qui peuvent exister entre eux. S'inspirant des affordances de Gibson [106] et des Smart Objects de Kallmann [142], ce langage permet de décrire dans l'objet les comportements d'interaction possibles avec celui-ci. Ces possibilités d'interaction sont ensuite intégrées dans le modèle de raisonnement. La figure 4.10 présente l'architecture générale de BCOOL. La description effectuée dans le langage BCOOL est compilée pour être transformée en une base de données décrivant le monde et les capacités d'interactions offertes aux agents. Cette base de données, qui ne contient que des informations

utiles pour le raisonnement, est chargée dans l'application. Afin de faire le lien avec le monde réel et les actions des agents, un tableau noir est généré, dont le but est de faire le lien entre les actions conceptuelles du monde du raisonnement et les actions réelles exécutables par l'agent, grâce à l'utilisation du langage HPTS++. Comme dans les modèles BDI, chaque agent manipule sa propre connaissance du monde et il s'en sert pour sélectionner des actions dont certaines peuvent être de chercher à acquérir des informations afin d'enrichir sa propre connaissance.

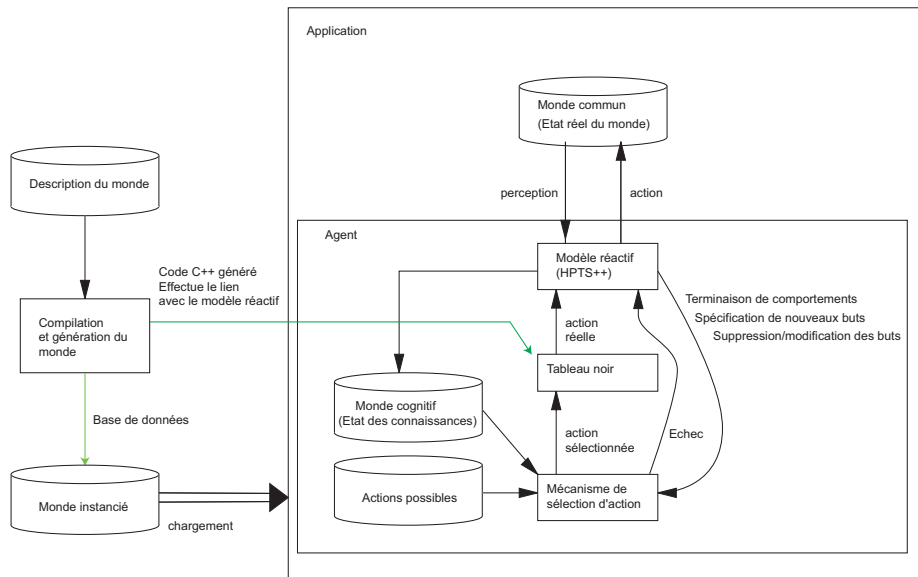


FIG. 4.10 – Architecture générale de BCOOL.

Deux mondes cohabitent dans BCOOL : le monde conceptuel et le monde réel. Le premier monde permet de décrire l'ensemble des catégories d'objets qui peuplent un monde virtuel et des possibilités d'interaction qu'ils offrent aux agents. Le second décrit un monde par l'instanciation des objets qui le peuplent.

Le monde conceptuel est décrit à l'aide de propriétés (faits) et de relations entre plusieurs objets (par exemple, *dans(objet, placard)*). L'ensemble des propriétés et relations définissent l'état du monde, cependant, leur valeur de vérité n'est pas forcément connue de l'agent. Les actions décrivent les comportements d'interaction qu'un agent pourra adopter vis-à-vis de l'objet. Afin d'être intégrées dans un mécanisme de raisonnement, ces actions utilisent un mécanisme de préconditions (conjonction de faits) et d'effets. Il est possible de spécifier dans l'action l'agent susceptible de réaliser l'action (notion de ciblage). Le monde réel consiste en la description des objets peuplant l'environnement, l'initialisation éventuelle de leurs propriétés et la description des relations vraies dans la situation initiale. La génération du monde est effectuée tout d'abord par une compilation du langage qui va produire deux fichiers PROLOG différents, l'un contenant la description des objets et relations du monde conceptuel tandis que l'autre

contient la déclaration des instances du monde réel. La base de données est ensuite produite grâce à l'utilisation d'un moteur d'inférence Prolog. La base de données pourra ensuite être utilisée en ligne en temps réel par le mécanisme de sélection d'actions. Le monde généré par le moteur d'inférence contient des faits et des actions. Les faits sont de trois types : propriétés associées aux objets, relations entre objets et applications. A chaque fait correspond une valeur de vérité contenue dans l'intervalle $[0..1]$, et décrivant l'état des croyances de l'agent sur le monde l'environnant. Si la valeur de vérité d'un fait est supérieure à 0.5, le fait sera supposé comme connu, tandis que si cette valeur est inférieure, elle est non fiable et nécessite d'acquérir des connaissances complémentaires sur le fait. Deux autres types d'information sont associés au fait : il s'agit de valeurs d'activation et d'inhibition comprises dans l'intervalle $[0..1]$ et décrivant la volonté de satisfaire ou non ce fait. Pour chaque fait, une fonction de satisfaction $sat(f) = activation(f) - inhibition(f)$ est utilisée.

Si $sat(f) > 0$, cela signifie que le fait doit être satisfait et donc qu'il faut provoquer l'exécution des actions qui provoquent l'ajout du fait. Dans le cas contraire, ce fait ne doit pas être satisfait. Les activations et les inhibitions des faits décrivent trois sortes de buts (fait à éviter, fait à réaliser et fait à maintenir). La notion de but évolué permet de prendre en compte des faits autres qu'atomiques, composés sous la forme d'une liste de faits à satisfaire. L'algorithme de sélection d'actions utilise un graphe de planification possédant deux types de noeuds (actions et faits) qui sont interconnectés grâce aux relations de pré- et de post-condition d'action. Ce graphe est ensuite mis en couches grâce aux informations d'activation et d'inhibition de faits. Cette mise en couche permet de représenter la distance entre les buts à atteindre et les faits considérés comme vrais. L'algorithme de sélection d'action peut ainsi trouver une suite d'actions à effectuer pour permettre la réalisation d'un but donné. L'algorithme complet est décrit dans la thèse de Fabrice Lamarche [161].

Il s'agit de résultats préliminaires mais prometteurs. En effet, l'algorithme tourne pour le moment sans être connecté au monde réel des actions physiques réalisées par l'agent autonome, la gestion des échanges d'information par tableau noir n'ayant pas encore été réalisée. Cependant des exemples concrets relativement complexes de sélection d'action ont pu être simulés avec notamment la recherche d'informations complémentaires lorsque l'agent ne dispose pas d'assez de connaissances pour réaliser le but à atteindre.

4.4.6 Les environnements informés

Aucun comportement n'a de sens sans la prise en compte du monde environnant le personnage. Il ne s'agit pas de modélisation géométrique classique, mais bien d'une modélisation spécifique des univers virtuels dans le but de pouvoir les peupler de personnages autonomes. En effet, il est nécessaire de représenter les éléments symboliques importants de l'environnement dans lequel les entités vont évoluer, éléments qui vont influencer sur leurs comportements. Afin de pouvoir reproduire des comportements plus complexes qu'un simple évitement d'obstacles dans un monde bi ou tridimensionnel, il est nécessaire de construire pour chaque entité dynamique un modèle mental de son environnement. Ainsi, pour reproduire des comportements réalistes d'entités au-

tonomes évoluant dans une scène synthétique, il est nécessaire de posséder d'autres informations que la seule connaissance de la géométrie de ladite scène. La définition des comportements consiste à définir le raisonnement et les actions des acteurs en fonction de leur environnement et de la perception qu'ils en ont. L'acteur voit ce qui se passe autour de lui, décide de son action en fonction de sa perception et de ses connaissances, agit sur lui-même (par exemple en apprenant une nouvelle notion) et sur son environnement (par exemple en ouvrant une porte). Il est donc en interaction constante avec son environnement par le biais de capteurs sensoriels et d'effecteurs agissant directement sur l'environnement. La simulation d'humanoïdes autonomes dotés de comportements sophistiqués passe par la prise en compte de l'environnement. En complément de la représentation géométrique de l'environnement, il est nécessaire de fournir pour chaque entité un modèle symbolique de son environnement, afin de pouvoir produire des comportements complexes. Nathalie Farenc [89] a proposé d'ajouter de l'information au graphe de description de la scène géométrique (en l'occurrence un fichier Open-Inventor). Dans cette approche, sont associées à la scène des informations sur des espaces de circulation et sur des points de passage ou d'action. Soraia Raupp Musse [207] a utilisé ces univers informés pour y contrôler l'animation de groupes d'acteurs et de foules. Selon Gibson [106], l'environnement offre à l'agent en mouvement des significations directement utiles pour l'action, des *disponibilités physiques perceptibles*, qu'il appelle les *affordances* [102]. Le concept d'affordance qualifie une relation entre un organisme et une action appropriée à la fois aux *opportunités offertes par l'environnement* et au *potentiel de l'acteur* [251] : un objet est susceptible d'être attrapé, un endroit peut constituer une bonne cachette, un événement peut causer un envol ou une approche, et un tiers peut être soit un ami ou un ennemi. Dans le cadre de l'animation comportementale, en associant de l'information symbolique aux objets de l'environnement, Widyanto a expérimenté la théorie de Gibson [330] : un système visuel capture les affordances de l'environnement en lançant des rayons parallèles dans le champ de vision. Kallman et Thalmann [143] ont proposé d'associer des affordances aux objets. Ils proposent un cadre de modélisation général pour la gestion des interactions entre un humanoïde et les objets de son environnement. Ils définissent des *objets intelligents* ; l'idée est d'associer aux objets toutes les informations nécessaires à la mise en œuvre des interactions entre l'objet et un opérateur. Grâce aux objets intelligents, le problème d'analyse de l'environnement pour exécuter des actions disparaît. En plus d'informations symboliques, des méthodes d'interaction sont associées aux objets. Le comportement d'une entité dépend de son espace d'évolution et de son action : suivre un trottoir, traverser une route. M. Relieu précise que la discrimination urbaine est utilisée pour la focalisation d'attention, afin de sélectionner les informations pertinentes pour les actions à effectuer dans l'espace courant tandis qu'une tâche secondaire permet d'observer ce qui se passe dans les régions connexes. Ces comportements d'observation ont été introduits en animation comportementale par Sonu Chopra à travers la gestion de trois types de tâches visuelles : perception endogène, exogène et oisive [56]. En adéquation avec la théorie de Gibson et plus précisément celle de M. Relieu sur les affordances spatiales positives et négatives, G. Thomas a proposé d'informer l'environnement urbain en caractérisant les espaces d'évolution, en prenant en compte leur configuration, les objets qu'ils contiennent et leur structuration méreotopologique [295]. L'environnement contient alors les informations nécessaires aux prises de déci-

sion des piétons et des conducteurs de véhicules.

4.4.7 Cartes cognitives spatiales

Certains travaux de recherche en animation comportementale se sont intéressés à la navigation réactive et à la planification de chemins optimaux dans des environnements virtuels. Cependant, ces modèles de planification ne tiennent pas compte de certains comportements observés lors d'expériences en psychologie cognitive (suivi d'itinéraires non optimaux, gestion de la perte de chemin dans l'environnement lors de la navigation, . . .), les humanoïdes modélisés étant omniscients. Afin de pallier ce manque de réalisme, il est nécessaire de développer des modèles de perception et de représentation de l'espace individualisés et parcellaires. Duckham et Kulik [84] proposent un algorithme de planification de chemin fondé sur le choix du chemin le plus simple et non pas le plus court. Des modèles issus de la robotique [157, 165, 336, 158] ont proposé des solutions pour remédier au manque de représentation globale de l'espace, en utilisant des modèles de cartes cognitives spatiales, issus de la psychologie cognitive. Jefferies et Yeap utilisent un modèle de mémoire pour l'environnement immédiat d'un agent intitulé MFIS (Memory For the Immediate Surroundings) [133].

Raubal et al. [246, 97] se sont intéressés à la simulation du comportement des usagers d'un aéroport. Pour ce faire, ils utilisent une architecture multi-agent, dans laquelle chaque agent est composé de trois capacités : percevoir, décider et agir. En ce qui concerne la perception, ils utilisent la théorie des affordances de Gibson (cf section 3.7). Un objet contiendra ainsi des affordances de deux types : information ou action. Un graphe de cheminement est utilisé, dont les nœuds sont des paires contenant des états de connaissance et des positions spatiales. Les arcs représentent des transitions, soit entre des états de connaissance, soit entre des vues. Ils décrivent en détail le scénario de passage du contrôle des passeports et du choix de chemin à l'issue de ce passage. Dans leur modèle la connaissance n'est qu'additive, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de perte ni d'altération de l'information, et ils ne traitent pas explicitement le fait d'être perdu.

H. Hochmair [126] décrit un modèle de construction itérative de la carte cognitive d'un agent et l'impact de l'état de la carte sur la décision d'un agent dans sa tâche de recherche de chemin. La procédure mentale d'un agent lors du processus de navigation est décomposée en étapes répétées jusqu'à ce que l'agent atteigne sa destination :

1. L'agent possède un état interne i_n contenant une carte spatiale cognitive, la position supposée de l'agent dans l'environnement, le chemin planifié et l'action planifiée.
2. A l'arrivée à une intersection, l'agent observe l'environnement restreint à son champ de vision.
3. Les géométries observées et stockées dans la carte cognitive sont comparées et peuvent mettre en évidence des différences.
4. Mise à jour de l'état interne de l'agent qui devient i_{n+1}
5. L'agent réalise l'action planifiée et met à jour sa position telle qu'il la suppose être. Le processus de navigation est terminé si la position actuelle correspond à la position de la cible.

Au cours de l'étape 3, si une différence est détectée, plusieurs causes peuvent être envisagées, parmi lesquelles l'omission d'information dans la carte mentale ou encore l'incohérence entre les données stockées dans la carte mentale et celles perçues. Quel que soit le cas de figure rencontré, cela donne lieu à la mise à jour de la carte cognitive spatiale de l'environnement.

C. Peters et al. [232] utilise un modèle de vision artificielle de type Z-buffer avec une faible résolution qui est couplé à un modèle de mémoire (modèle d'Atkinson et Shiffrin [18]). Leur modèle de mémoire à court terme contient ainsi un maximum de huit éléments à chaque pas de temps. Ils développent des exemples de recherches d'objets dans un appartement qui sont traités grâce à un comportement de scrutation et de recherche d'information. Il s'agit ici d'un double filtrage d'information (visuel et mémoriel) et non d'une vision abstraite topologique de l'espace.

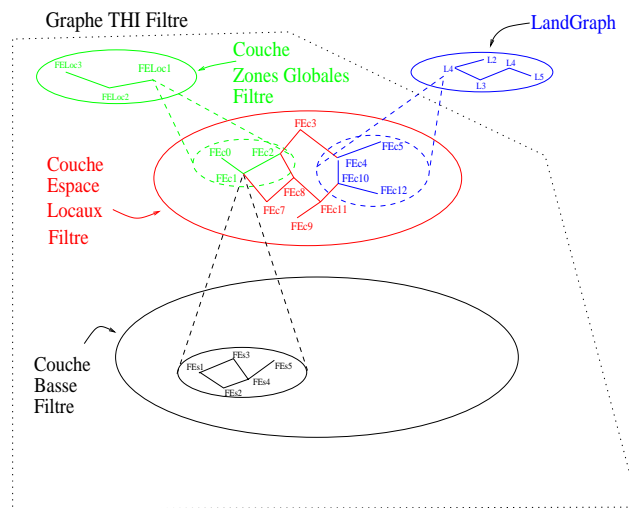


FIG. 4.11 – Structuration hiérarchique de l'environnement au sein de la carte cognitive spatiale.

R. Thomas a repris la notion de graphe topologique hiérarchique pour l'élaboration d'une nouvelle base de données urbaines [298], à laquelle il a ajouté une hiérarchie adaptée des travaux de l'urbaniste Kevin Lynch [173], qui définit les notions de nœuds et de quartiers, permettant d'inclure des informations cognitives partagées par le plus grand nombre de citoyens. Il a ainsi constitué les éléments permettant de gérer l'évolution de la représentation mentale que se fait un agent autonome de l'environnement dans lequel il évolue. Le modèle de représentation utilisé est un graphe topologique hiérarchique informé. Les différents modules gérant le comportement de l'agent vont extraire des informations de cette base de données à travers des requêtes dynamiques. A titre expérimental, la base de données utilisée est celle du centre-ville de Rennes, issue du projet DynamiCité qui a été étendue. Un connecteur topologique générique a été ajouté dans le but de relier le réseau routier à l'ensemble des immeubles. Ainsi il

est possible de regrouper un ensemble d'immeubles sous la forme de blocs ou d'îlots, utiles pour représenter le concept d'aire locale [230]. Le graphe topologique hiérarchique informé est composé de trois niveaux :

- Le niveau topologique basique qui contient l'ensemble des objets urbains réels ;
- Le niveau « espace composite» ;
- Le niveau «aire locale».

D'autre part, une autre information est contenue dans la carte cognitive, il s'agit des « landmarks » ou points de repère, qui sont des marqueurs spatiaux spécifiques à chaque humanoïde et qui correspondent à une ségrégation spatiale différente de celle des aires locales. La figure 4.11 présente la structure hiérarchique de la carte cognitive spatiale.

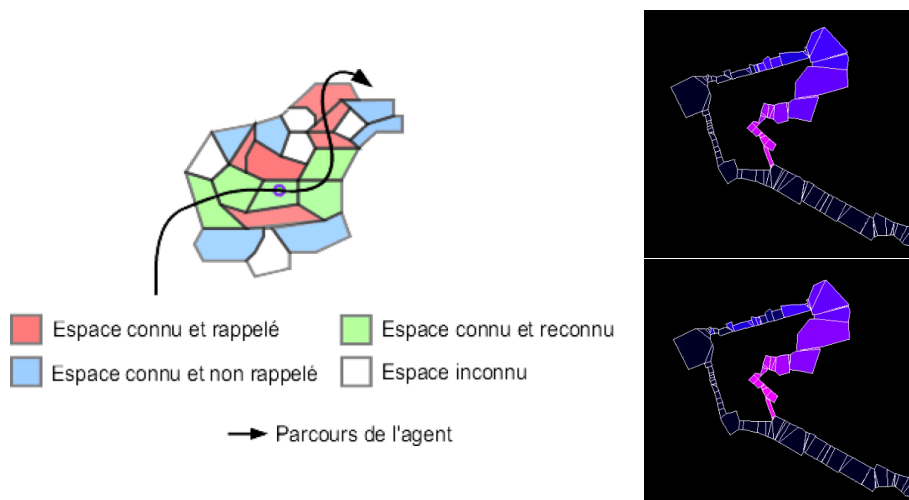


FIG. 4.12 – Evolution de la carte cognitive d'un agent au cours d'une navigation.

Ce graphe contient toutes les informations nécessaires pour la navigation réactive d'humanoïdes virtuels. Afin de prendre en compte une planification de chemin individualisée, il est nécessaire d'ajouter à chaque agent la notion de carte cognitive spatiale, à partir de laquelle il va pouvoir planifier un chemin grâce au rappel des éléments liés à des navigations passées et en complément des éléments perçus. Lors d'une navigation, les espaces de la carte peuvent avoir plusieurs statuts (cf figure 4.12) : inconnu, connu ou reconnu, rappelé ou non rappelé de la mémoire à long terme vers la mémoire de travail.

La carte cognitive spatiale en elle-même ne contient pas d'information précise sur la géométrie ni sur les propriétés sémantiques des objets contenus dans la base de données. Elle peut être vue comme un filtre sur les accès que l'agent peut avoir sur la base (cf figure 4.13), dans le sens qu'elle recouvre partiellement la structure topologique et sémantique de celle-ci, donne accès aux objets de la base qui ont d'ores et déjà été vus et rend invisibles les autres. Comme un piéton peut naviguer n'importe où dans la base, la carte cognitive associée croît au fur et à mesure de ses pérégrina-

tions. L'identification des objets rencontrés est stockée dans la carte ainsi qu'un lien vers l'objet réel dans la base de données. L'objet de la carte cognitive, appelé *objet filtré*, contient des paramètres mémoriels de rappel et de reconnaissance. Chacune de ces valeurs (comprise dans l'intervalle $[0..1]$) évolue au cours du temps. Cette évolution s'opère différemment selon la manière dont le personnage perçoit l'objet : perception endogène, exogène ou passive¹.

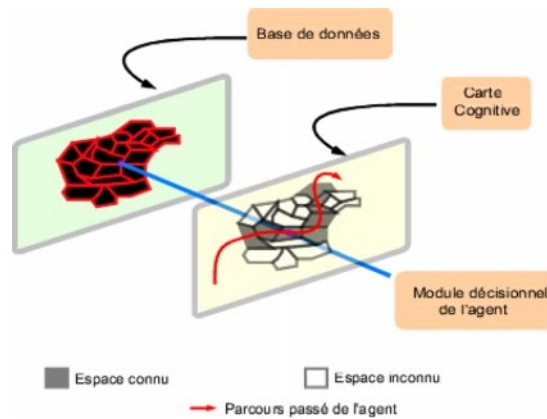


FIG. 4.13 – La carte cognitive spatiale comme filtre dynamique de la carte topographique.

Des simulations de navigation d'un piéton dans le centre-ville de Rennes ont été réalisées (cf figure 4.14). Chaque piéton planifie son chemin en utilisant l'algorithme de planification hiérarchique présenté par Mallot [331], en utilisant les espaces locaux dans l'aire locale d'influence et en remontant dans la structure hiérarchique dès que l'on sort de l'aire locale d'influence.

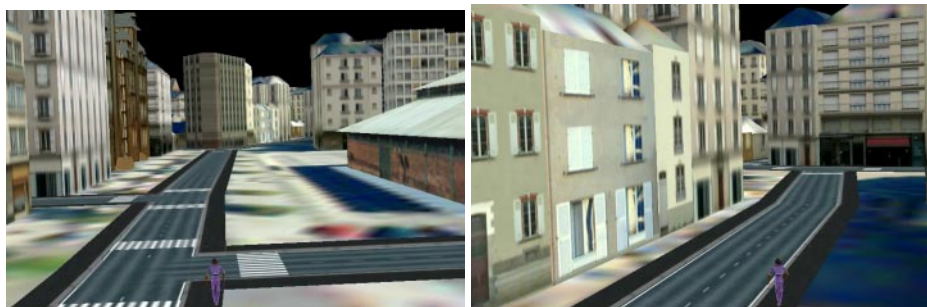


FIG. 4.14 – Navigation d'un piéton dans la ville.

Une description complète des modèles de carte cognitive et de mémoire spatiales peut être trouvée dans la thèse de R. Thomas [297].

¹Voir [298] pour une description détaillée du mécanisme.

4.4.8 Animation de foules

La simulation macroscopique a été historiquement la première approche utilisée pour simuler les déplacements de personnes, du fait de son faible coût de calcul. En effet, dans cette approche, le piéton n'est pas traité individuellement mais en tant qu'élément constitutif d'une matière plus macroscopique. Henderson [122] propose, dans le cas de faibles densités, l'utilisation d'un modèle gazeux assimilant les déplacements de personnes à ceux de molécules de gaz en faisant un parallèle sur leurs densités respectives. D'autres modèles ont été proposés comme le modèle hydraulique pour les foules à forte densité [16, 242], assimilant le mouvement de personnes dans un espace à celui d'un liquide dans un tuyau. D'autres modèles statistiques fondés sur un grand nombre d'observations ont été proposés. Ils donnent des équations sur le temps d'évacuation d'un immeuble en traitant séparément les zones de circulation horizontale et verticale [192, 228, 271]. Le lecteur intéressé trouvera une description détaillée de ces modèles dans l'étude bibliographique de début de thèse de Sébastien Paris [227] sur la caractérisation des niveaux de services et la modélisation des circulations de personnes dans les lieux d'échange.

Les systèmes à base de particules sont des systèmes physiques qui permettent de décrire des forces d'attraction et de répulsion pouvant être associées à des obstacles ou à des entités simulées. Les forces appliquées à une entité sont additionnées de manière à déterminer sa nouvelle direction. Ce modèle fait l'analogie entre le déplacement d'individus en forte densité, n'ayant quasiment pas de degrés de liberté dans leurs déplacements et l'écoulement de particules dans des compartiments. I. Peschl indique que cette modélisation est pertinente pour le cas où une forte densité de personnes est confinée et en état de panique [231]. Quand le flot se dirige vers une issue unique, un phénomène d'agglutination se produit et le débit de l'issue devient quasi nul [121]. Braun et al. [41] proposent une extension du modèle d'Helbing en ajoutant la dimension sociale de la connaissance d'autrui au sein du groupe : lorsque les entités se connaissent, elles peuvent s'entraider pour sortir d'une situation critique. Ils modélisent ainsi des forces d'attraction entre agents, pondérées par des facteurs d'altruisme et de dépendance². Les modèles à base de particules exhibent un comportement macroscopique réaliste dans le cas d'une densité de population importante. Cependant, ces modèles ne prennent pas en compte ni la perception visuelle, ni les règles sociales.

S. Goldenstein et al. [109] proposent une approche dynamique en trois couches pour modéliser le comportement de foules de personnages évoluant au sein d'environnements virtuels. La première couche, la plus locale, est un système dynamique non linéaire décrivant le mouvement de l'agent modélisé comme une particule par deux paramètres : son angle d'orientation et le module de sa vitesse. Les obstacles et les cibles définissent ainsi un ensemble de répulseurs et d'attracteurs. Des paramètres comportementaux comme l'agressivité sont pris en compte en utilisant une distance-seuil indiquant à partir de quelle distance un obstacle est pris en compte. La seconde couche dite environnementale consiste en une structure de données cinématiques maintenant dynamiquement les relations avec les objets en mouvement et les obstacles à l'aide d'une triangulation de Delaunay. La troisième couche permet d'avoir une vision glo-

²Il n'est pas certain qu'une personne perdue dans une foule en mouvement ait facilement la capacité matérielle de percevoir ses amis au sein de cette foule et d'interagir avec eux s'ils sont un petit peu éloignés.

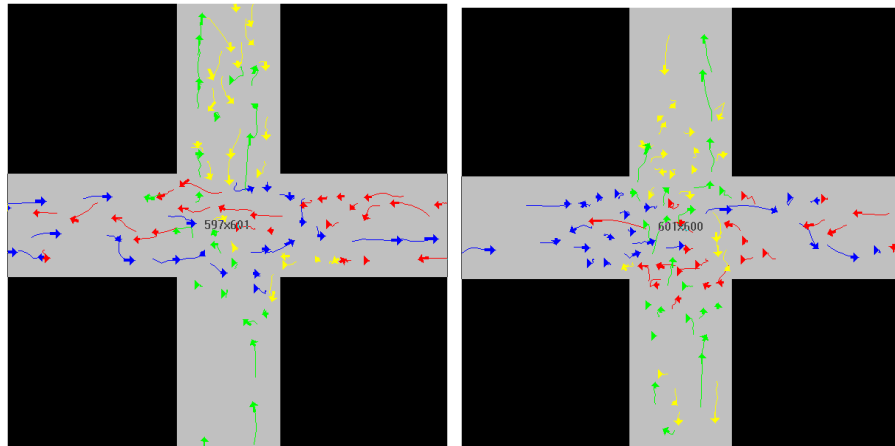


FIG. 4.15 – Flux de piétons à base de particules [121].

bale nécessaire pour planifier des tâches et déterminer ainsi l'orientation désirée pour s'approcher d'une cible.

Le modèle de nuée introduit par Reynolds [252] est un modèle à base de règles de comportement permettant de définir le comportement d'un oiseau en fonction du comportement des entités les plus proches. Il propose ainsi d'utiliser seulement trois règles pour définir le comportement d'un oiseau au sein de la nuée, tout en définissant un rôle particulier au meneur chargé de suivre une trajectoire :

- la séparation afin d'éviter d'éventuelles collisions avec les voisins ;
- l'alignement afin de réguler sa vitesse sur celle de ces voisins ;
- la cohésion afin de rester proche de ses voisins.

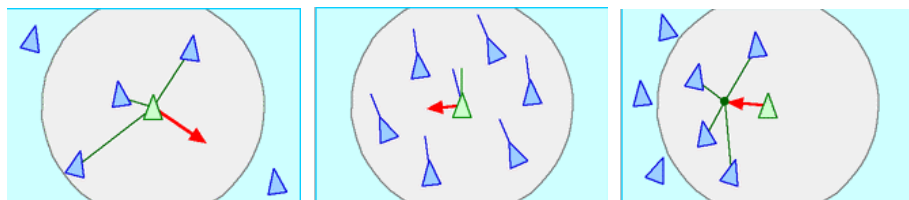


FIG. 4.16 – Les trois règles de base de Reynolds : séparation, alignement, cohésion [253].

Ulicny et al. [314] utilisent une approche en plusieurs niveaux pour modéliser le comportement d'un individu au sein d'une foule en combinant les approches à base de règles et d'automates d'états finis. Toutes ces approches sont confrontées au problème de la détermination des plus proches voisins, ce qui constitue un des goulets d'étranglement en ce qui concerne la détermination du nombre de piétons simulables en temps réel. Plusieurs approches ont été proposées pour optimiser ce calcul en utilisant des

structures de données telles que des treillis (bin-lattice) [253] ou des K-d arbres [216]. D'autres méthodes fondées sur l'exploitation de connaissances sur l'environnement informé ont été proposées [296, 89], permettant ainsi de modéliser des comportements qui utilisent la nature de l'espace de circulation [127] et sa localité³. Des études se sont focalisées sur les niveaux d'autonomie et de contrôle pour la simulation de foules, de manière à proposer des comportements réalistes de foules au sein d'environnements virtuels à un moindre coût calculatoire [209, 208]. Ainsi Soraia Raupp Musse a introduit dans sa thèse [207] différents niveaux de contrôle des foules : le guidage, la programmation et l'autonomie.

Dans le cadre du projet MAGS, les auteurs [206] s'intéressent à la simulation de plusieurs milliers de piétons dans une représentation discrétisée de la ville de Québec (cf figure 4.17). Ils traitent le problème du goulet d'étranglement du calcul de la perception en limitant la vision à un cône de 90 degrés de secteur angulaire et de 20 cellules de rayon (pour une carte 300x300).



FIG. 4.17 – Cône de vision limité et animation de foules au sein du projet MAGS [206].

Des travaux complémentaires ont été effectués sur l'optimisation de la visualisation en temps réel de foules en utilisant des imposteurs hiérarchiques [217] et des modèles d'ombrage temps réel d'imposteurs [292]. De manière à augmenter le réalisme des animations, Ashida et al. [17] ont effectué des analyses statistiques sur les déplacements des piétons le long d'un trottoir. Ils exhibent des actions subconscientes qu'ils intègrent dans leur moteur d'animation à l'aide d'un processus stochastique pour contrôler leur activation. Tsutsuguchi et al. [305] proposent un modèle de gestion de l'animation de foule dépendant de la distance à l'observateur : au delà d'une certaine distance à l'observateur, la position des piétons n'est pas mise à jour à chaque image mais à une fréquence moins élevée.

Dans le cadre de sa thèse, Fabrice Lamarche [161] a proposé une approche modulaire pour l'animation de foules en temps-réel fondée sur la prise en compte de quelques règles de comportement et sur un modèle de locomotion issu de la biomécanique. Un algorithme permet de construire automatiquement une représentation topologique hiérarchique de la carte 2D d'un environnement (pour un immeuble, une carte sera générée

³Principe de discrimination urbaine proposé par M. Relieu [251].

par étage). Une triangulation de Delaunay contrainte est appliquée à la soupe de polygones décrivant la géométrie des lieux, fournissant une première décomposition spatiale en cellules triangulaires. L'algorithme fusionne ensuite l'ensemble des segments interconnectés et colinéaires (à une certaine précision). Ce traitement permet d'obtenir l'ensemble minimal des segments extraits de la base de données initiales définissant l'espace de navigation. Afin de minimiser le nombre de cellules, un regroupement des cellules triangulaires est effectué pour obtenir des cellules convexes, dans lesquelles l'information des goulets d'étranglement les plus contraints va être conservée. Les cellules ainsi obtenues sont caractérisées en quatre familles (cellules closes, cul de sac, passage, carrefour) classifiées à partir du nombre de connections à d'autres cellules se faisant à travers des segments libres (porte de passage). Afin d'optimiser le calcul de la détermination de chemin dans la carte, un algorithme d'abstraction topologique est effectué, permettant de regrouper plusieurs nœuds, créant ainsi des graphes abstraits simplifiés. Chaque humanoïde virtuel est ainsi capable de planifier son propre chemin pour atteindre le but qu'il s'est ou qu'on lui a fixé. Un modèle de navigation réactive a été développé, dont l'architecture est modulaire. Un des éléments-clés de ce modèle est le graphe de voisinage calculé à l'aide d'une triangulation de Delaunay sur les positions des humanoïdes environnants et filtré grâce à des informations de visibilité extraites de la subdivision spatiale. A partir de cela, le processus de navigation réactive est décrit selon plusieurs étapes successives (respect de l'espace personnel, évitement de collision, sécurité) filtrant le vecteur vitesse de l'entité.

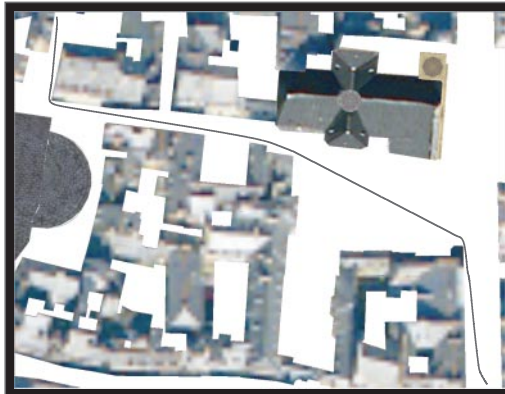


FIG. 4.18 – Un exemple de trajectoire suivie par un piéton dans le modèle 3d de la ville de Rennes.

Les performances obtenues en intégrant la restitution visuelle sont assez prometteuses. En effet, nous sommes capables d'animer complètement en temps réel environ 400 piétons sur un PC équipé d'un processeur XEON 3GHZ et d'une carte graphique quadro FX. En ne prenant en compte que le déplacement du centre de gravité (c'est-à-dire sans modèle de locomotion ni animation des articulations), environ 2000 piétons peuvent être animés pour une fréquence de rafraîchissement visuel de 10 Hz.

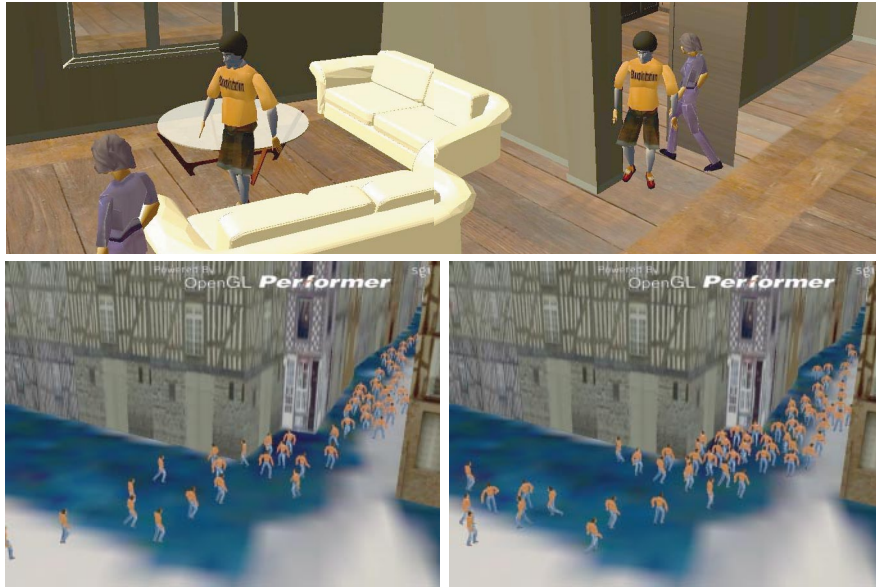


FIG. 4.19 – Navigation intérieure et extérieure.

4.5 Conclusion

L'état de l'art présenté recouvre plusieurs communautés : les sciences cognitives, l'intelligence artificielle et plus spécifiquement les systèmes multi-agent et enfin l'animation par ordinateur. Chaque communauté s'intéresse à la modélisation du comportement humain mais pour des problématiques assez différentes. Notre propre centre d'intérêt est devenu au fur et à mesure des années de tenter de proposer une architecture unifiée pour la modélisation du comportement d'agents autonomes. A l'instar de l'approche des chercheurs en sciences cognitives, il ne s'agit pas d'un cadre permettant d'étudier le comportement en lui-même, mais d'un atelier de modélisation de comportements crédibles et capables d'être exécutés en temps réel.

Chapitre 5

L'approche écologique pour la modélisation d'acteurs virtuels

5.1 Introduction

“La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l’informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d’entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l’intermédiaire de canaux sensori-moteurs” [99].

Dans ce cadre, nous étudions les différentes modélisations du comportement décisionnel d’acteurs virtuels autonomes et perceptifs en interaction entre eux et avec des opérateurs humains. Le modèle comportemental d’acteurs virtuels pour être crédible [29, 170] doit répondre à plusieurs contraintes. Les entités peuplant cet espace de simulation doivent être autonomes [179]. Elles doivent posséder une autonomie sensorimotrice [38] et une autonomie décisionnelle [333]. L’autonomie décisionnelle doit permettre le principe de substitution : un opérateur humain doit pouvoir prendre ou quitter le contrôle sensorimoteur de n’importe quelle entité à n’importe quel moment [299]. Elles doivent présenter une personnalité [172] et des mécanismes exprimant des émotions [274], avoir des désirs [39], des motivations [291] et des buts [255], pouvoir s’adapter à leur environnement [337], être capables de comportements sociaux [68] et utiliser un langage [13]. Elles peuvent utopiquement posséder les mêmes pouvoirs que le créateur de la simulation, notamment développer un esprit virtuel créatif [35]. Bref, la création d’humains virtuels interactifs est une entreprise colossale [111]. Une tentative de classification des différentes architectures d’entités autonomes cognitives, qu’elles soient virtuelles ou naturelles, est proposée dans [197]. Cette classification est réalisée autour du modèle *CogAff*¹ [276] dont le but est de tenter de consilier les travaux en informatique, en biologie et en psychologie.

La modélisation du comportement décisionnel des humains virtuels ne peut faire

¹ http://www.cs.bham.ac.uk/~axs/cog_affect/COGAFF-PROJECT.html

l'impasse sur la connaissance du sujet humain apportée par la psychologie [272]. Il existe deux grandes approches en psychologie expérimentale : la psychologie cognitive dont les applications en intelligence artificielle sont largement utilisées pour la modélisation des humains virtuels, et la psychologie écologique dont les concepts sont encore fortement éloignés des langages informatiques.

5.1.1 Positionnement de la psychologie écologique

Depuis ses origines liées à une réaction au behaviorisme, la psychologie cognitive s'est centrée avant tout sur les fonctions supérieures de l'être humain, telle que la résolution de problème qui fut longtemps le point de focalisation de nombreux travaux en intelligence artificielle à base de manipulations de symboles et de règles [212], qui ont inspiré des architectures pour les acteurs virtuels comme, par exemple, SOAR [210], ACT-R [10] ou les BDI [39]. La focalisation sur les activités supérieures de résolution de problème et le rapprochement avec l'ordinateur ont déterminé une vision de l'Homme comme étant un être éloigné des animaux et des processus biologiques qui le gouvernent. Dans cette approche computationnelle, la cognition existe indépendamment de l'environnement de l'individu. Au contraire, l'approche écologique en psychologie [105] propose d'observer ce sur quoi s'appuie et émerge l'adaptation d'un être vivant — qu'il soit humain ou non — en analysant l'interaction entre l'individu et son environnement, avant de formuler des modèles scientifiques (donc hypothétiques) sur comment l'information est intégrée par l'individu [321]. En cela, elle s'inspire du courant phénoménologique de la philosophie, qui remet en cause le dualisme cartésien classique d'un esprit conceptuel dirigeant le corps: la connexion de la pensée conceptuelle et du monde n'est pas effectuée par la déduction, comme disait ceux de la tradition classique, mais plutôt par l'expérience perceptive. La notion de *milieu perceptif*, introduite par le philosophe français Merleau-Ponty, exprime une relation perceptive originelle au monde qui est présupposée à toute construction scientifique [194].

La psychologie écologique considère en effet qu'un individu perçoit directement des invariants dans l'environnement, dits *affordances*, qui vont guider son activité sans nécessiter de traitements symboliques [103]. Ces invariants, propres à chaque individu, sont des combinaisons stables de plusieurs propriétés élémentaires provenant de l'environnement ambiant et de l'individu couplé à cet environnement par l'histoire de leurs interactions. Aussi, la perception de ces invariants est une action de la part de l'individu dite *perception active*, plaçant ainsi la perception et l'action au centre de la boucle de coordination sensorimotrice, plutôt qu'à ses extrémités [72]. Ces deux courants de pensée — la perception directe et la perception active — sont aujourd'hui réunis en ergonomie cognitive autour de modèles à différents niveaux de contrôle cognitif [125], permettant d'articuler les représentations mentales avec une origine sensorimotrice [118]. Tout en bénéficiant des apports des sciences cognitives [101] avec une affinité particulière pour l'approche éactive² de la cognition [320], les recherches de cette branche de la psychologie étudient le sujet humain (qui perçoit, parle, pense,

²**éaction** : conviction selon laquelle la cognition, loin d'être la représentation d'un monde prédonné, est l'avènement conjoint d'un monde et d'un esprit à partir de l'histoire des diverses actions qu'accomplit un être dans le monde [188]. L'éactivisme, avec le cognitivisme et le connexionnisme forment les trois principales écoles des sciences cognitives.

apprend, a des émotions. . .) qui réalise des tâches dans une situation de travail et qui utilise des outils pour réaliser ces tâches. Ces recherches ont pour but d'utiliser cette connaissance particulière du sujet humain pour améliorer la situation de travail ou l'outil de travail [304]. Appliquée à l'activité de modélisation des humains virtuels, l'outil de travail est le système de réalité virtuelle et il s'agit d'en améliorer les interfaces facilitant l'expérimentation participative des modèles en interaction entre eux et avec des opérateurs immergés dans le système par la triple médiation des sens (perception), de l'action (expérimentation) et de l'esprit (représentation).

5.1.2 Organisation du chapitre

Nous étudions dans ce chapitre les modélisations de la décision d'acteurs virtuels autonomes et perceptifs s'inspirant explicitement de l'approche écologique en psychologie expérimentale. Cette branche de la psychologie est souvent mal connue et relativement peu utilisée pour modéliser la décision d'êtres virtuels. La prochaine section présente le courant de pensée de la perception directe qui a donné une demi-dizaine de modèles décisionnels d'entités virtuelles autonomes et perceptives (section 5.2). La section 5.3 décrit le courant de pensée de la perception active basé sur une capacité de simulation de comportements sans utiliser de raisonnement symbolique; si cette approche est utilisée de plus en plus couramment par la communauté de la robotique, elle n'a donné lieu qu'à de très rares modèles en réalité virtuelle. Puis, dans la section 5.4, nous appliquons les idées de l'ergonomie cognitive à l'activité de modélisation des humains virtuels, comme un cas particulier de la modélisation des systèmes complexes pour leur simulation participative. Enfin, la section 5.5 de conclusion établit un bilan sur les modèles décisionnels du comportement d'humains virtuels selon l'approche écologique et donne des pistes de recherche en guise de perspectives.

5.2 Perception directe et affordances

Nous commençons par présenter la notion d'affordance à l'origine de la psychologie écologique dont la conviction principale est que la cognition peut s'abstenir de représentations symboliques. Nous décrivons ensuite les quelques modèles d'acteur virtuel conceptualisés autour de ce courant de pensée de la perception directe.

5.2.1 Les affordances de l'ergonomie cognitive

Initialisé par les travaux de James J. Gibson, le courant *perception directe* de l'approche écologique prône que les sens repèrent directement dans l'environnement les informations nécessaires à la survie. L'information est disponible dans le monde et il suffit de la saisir [105]. L'individu ne perçoit pas son environnement ambiant comme un ensemble de variables physiques exprimées scientifiquement comme par exemple des ondes acoustiques, lumineuses ou vibratoires, venant stimuler des capteurs auditifs, visuels ou tactiles. Ces propriétés physiques n'ont en elles-mêmes pas de signification pour l'adaptation de l'individu [104]. Au contraire, tout individu perçoit des caractéristiques d'ordre plus élevé, des invariants dans l'environnement qui lui permettent

d'estimer des transformations engendrées par l'environnement ou par le comportement de l'individu. Ces invariants sont des propriétés d'ordre supérieur dans le sens où il s'agit d'une combinaison stable de plusieurs propriétés élémentaires provenant de l'environnement ambiant et de l'individu. Une réinterprétation récente d'expériences basées sur des comportements résultant d'occultation sensorielle partielle, prouvent que la spécification dans la zone globale (perception directe [284]) est plus pertinente que la classique séparation des sens (théorie basée inférences [243]) pour expliquer les comportements observés ; il n'est pas nécessaire d'avoir des schémas d'interprétation demandant de réaliser des inférences sur des représentations symboliques [103]. En niant la nécessité des représentations, les Gibsonniens s'opposaient radicalement à l'idéalisme et au cartésianisme dominant les sciences cognitives des années 70. L'approche représentationnaliste considère, en effet, qu'il n'y a pas suffisamment d'informations dans les stimuli sensoriels et que des mécanismes d'inférences sont nécessaires pour réaliser la perception [185] : un principe empirique d'émergence (*bottom-up*) permet de construire des formes complexes à partir de parties élémentaires, tandis qu'un principe inverse (*top-down*) permet de reconnaître les formes globales par la médiation des connaissances *a priori* ou des croyances. On retrouve l'opposition épistémologique classique en sciences cognitives : les dualistes cartésien [94] ou épiphénoménologique [190] considèrent le rapport au monde d'un individu comme représentable indépendamment de l'individu et de son environnement, alors que les phénoménologistes [188] refusent l'idée d'une représentation indépendante de l'interaction de l'individu avec son environnement.

L'approche écologique cherche ainsi, à découvrir les *lois naturelles* permettant de rendre compte de l'appréhension de l'environnement par un organisme et de la façon dont celui-ci contrôle son activité par rapport à cet environnement [309]. Cette recherche privilégie les *lois naturelles* des relations organisme-environnement, plus que les *lois cognitives* qui agissent sur des représentations mentales [267]. Chez l'être humain, il a pu être montré expérimentalement, par exemple, qu'un individu pouvait estimer à la seule vue d'un passage étroit, s'il pouvait ou non le traverser sans tourner les épaules [328]. Aussi, on a montré que, pour estimer le moment de contact avec un obstacle, l'animal va se fonder sur *un invariant qui définit le temps avant collision comme une valeur inversement proportionnelle à la vitesse de dilatation de l'image de l'obstacle sur la rétine de l'animal* [8]. Selon que cette relation invariante entre l'obstacle et la perception de l'animal génère *un obstacle franchissable ou non (affordance)*, l'animal sautera ou contournera l'obstacle, et cela sans engager un traitement symbolique de prise de décision, mais sur la base d'une perception directe du caractère franchissable ou non de l'obstacle.

En ergonomie cognitive, la conception d'une situation de travail ou d'un outil passe par la spécification des affordances, en tant qu'éléments ayant une capacité suggestive directe d'action, qui vont structurer [159] le comportement de l'opérateur et augmenter [57] l'efficacité du travail. Concevoir un ensemble structuré de telles affordances, c'est concevoir une interface écologique [166]. En réalité virtuelle, par exemple dans le projet *Jack* [25], un acteur virtuel montre les affordances dans un poste de travail, en interaction avec un utilisateur du système de réalité virtuelle. La théorie des affordances est également utilisée pour concevoir des interfaces homme-machine multi-modales [6] ou immersives [313].

Nous examinons maintenant les modèles de décision pour acteur virtuel autonome et perceptif, s'appuyant sur cette branche de la psychologie écologique.

5.2.2 Modèles d'acteur autonome d'après la perception directe

Ce concept d'affordance, comme perception directe de l'environnement, est utilisé pour la modélisation du comportement décisionnel d'acteurs virtuels autonomes et perceptifs [62]. Dans ces modèles, le comportement d'un acteur est défini d'après une expertise de l'activité considérée; l'expertise étant menée pour caractériser des affordances naturelles à partir d'une combinaison de propriétés de l'environnement perceptibles par l'acteur lors de la sélection de l'action [61]. Les affordances sont attachées à des notions d'accessibilité absolue ou relative [204]. L'accessibilité absolue d'une affordance dépend des intentions de l'acteur, c'est-à-dire qu'elle mesure l'importance de cette affordance pour le but poursuivi par l'acteur. Tandis que l'accessibilité relative d'une affordance mesure à la fois sa perceptibilité par les capteurs virtuels de l'acteur, et son accessibilité motrice par les actionneurs de l'acteur virtuel. On peut distinguer deux types de modèles selon les choix des types de propriétés expérimentables dans le milieu perceptif des entités : les modèles mnémoniques externes et les modèles physiologiques internes.

Modèles mnémoniques externes

Dans les modèles externes, la notion d'affordance virtuelle pour un acteur correspond à une partie de sa mémoire sémantique. Cette mémoire est distribuée dans l'environnement sous la forme d'un marquage des objets de l'environnement spécifiques à chaque acteur et l'on parle d'*environnements informés* [296, 71, 78], d'*environnements annotés*, ou encore de "*smart environment*" [79]. À un instant donné, un acteur perçoit plusieurs objets affordants dans l'environnement. Chacun de ces objets est associé à des actions spécifiques de l'acteur qui peuvent se traduire en des émotions ou des mouvements selon la nature de l'affordance. La sélection de l'affordance initialisant l'action passe généralement par le choix de l'affordance offrant une plus grande accessibilité relative parmi un sous-ensemble d'affordances disponibles d'après le but poursuivi par l'acteur. La succession des buts d'un acteur est alors assuré par un scénario basé comportement (par opposition au scénario basé script [277]). On retrouve alors, pour la spécification de ces scénarii, des combinaisons des méthodes usuelles; c'est-à-dire l'approche automates cellulaires [44], l'approche sélection d'action [180, 258] ou l'approche éthologique [34] en fonction de la nature du marquage dans l'environnement selon qu'il soit lié à des rôles [129], des buts [255] ou des émotions [249, 87, 186].

Modèles physiologiques internes

Dans les modèles internes, les affordances virtuelles sont des combinaisons de propriétés physiques virtuelles effectivement perçues par l'acteur *via* la médiation de ses capteurs virtuels. Les propriétés mesurées dans l'environnement sont combinées et fuzifiées pour établir l'accessibilité d'une affordance. Dans [225], ces affordances sont

des concepts sensorimoteurs d'un graphe cognitif flou [155] résultant d'une expertise de l'activité considérée et pouvant intégrer des émotions ou des mouvements [301]. Dans le cadre du théâtre virtuel [120], à la suite du projet *Oz* [29], une expertise des affordances du metteur en scène de théâtre est à la base de l'ordonnanceur des unités d'actions (*Façade* [187]). L'utilisation des affordances (perception directe) est aussi appliquée en robotique pour la conception et l'implémentation d'un mécanisme de sélection de l'action chez un robot [14] et l'état de l'environnement, comme précondition nécessaire à une procédure, est explicité en termes d'affordances [281].

Ainsi, les créations d'entités virtuelles selon le courant de pensée de la perception directe passent par la spécification des affordances — en tant qu'éléments ayant une capacité suggestive directe d'action — qui vont structurer le comportement de l'entité et augmenter ainsi sa crédibilité en respectant une expertise de l'activité considérée, tout en permettant une simulation informatique efficace de son comportement. Concevoir un ensemble structuré de telles affordances, c'est concevoir un modèle écologique pour la décision d'un acteur virtuel autonome perceptif. On a distingué deux types de conception, selon le rôle mnémonique ou physiologique joué par l'environnement.

La prochaine section décrit le second courant de pensée d'origine plus physiologique.

5.3 Perception active et simulations

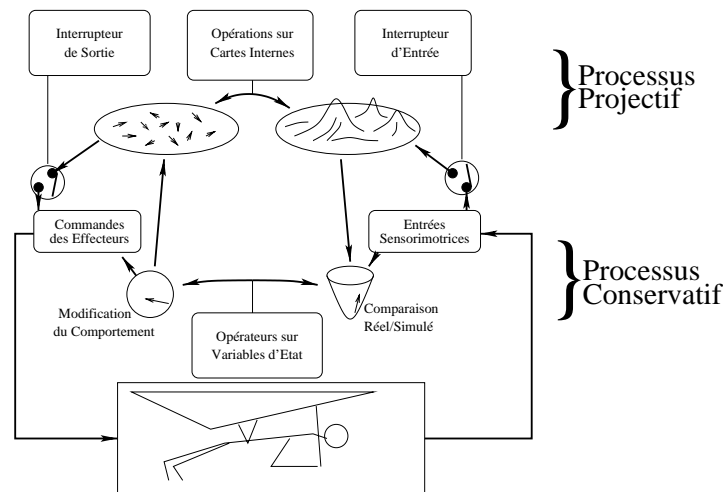
Tout d'abord, nous introduisons la notion d'anticipation telle qu'elle est mise en évidence par la neurophysiologie sous la forme de simulations biologiques internes à un individu. Les affordances deviennent les objets de ces simulations prédictive et leur existence effective est confirmée par les résultats des expériences sensorimotrices de l'individu dans son environnement. Puis nous étudions comment ces idées sont utilisées pour concevoir des entités autonomes perceptives.

5.3.1 Prédiction sensorimotrice en neurophysiologie

En psychologie, plutôt que de considérer la perception et l'action comme deux éléments distincts placés aux extrémités d'une boucle de coordination [90], les stimuli et les réponses peuvent être placés au centre de la boucle de coordination en un concept couplé, définissant la réalité d'une expérience relativement aux intentions et aux possibilités d'action de l'acteur [72]. Cette boucle sensorimotrice, prise comme une entité physiologiquement indissociable, explique la forte inscription de l'individu dans son environnement [32]. Les contraintes posées par cette boucle peuvent servir de base pour expliquer le fonctionnement de mécanismes supérieurs s'inscrivant dans l'espace représentatif, permettant à un individu d'imaginer le monde réel à partir de la simulation de perceptions et d'actions [64]. On retrouve alors les conclusions du psychologue cognitiviste Roger N. Shepard, suite à ses travaux sur les rotations mentales appliquées à des formes en 2D ou en 3D ; le cerveau, en formant des représentations mentales, prend en compte des contraintes écologiques propres aux objets représentés

[268]. Ainsi, voir un verre d'eau lorsqu'on a soif, c'est déjà simuler les mouvements qu'il faut réaliser pour le boire. Autrement dit, le cerveau dispose de l'étonnante faculté de simuler une action sur l'environnement extérieur.

La sensation du mouvement correspond ainsi à une fusion multi-capteurs de différentes informations sensorielles. Mais ces informations multisensorielles sont elles-mêmes combinées à des signaux en provenance du cerveau qui contrôle la commande motrice des muscles [221]. Selon Alain Berthoz, neurophysiologiste, la perception n'est pas seulement une interprétation des messages sensoriels: elle est également simulation interne de l'action et anticipation des conséquences de cette action simulée [33]. C'est le cas du pilote d'un deltaplane qui s'envole (figure 5.1): le deltiste déroule mentalement, de façon prédictive, l'envol en même temps qu'il s'envole et vérifie de temps en temps, par intermittence, l'état de certains de ses capteurs.



Lors d'une action, le cerveau utilise neurophysiologiquement deux modes en parallèle. L'un prédictif ou projectif simule le mouvement sans l'exécuter pour en prédire ses conséquences, choisir la meilleure stratégie et sélectionner épisodiquement certaines variables sensorimotrices. L'autre réactif ou conservatif fonctionne en continu comme un système asservi, utilise des primitives motrices et maintient les variables sélectionnées dans des bornes définies par les intentions d'action. Le cerveau perdrait trop de temps à vérifier en permanence l'état de tous les capteurs.

FIG. 5.1 – Les deux modalités de contrôle du mouvement par le cerveau [81]

Cette capacité de simulation interne du mouvement a des fondements neurophysiologiques aujourd'hui bien établis. Un individu imagine ces prédictions non pas, par un

raisonnement logique sur des symboles abstraits, représentant du monde réel, mais par une simulation biologique où, grâce à des mécanismes inhibiteurs, *tout se passe comme si* l'individu agissait réellement [33]. Par exemple, pour la vision, le cerveau dispose d'une possibilité d'imaginer des déplacements du regard sans les exécuter grâce à l'action de neurones inhibiteurs qui ferment le circuit de commande des muscles oculaires: en fixant un point devant soi, et en déplaçant son attention, sorte de *regard intérieur*, on a effectivement la sensation d'un déplacement du regard d'un point à l'autre de la pièce. Ce déplacement virtuel du regard a été simulé par le cerveau en activant les mêmes neurones, seule l'action des neurones moteurs a été inhibée.

L'anticipation du mouvement est bien illustrée par l'illusion de Kohnstamm, du nom du physiologiste qui a étudié pour la première fois ce phénomène. Lorsqu'on maintient en équilibre un plateau chargé d'une bouteille, le cerveau s'adapte à cette situation dans laquelle l'immobilité du bras est obtenue grâce à un effort musculaire constant. Si on enlève soudainement la bouteille, le plateau se soulève *tout seul*. En fait, le cerveau continue à appliquer cette force jusqu'au moment où les capteurs des muscles signalent un mouvement d'élévation. Si le porteur enlève lui-même la bouteille, le plateau ne bouge pas: le cerveau a anticipé et a provoqué un relâchement musculaire adapté à la variation du poids du plateau.

Ces processus de synchronisation neurophysiologique entre l'anticipation et la réalisation effective du mouvement ont été largement étudiés et mettent en cause l'hippocampe comme lieu privilégié de la synchronisation [48]; ce processus serait à la base d'un mécanisme neurophysiologique d'apprentissage [168], qui trouverait ses origines dans une oscillation de la concentration d'un neuromédiateur synaptique au niveau de neurones impliqués dans le contrôle de la synchronisation, ce neuromédiateur inhibant l'apprentissage au fur et à mesure que le temps passe après la synchronisation des informations sensorielles avec l'anticipation d'action [146].

Le principe de *perception active* résume la manière dont la perception et l'action sont intimement liés en une même entité [222]. Le cerveau peut ainsi être considéré comme un simulateur biologique qui prédit en utilisant sa mémoire et en faisant des hypothèses sur le modèle interne du phénomène.

Dans cette optique, les affordances constituent des contraintes directes sur le système moteur, plus que des éléments propres à la perception [46]. L'espace des affordances fournit ainsi un cadre pour penser l'action et les contraintes qui déterminent ce qui peut et ce qui doit être fait [93]. Si l'affordance permet d'anticiper un comportement, la véritable information est dans le feed-back de l'action effective, comme une sorte de réponse à une question qui est posée à l'environnement par le système moteur durant son activité.

Dans certains contextes, comme celui d'une exploration d'un environnement aux propriétés nouvelles, un individu adulte peut se laisser guider par les affordances directement perceptibles sans extraire la structure conceptuelle du problème pourtant résolvable par des enfants dès l'âge de 7 ans [202], tandis que dans d'autres contextes (environnement naturel), cette structure est extraite sans difficulté. Ceci met en relief le fait que l'affordance est avant tout un support apportant plus ou moins de degrés de liberté au champ d'action d'un individu. L'information véritablement signifiante pour l'individu relève des rétroactions générées par l'action sur ce support.

Ainsi, la création d'une nouvelle interface écologique relève, non pas d'informations présentées de manière ergonomique, mais de l'affichage d'un champ d'action plus ou moins riche à la disposition de l'utilisateur et renvoyant des feed-back adaptés aux buts de l'utilisateur [205].

Nous étudions maintenant les modèles de décision pour entité autonome et perceptive, s'appuyant sur ce principe d'anticipation sensorimotrice.

5.3.2 Modèles d'entités autonomes d'après la perception active

Cette notion d'affordance sensorimotrice a alors pris une place importante dans le domaine de la robotique [82] et des animats [112]. La modélisation de la perception est décrite en termes de schémas orientés action [15] et l'architecture à inhibitions est présentée comme une solution au problème de la robotique temps-réel [45]. Aujourd'hui, de petits robots évitent des obstacles et poursuivent des cibles en mouvement selon un modèle écologique du flux optique [83]. La perception active est utilisée pour paramétrer la vision d'un animat afin de ne tenir compte que de ce qui est nécessaire à la réalisation d'une action [95]. On retrouve aussi une certaine notion de perception active — limitée à la seule perception du flux optique pour modéliser un comportement [330] — dans les cartes de saillances étudiées en neuro-cognition [28], et utilisées en robotique [177] ou pour la modélisation d'acteurs virtuels [63]. Un modèle d'hippocampe est utilisé dans des créatures virtuelles pour leur donner une capacité d'anticipation visuelle par estimation de trajectoire [130].

Un principe de simulation dans la simulation a été implémenté chez des acteurs virtuels autonomes, prenant leurs décisions selon des simulations internes de leur propre modèle de comportement (qu'ils utilisent pour la perception de soi et la perception des autres) et non selon des raisonnements symboliques. Ce principe est implémenté et appliqué dans le cas d'un chien de berger gardant des moutons [181] et d'un barreur virtuel [226]; il est à la base d'un mécanisme d'apprentissage par imitation chez ces acteurs virtuels autonomes [224]. Des recherches ont montré que cette capacité de décentration [193] par simulation prédictive des modèles de comportement des autres donne de meilleures performances pour la coopération entre des agents autonomes [259]. Certains auteurs, dont le but est la création d'une cognition artificielle au sein de robots, d'animats ou d'acteurs virtuels autonomes, proposent que le principe anticipateur de la perception active soit la base nécessaire à d'autres processus cognitifs comme l'attention, la préparation, l'intention, la motivation et les émotions [47].

Ainsi, alors que la communauté animats commence à généraliser l'utilisation de la perception active comme un paradigme de modélisation d'entités autonomes perceptives, les modélisations d'entités virtuelles s'inspirant de cette approche écologique du contrôle sensorimoteur par des simulations prédictives sans impliquer de traitement symbolique restent marginales. La différence provenant principalement de l'environnement des acteurs — environnement naturel pour les animats, environnement virtuel pour les entités virtuelles — on peut se demander si la modélisation des environnements naturels en réalité virtuelle est adaptée à ce type d'approche écologique.

5.4 Paradigme écologique pour humains virtuels

Dans cette section, nous examinons la démarche modélisatrice des humains virtuels sous l'éclairage de la psychologie écologique. Selon cette approche, le modèle d'humain virtuel ne peut être pensé indépendamment de l'environnement dans lequel il évolue. Or, à la différence du monde réel, le monde virtuel est un univers de modèles en interaction, incluant l'Homme dans la boucle : observation, expérimentation, modélisation. Non seulement, il faut modéliser des humains virtuels, mais il faut de plus modéliser l'environnement dans lequel ces humains virtuels improvisent entre eux et avec des opérateurs réel immergés dans le même univers virtuel. La réalité virtuelle peut alors être considérée comme un outil pour la cybernétique moderne [265], permettant de mieux appréhender la complexité de ces modèles en les faisant vivre dans une simulation participative.

Le cadre de la psychologie écologique propose de tenir compte d'un modèle de perception humaine pour spécifier les phénomènes qui doivent être modélisés dans un système de réalité virtuelle pour rendre compte de l'expérience humaine d'un environnement naturel. Typiquement, l'être humain observe certains phénomènes à partir desquels il détermine ses actions: les affordances. Ces éléments psychologiques servent alors de causalité finale vis à vis du modèle d'environnement et initialisent la méthode de construction du modèle en déterminant les phénomènes qui doivent être présentés pour réaliser l'immersion de l'Homme dans l'environnement. L'environnement virtuel est alors composé de modèles traduisant des représentations mentales des individus en interaction *via* le système de réalité virtuelle.

La notion de représentation mentale ou de mémoire sémantique, prend dans l'approche écologique un enracinement dans les capacités élémentaires d'adaptation par l'action d'un individu: une représentation mentale traduit la notion "*rendre présent par l'action*" [118]. Les connaissances profondes, par exemple selon lesquelles un individu comprend le langage, ne sont pas descriptives et abstraites à la base et construites à partir d'une analyse lexicale de relations arbitraires entre signifiant et signifié (sémantique lexical) ou bien à partir d'une analyse de l'articulation des signifiants entre eux (sémantique grammaticale). Ces connaissances sont plutôt fondées sur une évocation des propriétés des objets dont un individu peut faire l'expérience [203]. Le système de réalité virtuelle peut être considéré comme un outil pour la modélisation, et les phénomènes naturels étudiés seront les affordances du travail du modélisateur. Le système de réalité virtuelle permet alors d'expérimenter les modèles de ces phénomènes.

Une instrumentation écologique du système de réalité virtuelle doit donc pouvoir afficher un champ d'action le plus riche et le plus ouvert possible à la disposition de l'utilisateur du système, qu'il soit observateur des modèles, acteur parmi les modèles ou créateur des modèles et renvoyant des feed-back adaptés aux buts de l'utilisateur. Dans le cas de la modélisation, le but de l'instrumentation écologique est de réaliser une interface pour la simulation d'un système multi-modèles, qui auront été pensés comme pouvant prédire un résultat expérimental.

La complexité d'un tel système impose une approche locale des phénomènes [201] et une approche constructive des modèles de ces phénomènes [234]. En considérant une collection de modèles multi-échelles comme une affordance pour la simulation de la modélisation d'un environnement naturel, la méthode de *modélisation énaïve* [223]

propose de modéliser un environnement naturel pouvant comprendre des humains virtuels, comme un *système complexe énaactif* incluant l'Homme dans la boucle, l'Homme étant considéré au même niveau conceptuel que les entités qui réalisent l'environnement, qu'elles soient les modèles de phénomènes physiques ou des humains virtuels. Les convictions principales de cette thèse sont au nombre de trois et elles sont le fondement conceptuel de la méthodologie proposée.

1. **Principe d'intention.** Chaque idée est celle d'un individu, d'après ses expériences personnelles et choisir de modéliser telle idée est forcément lié à une intention de la part de l'individu, traduisant implicitement [317] ou explicitement [105] une certaine praxis humaine.
2. **Principe biologique.** Chaque phénomène (qu'il soit animal, végétal ou minéral) est modélisé en tant qu'entité autonome [320] et cela demande d'autonomiser les modèles associés [300] en définissant ses capacités de perception (aisthesis), d'action (praxis) et d'adaptation (poiesis).
3. **Principe écologique.** Le monde virtuel est un couplage né de l'interaction entre ces entités situées dans l'espace et le temps. Les interactions entre entités autonomes passent par la médiation d'un milieu structuré et le façonné par leurs propres activités, selon les principes de *perception active* [33] et d'*énaction* [188].

L'ensemble de ces trois convictions forme l'*hypothèse énaactive*, illustrant un exemple pragmatique d'*épistémo-praxéologie* [317] pour la modélisation interactive des systèmes complexes *via* le système participatif de réalité virtuelle. Ces hypothèses conceptuelles sont traduites en un modèle formel pragmatique dit *modèle énaactif* guidant le modélisateur, dans lequel sont formalisées les notions d'objet actif, d'entité énaactive et d'organisation énaactive. La formalisation fournit une méthode de modélisation des phénomènes naturels et d'instrumentation de ces modèles permettant au concepteur de simuler en réalité virtuelle le système multi-modèles à tout moment de la création par la médiation d'un langage orienté *entités énaactives* aidant le concepteur à respecter le formalisme du modèle énaactif. Cette méthode est illustrée par une mer virtuelle destinée à des marins et des océanographes.

Ainsi, un regard épistémologique sur la modélisation d'humains virtuels, orienté par la psychologie écologique demande de reconsidérer les places respectives de l'environnement, des entités virtuelles qui le peuplent, et de l'Homme observateur-acteur-créateur. Les modèles de décision d'humains virtuels ne peuvent être pensés indépendamment de l'environnement dans lequel ils sont immergés. L'environnement est structuré dynamiquement par la perception active (expérience perceptive répondant à une prédiction) des entités virtuelles ou réelles en interaction, et il est façonné par les actions de ces seules entités (principe d'énaction), dont la médiation par le système des actions de l'Homme (perception, expérimentation, modélisation). La réalité virtuelle, comme environnement de création, devient alors un terrain d'expérimentation, où des simulations participatives font vivre des idées formalisées (les modèles) provenant des intentions simultanées d'un ensemble d'individus, en synergie autour d'une problématique commune. L'ergonomie d'un système de réalité virtuelle se doit donc d'offrir

une interface (langage et simulateur) facilitant la construction itérative de ces modèles énatifs, spécifiques des simulations participatives de la réalité virtuelle.

5.5 Conclusion

On a distingué deux approches pour les modélisations d'humains virtuels s'inspirant de la psychologie écologique. La première est basée sur le courant de pensée de la perception directe et la seconde, sur celui de la perception active.

Nous avons présenté la notion d'affordance originelle de la psychologie écologique. Cette notion caractérise le courant de la perception directe, dont la conviction principale est que la cognition peut s'abstenir d'inférences sur des représentations symboliques. Les affordances sont des invariants dans l'environnement, propres à chaque individu, directement perceptibles sans effort cognitif et constitués d'une combinaison stable des propriétés perçues dans l'environnement. Les affordances d'un individu sont à la source de ses stratégies d'action. Les créations d'entités virtuelles selon le courant de pensée de la perception directe passent par la spécification des affordances — en tant qu'éléments ayant une capacité suggestive directe d'action — qui vont structurer le comportement de l'entité et augmenter ainsi sa crédibilité en respectant une expertise de l'activité considérée, tout en permettant une simulation informatique efficace de son comportement. Concevoir un ensemble structuré de telles affordances, c'est concevoir un modèle écologique pour la décision d'un acteur virtuel autonome perceptif. On a distingué deux types de conception, selon le rôle mnémonique ou physiologique joué par l'environnement. Le rôle mnémonique correspond à une utilisation des objets de l'environnement comme une mémoire sémantique distribuée de l'acteur virtuel. Dans le rôle physiologique, l'environnement est plutôt perceptible par des propriétés physiques qui sont combinées par fuzzification en des degrés d'accessibilité d'un ensemble d'affordances lié au contexte de l'action de l'acteur virtuel.

Ensuite, la notion d'anticipation telle qu'elle est mise en évidence par la neurophysiologie sous la forme de simulations biologiques internes à un individu est caractéristique du courant de pensée de la perception active. La perception active traduit l'idée d'un contrôle sensorimoteur par des simulations prédictives sans impliquer de traitement symbolique. Les affordances deviennent les objets de ces simulations prédictive et leur existence effective est confirmée par les résultats des expériences sensorimotrices de l'individu dans son environnement. Alors que la communauté animats commence à généraliser l'utilisation de la perception active comme un paradigme de modélisation d'entités autonomes perceptives, les modélisations d'entités virtuelles s'inspirant du principe de simulation (l'imaginaire de l'acteur virtuel) dans la simulation (l'environnement virtuel de l'acteur virtuel) propre à cette approche sensorimotrice restent marginales.

Enfin, nous avons regardé l'activité de modélisation des humains virtuels dans un système de réalité virtuelle avec les connaissances de l'ergonomie cognitive. La forte incscription de l'individu dans l'environnement propre à l'approche écologique demande de développer simultanément les modèles de comportement humain avec les modèles de leur environnement. La complexité d'un tel modèle, incluant l'Homme dans la boucle par la triple médiation de la perception, l'expérimentation et la modé-

lisation, demande de faire certaines hypothèses sur les modèles en interaction. L'hypothèse énaactive, selon laquelle les phénomènes sont modélisés en tant qu'entités autonomes interagissant par la médiation d'un milieu qu'elles structurent et façonnent elles-mêmes, offre une base de travail pour l'articulation des travaux sur la modélisation des humains virtuels. Cette nouvelle méthode s'appelle : la modélisation énaactive. Cette méthode participative de modélisation est conceptualisée, formalisée, instrumentée et appliquée dans le cas de l'animation de la mer au voisinage de la surface pour des marins et des océanographes.

Nous possédons ainsi les prémices d'une méthodologie constructive de modélisation des systèmes complexes incluant l'Homme dans la boucle, permettant l'expérimentation des modèles tout au long de la modélisation par leur simulation participative. Cette méthodologie place la réalité virtuelle comme une discipline charnière entre les sciences humaines, les sciences du vivant, les sciences exactes et les sciences de l'ingénieur ; c'est-à-dire le monde des idées des Hommes à partir desquelles les humains virtuels peuvent être construits.

Chapitre 6

Entités autonomes artificielles à base de LCS

6.1 Introduction

La vie artificielle s'efforce de recréer les phénomènes biologiques en utilisant les ressources de l'informatique. Parallèlement à ceux qui analysent les organismes vivants pour découvrir comment ils fonctionnent, la vie artificielle réalise des systèmes qui se comportent comme des organismes vivants. Parmi tous les outils disponibles se trouvent les systèmes à base de classifieurs qui permettent de contrôler des comportements dans un environnement dynamique. En utilisant une base de règle appelée système de classifieurs et en appliquant des principes d'apprentissage par renforcement ainsi qu'un algorithme génétique, on va donc obtenir un système adaptatif. La principale qualité d'un système de classifieurs repose sur sa capacité d'adaptation, c'est-à-dire qu'il est capable de faire évoluer ses connaissances en fonction de l'état de son environnement. Les premiers systèmes de classifieurs ont été mis au point par Holland [136] puis finalisés sous une forme plus commune appelé LCS (*Learning Classifier System*) [135]. D'autres systèmes basés sur ces principes ont vu le jour apportant de nouvelles fonctionnalités. Une des applications privilégiée de ce type de systèmes est la réalité virtuelle [1], [248]. La génération de comportements pour des entités évoluant dans un environnement dynamique est un thème de recherche assez courant. Ces entités devront alors avoir des caractéristiques structurelles et comportementales propres et devront pouvoir interagir les unes avec les autres. La définition de ces caractéristiques et leur réalisation logicielle ont été mis en œuvre grâce à l'utilisation de modèles comportementaux basés sur des systèmes de classifieurs dans deux simulations de jeux coopératifs. L'article est organisé de la façon suivante. Dans la première partie, nous effectuons un tour d'horizon des LCS. Nous présentons ensuite deux applications qui mettent en œuvre de nouveaux types de LCS plus adaptés aux exigences de la réalité virtuelle.

6.2 Etat de l'art

En 1975, J. Holland [135] a initié et K.A. De Jong [69] a proposé pour la première fois une nouvelle technique de résolution de problèmes dans les espaces complexes : Les *algorithmes génétiques* (notés AG). Fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle, ils utilisent à la fois les principes de la survie des structures les mieux adaptées et des échanges d'informations pseudo-aléatoires. A chaque génération, une nouvelle population de solutions est créée à partir des meilleurs éléments de la génération précédente, grâce aux opérations calquées de la génétique (sélection, reproduction, mutation, croisement...). Grâce aux algorithmes génétiques, J. Holland a proposé en 1978 un système appelé CS-1 (*Cognitive System Level One* [138]) permettant un apprentissage de parcours de labyrinthe. Ce système était une version simplifiée de ce que sont les systèmes de classifieurs actuels (notés LCS pour *Learning Classifier System*). Aujourd'hui, les systèmes de classifieurs se divisent en de nombreuses variantes, chacune ayant ses avantages par rapport aux applications où elle est utilisée.

6.2.1 Les systèmes de classifieurs de type LCS

Principe

Un système de classifieurs est un système qui va joindre un élément de sortie à un élément d'entrée. Il est donc constitué d'une base de règles de la forme $\langle condition \rangle : \langle action \rangle$ appelées classifieurs. Chaque classifieur se voit associer un poids qui va permettre d'appliquer des principes d'apprentissage pour définir la règle à appliquer. Ainsi une règle ayant entraîné de bons résultats va se voir récompensée et aura donc plus de chance d'être sélectionnée la prochaine fois. Les premières méthodes d'apprentissage ont été mises au point par Watkins [54] avec le Q-learning. Cependant dans le Q-learning le nombre de classifieurs est fixe. L'utilisation d'un algorithme génétique utilisant comme fonction de fitness le poids des classifieurs va permettre l'émergence de nouvelles règles. Ainsi le système possède non seulement des capacités d'apprentissage mais aussi d'adaptation. Un système de classifieurs de type LCS est constitué de cinq composantes principales (figure 6.1) :

- une interface d'entrée-sortie composée de capteurs et d'effecteurs,
- une base de règles,
- une liste de messages,
- un système de rétribution,
- un algorithme génétique.

Codage des informations

La partie *action* (ou *message*) d'un classifieur est codée sous la forme d'une chaîne de bits (0 ou 1) de longueur finie L , d'où la définition d'un message :

$$\text{message} = \{0,1\}^L$$

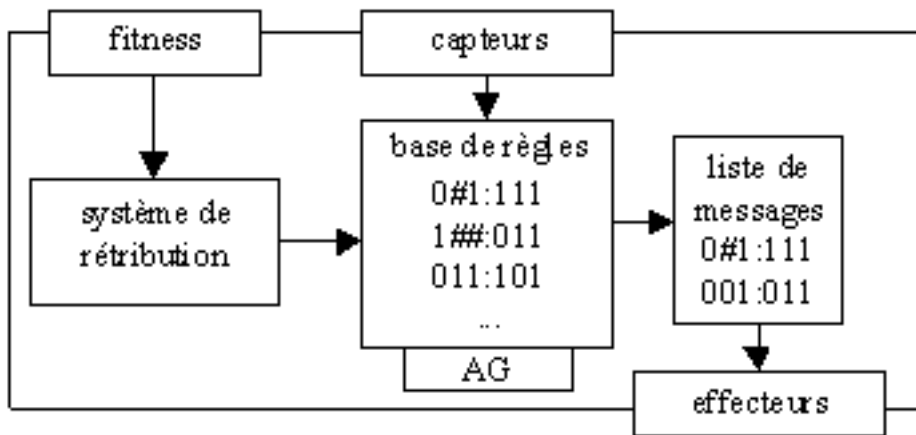


FIG. 6.1 – Système de classifieurs de type LCS

Pour la partie *condition*, il faut rajouter à l'alphabet précédent un caractère spécial # qui signifie *peu importe*. Ce symbole, représentant indifféremment 0 ou 1, permet d'élargir les possibilités d'activation des règles. Par exemple, la condition #001 est alertée par les messages 1001 et 0001 mais pas par le message 1000. La forme générale d'une condition est la suivante :

$$\text{condition} = \{0,1,\#\}^L$$

Le système de règles et de messages

Un système de classifieurs est composé d'une interface d'entrée qui permet de capter l'information provenant de l'environnement (messages). Cette information est codée sous forme de chaînes binaires de longueur L et ajoutée à la liste de messages. Ensuite, les règles dont la partie condition correspondent à ces messages peuvent à leur tour ajouter leur message (partie action) à la liste de messages. L'itération de ce *processus d'inférence* entraînera le déclenchement d'un effecteur et donc d'une action. L'action est réalisée grâce à l'interface de sortie qui va établir le lien entre le message binaire codant l'action et l'action proprement dite.

La recherche de correspondance entre messages est grandement favorisée par le symbole #. Celui-ci fait apparaître les notions de *généralisation* et de *spécialisation*. Considérons deux classifieurs $C1$ et $C2$. Le classifieur $C1$ est plus spécialisé que $C2$ si le nombre de symboles # contenus dans $C1$ est inférieur à celui de $C2$. Ce qui équivaut à dire que $C2$ est plus généralisé que $C1$. Ainsi, une hiérarchie apparaît implicitement dans la base de règles. Grâce à un nombre de symboles # plus élevé, les règles *généralisées* sont plus souvent sollicitées que les règles *spécialisées*. Comme les règles *généralisées* sont en principe moins efficaces que les règles *spécialisées*, elles ne seront utilisées que dans le cas où aucune règle *spécialisée* ne peut être appliquée, soit comme une règle de faible priorité.

La taille de cette liste de message est fixe, ce qui implique une méthode de sélection des messages qui seront postés dans la liste. Ainsi, un LCS utilise l'algorithme *Bucket Brigade* pour récompenser au cours du temps les classifieurs les plus productifs.

L'algorithme *Bucket Brigade*

Bien qu'il existe diverses méthodes de répartition des crédits, l'algorithme *Bucket Brigade* [137] est sans doute le système de rétribution le plus populaire. L'algorithme est constitué de deux composantes principales : une vente aux enchères et une répartition des rétributions. Quand la condition d'un classifieur est satisfaite, il propose une valeur proportionnelle à sa force pour participer aux enchères de l'activation. Ainsi, les classifieurs payent leur enchère aux classifieurs qui ont provoqué leur activation (répartition des rétributions) de manière à répartir les récompenses entre les classeurs qui ont été activés au cours du temps. Ensuite, le cycle recommence avec les nouveaux messages.

La mise à jour de la force d'une règle s'effectue donc grâce à la formule suivante :

$$F_i(t) = F_i(t-1) - C_{enchère} \cdot F_i(t-1) + R_i(t-1) - C_{taxe} \cdot F_i(t-1)$$

Ainsi, la force F de la règle est diminuée de l'enchère qu'elle a proposée pour être activée, et augmentée par la rétribution partagée entre les classifieurs activés. Enfin, le dernier paramètre simule un impôt proportionnel à la force du classifieur, favorisant les règles productives et affaiblissant les règles inactives.

L'algorithme génétique

Un système de classifieurs intègre un algorithme génétique de manière à renouveler la base de règles. En agissant directement sur les règles binaires, il permet de créer de nouveaux éléments en utilisant les opérateurs classiques copiés de la génétique comme la sélection, le croisement et la mutation. La sélection s'effectue généralement grâce à l'utilisation de la force d'un classifieur (sélection par roulette). Le croisement ne pose aucun problème particulier. La mutation doit être adaptée à l'alphabet ternaire $\{0, 1, \#\}$. Ainsi, chaque symbole a une chance sur deux de se changer en l'un des deux autres.

L'utilisation d'un AG permet donc d'améliorer les performances du système en découvrant des règles plus efficaces et de suivre l'évolution de l'environnement avec des classifieurs plus adaptés.

6.2.2 ZCS : système de classifieurs niveau zéro

Architecture d'un ZCS

Les ZCS (*Zeroth level Classifier System*) ont été créés par S. Wilson en 1994 [286]. La structure de base d'un ZCS est copiée sur le modèle de Holland mais les modifications qui lui ont été apportées en font un système plus compréhensible, tout en conservant des performances comparables.

La principale différence avec les LCS est l'absence de liste de messages. Ce modèle ne permet donc pas d'accumuler de messages internes et autorise ainsi l'utilisation de longueurs différentes pour la partie condition et la partie action d'un classifieur. L'information provenant de l'environnement parvient au système sensoriel sous la forme d'un seul message (appelé message entrant). Les classifieurs dont la partie condition satisfait ce message est ajouté à la liste [M]. Ensuite, la sélection par roulette est appliquée à la liste des effecteurs de [M] pour déterminer celui qui va être activé. La probabilité donnée à chaque effecteur est proportionnelle à la somme des forces des classifieurs qui utilisent la même action. Les classifieurs possédant l'effecteur gagnant forment donc une population [A] et l'action correspondante est exécutée (figure 6.2). S. Wilson a introduit la méthode du covering dans les ZCS [285]. Cet opérateur agit dans le cas où la population [M] est vide, c'est-à-dire quand il n'existe pas de classifieurs pour satisfaire le message entrant. Son rôle consiste alors à créer le classifieur qui pourra être sélectionné et introduit dans la liste [M]. L'action de ce classifieur est choisie aléatoirement, tandis que la condition est créée en adéquation avec le message entrant, avec un certain pourcentage de symboles #. Sa force est initialisée par valeur moyenne de la force de toutes les autres règles.

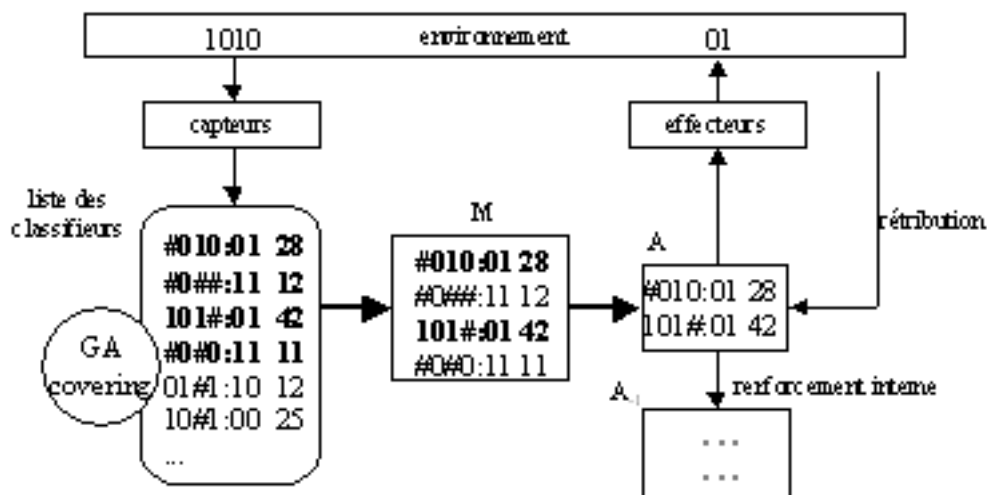


FIG. 6.2 – Structure d'un ZCS

Évolutions du ZCS

Dans ses travaux, S. Wilson a suggéré l'ajout d'une mémoire temporaire qui faisait défaut à son système en ajoutant des bits supplémentaires (appelés registres) à ses classifieurs [287]. Chaque règle est étendue par deux sous-chaînes supplémentaires de même longueur : #0101, 01# : 10,#1#. Sur l'exemple précédent, #0101 et 10 modélisent les parties conditions et action des ZCS classiques, 01# et #1# représentent respectivement les registres et un effecteur interne capable de modifier ces registres.

Le fonctionnement de ces effecteurs internes consiste à positionner les bits correspondants (même position) sur les registres. Sur l'exemple précédent, la sous-chaîne #1# permet d'initialiser le 2ème registre à la valeur 1, ce qui équivaut à positionner un état interne à une certaine valeur.

Cette idée a été implémentée par D. Cliff [65] en 1995 sous le nom de ZCSM. Grâce à cette méthode, il a montré qu'il était possible d'étendre les capacités des ZCS à des environnements non markovien, c'est-à-dire des environnements où un même message de l'environnement peut correspondre à des actions distinctes.

Tomlinson a modifié le ZCS en ZCCS en y ajoutant le principe de la *corporation* [3]. Une corporation consiste en un regroupement de classifieurs selon leur ordre d'enchaînement.

Il définit les liens entre classifieurs grâce à des listes chaînées. Chaque règle possède deux paramètres : un lien vers le classifieur précédent et un lien vers le classifieur suivant. Le couplage s'effectue aléatoirement avec des règles appartenant à d'autres corporations, avec la probabilité 0.1. Si une règle possède déjà deux liens actifs, le couplage est appliqué en début ou fin de la chaîne formée par cette règle.

Les corporations peuvent être reproduites, détruites et sont créées par un opérateur de mutation. Pour la reproduction, la fitness d'une corporation est calculée grâce à la moyenne des fitness de toutes les règles qui la composent.

Cet assemblage est dérivé du phénomène biologique de la symbiose. Les classifieurs d'une corporation coopèrent entre eux car ils peuvent s'enchaîner. Par ailleurs, ils entrent en compétition avec ceux d'une autre corporation. De cette manière, le système élimine les règles parasites et améliore son efficacité.

6.2.3 XCS : Système de classifieurs basé sur la prédiction du paiement

Architecture d'un XCS

Basé sur le ZCS, le XCS est à l'heure actuelle une version très populaire des systèmes de classifieurs. S. Wilson [287] est à l'origine de ce modèle qui offre des mécanismes novateurs et des performances élevées grâce à des capacités de généralisation optimales.

Dans les LCS, la force d'un classifieur est utilisée dans le calcul de l'enchère (pour la sélection) et dans les algorithmes génétiques (comme fitness). Avec les XCS, la force est remplacée par trois paramètres : la *prédiction du paiement* p , l'*erreur de prédiction* e et la *fitness* F . La prédiction du paiement est utilisée comme force lors de la sélection. Elle permet de calculer l'erreur avec le paiement réel. La fitness est fonction de l'inverse de l'erreur, elle représente donc l'exactitude de la prédiction du paiement. Elle est utilisée par les algorithmes génétiques comme critère de sélection.

Le fait de baser la sélection sur la prédiction du paiement et non sur la fitness provient de la constatation suivante : imaginons un environnement où les rétributions face à des actions correctes sont inégales, c'est-à-dire un monde où il existe différents niveaux de paiement. Les classifieurs recevant les plus fortes récompenses vont avoir tendance à prendre le dessus, alors que leur seul mérite est d'obtenir une rétribution plus importante. Grâce à l'utilisation de la prédiction, les XCS permettent donc de ne

pas perdre d'information et de construire des *cartes* complètes des prédictions, soit une représentativité de tous les niveaux de paiement. Tous les classifieurs auront ainsi les mêmes chances de survivre et d'être sélectionnés, contrairement aux LCS classiques qui auront tendance à converger vers les classifieurs rapportant le plus.

Une contribution importante a été apportée par S. Wilson au niveau des algorithmes génétiques. Dans les XCS, les AG sont appliqués sur un sous-ensemble de la population (une niche) qui correspond à l'ensemble [A] décrit précédemment et non sur la population entière. Dans le souci de garder une population uniforme, chaque niche a été dotée d'un seuil permettant de limiter le nombre d'opérations génétiques qui lui sont appliquées. En effet, une niche apparaissant plus souvent que les autres générerait une descendance trop importante dans la base de règles.

L'initialisation de la base de classifieurs s'effectue avec une population vide ou très réduite. Le *covering* est alors utilisé pour créer les éléments appropriés. De plus, cet opérateur est utilisé si la prédiction totale de [M] est q fois inférieure à la moyenne des prédictions de la population, ce qui permet entre autre de sortir de boucles infinies où les prédictions décroissent faiblement.

Evolutions du XCS

POP-XCS est la première évolution du XCS initial [289]. Codé avec le langage POP-11, il inclut les fonctionnalités de base du XCS et quelques modifications. Tout d'abord la méthode de calcul de la prédiction a été légèrement modifiée pour pénaliser les classifieurs ayant peu d'expérience. Ensuite la formule de la fitness diffère légèrement de celle donnée par originellement par S. Wilson. Enfin l'ordre de mise à jour des paramètres p , e et F a été revu pour résoudre des problèmes plus complexes.

P. Lanzi propose le XCSS pour des environnements qui ne permettent que très peu de généralisation [235]. Il introduit un nouvel opérateur appelé *specify* qui permet de remplacer certains symboles # par des valeurs binaires. Ce mécanisme agit sur la population [A] et sélectionne un classifieur qui va donner naissance à un fils. Ce fils est construit avec les gènes de son père dans lesquels chaque # est remplacé par les bits de la condition entrante avec une probabilité fixée.

Sur le même principe que le ZCSM, P. Lanzi a ajouté une mémoire interne au XCS sous forme de registres [236]. Son modèle, appelé *XCSM*, est capable d'atteindre des solutions optimales dans des environnements non markoviens simples en utilisant indifféremment 1, 2 ou 3 bits de mémoire interne. Avec des environnements plus complexes, P. Lanzi montre que le XCMS ne converge que si l'opérateur *specify* lui est ajouté.

Ainsi, P. Lanzi a étendu le XCSM en *XCSMH* où il utilise de nouvelles techniques d'exploration et de mise à jour de la mémoire [237]. De plus, l'intérêt de cette version est d'agir dans les environnements partiellement observables, où le mécanisme interne de gestion de la mémoire ne permet pas d'obtenir un résultat optimal. Le XCSMH conserve la structure du XCSM de base mais diffère en deux points majeurs :

- les effecteurs internes n'agissent que dans le cas où l'action externe correspondante modifie la perception de l'agent c'est-à-dire si l'action engagée génère un déplacement.

- il emploie une stratégie d'exploration hiérarchique : le système sélectionne une action interne de manière déterministe, puis il sélectionne une action externe parmi celles qui font appel à l'action interne grâce à une stratégie d'exploration aléatoire.

Ainsi, le XCSMH permet une meilleure exploitation des registres internes dans des environnements complexes.

P. Lanzi propose une représentation différente de la partie condition d'une règle dans les XCS. Dans son modèle, appelé *XCS_m* (XCS messy [238]), il supprime la correspondance entre les bits de la partie condition et ceux du message donné en entrée. Ainsi, la condition est remplacée par une séquence de gènes composés de deux parties. Un gène est constitué d'une étiquette représentant le type de capteur et d'une valeur binaire représentant le message associé à l'étiquette. L'application de ce modèle à l'environnement Woods génère des gènes du type (X, Y) avec $X \in \{N, E, S, W, NW, NE, SW, SE\}$ et $Y \in \{0, 1, \#\}^2$. Ainsi, ((N, 00),(E, 00)) signifie que les cases Nord et Est sont vides. Cette modification permet donc d'utiliser des conditions de longueur variable.

Cette représentation entraîne de nombreuses différences avec les XCS. Pour la sélection, les gènes qui ne sont pas contenus dans la condition sont considérés comme des #. De plus, si une étiquette apparaît plusieurs fois dans une condition, seule la première occurrence est prise en considération.

A. Tomlinson a poursuivi son étude de la corporation dans les XCS. Il utilise le même principe que celui des ZCCS avec le CXCS [2]. L'évaluation porte sur deux types de problèmes. Le premier test consiste à comparer un XCS et un CXCS dans un environnement markovien. Il montre que le CXCS converge plus vite que le XCS vers des performances optimales. Une autre série de test est effectuée dans un environnement non markovien pour démontrer l'efficacité de la corporation. Le problème utilisé est un DRT M:N (*Delayed Reward Task*) où une rétribution est donnée en fonction de l'enchaînement des M précédentes actions sélectionnées parmi N possibles. Dans l'environnement DRT M:N, un seul enchaînement est récompensé, tous les autres ne reçoivent rien. Ainsi, l'association interne des classifieurs sous forme de liens va permettre de déterminer l'action optimale en fonction de celles qui précèdent. Avec différentes valeurs de M et N, un XCS n'arrive pas à converger vers une solution alors que le CXCS obtient des performances satisfaisantes avec DRT 2:2 et DRT 4:2. Par contre, le CXCS voit ses performances diminuer avec l'augmentation de N (N=3), tout en restant nettement supérieur au XCS.

Avec le XCS μ , P. Lanzi a étendu les capacités d'apprentissage du XCS à des environnements stochastiques, c'est-à-dire des environnements où l'action invoquée peut avoir des effets incertains [239]. Les tests portent sur des perturbations induites au niveau des effecteurs : l'Animat se déplace dans la direction décrite par l'action gagnante avec une probabilité de $1-\epsilon$ ($0 \leq \epsilon \leq 1$). Elle atteint l'une des deux cases adjacentes à celle qui était prévue avec une probabilité $\epsilon/2$.

En utilisant un nouveau paramètre μ qui estime l'erreur de prédiction minimale que le classifieur a subi, le XCS μ permet de gérer ce type de conflit. Ainsi, cette valeur est soustraite à la l'erreur de prédiction e de façon à réduire les effets de cette perturbation des effecteurs.

Les systèmes de classifieurs utilisent des valeurs binaires en entrée alors que de

nombreux problèmes utilisent des valeurs réelles (température, dimensions). S. Wilson a donc proposé de modifier le XCS en *XCSR* (XCS Réel [288]) pour prendre en compte des données réelles. Ce système diffère des XCS en trois points distincts : l'interface d'entrée, la mutation, et l'élimination par algorithme génétique.

La condition d'un classifieur est la concaténation de couples (c_i, s_i) appelés prédicats d'intervalles où c_i et s_i sont des réels représentant le centre d'un intervalle réel et la distance entre le centre et les deux extrémités. Ainsi, une entrée :

$X = x_1, x_2, \dots, x_n$ provenant de l'environnement satisfait une condition

$$C = (c_1, s_1), (c_2, s_2), \dots, (c_n, s_n) \text{ si } : \forall i \in 1..n, c_i - s_i \leq x_i \leq c_i + s_i$$

La mutation a dû être modifiée pour être adaptée à la représentation réelle des conditions. Après de nombreuses expérimentations, S. Wilson a choisi de modifier un classifieur par mutation en lui ajoutant ou retranchant une valeur aléatoire ne dépassant pas 10 % de la valeur maximum de x_i .

De manière générale, la probabilité d'élimination par l'algorithme génétique d'une règle est inversement proportionnellement à sa fitness. Ici, S. Wilson utilise un critère supplémentaire décrit par T. Kovacs [290] : un classifieur ne pourra être éliminé que s'il a été sollicité un certain nombre de fois. Ainsi, les paramètres de ce classifieur auront pu être évalués avant sa destruction.

6.2.4 ACS : systèmes de classifieurs pour l'anticipation

Un ACS (Anticipatory Classifier System) est un type dérivé de ZCS assez original. Apparus en 1996 grâce aux travaux de W. Stolzmann [324], un ACS est basé sur le mécanisme d'anticipation du comportement et sur la suppression de la partie algorithme génétique au profit de l'utilisation d'heuristiques.

Chaque règle est formée d'un triplet (S, R, E) où S, R et E représentent respectivement la condition, l'action et l'état anticipé par la règle. Une fonction de fitness classique permet de renforcer ou d'affaiblir le triplet en fonction des récompenses provenant de l'environnement. Ensuite, le modèle compare l'état réel obtenu lors du déclenchement de l'effecteur R avec l'état anticipé E_{ant} de manière à évaluer la pertinence de l'anticipation. Ainsi, une deuxième fitness évalue l'adéquation de l'état espéré avec l'état réellement obtenu.

L'apprentissage de l'état anticipé permet alors d'enchaîner les comportements et d'effectuer de la planification de tâche.

Chaque classifieur se voit également attribué une marque représentant les différents paramètres d'une situation où le classifieur n'a pas anticipé correctement. Cela va permettre de créer de nouvelles règles en utilisant un processus d'apprentissage par anticipation. Si un classifieur activé possède une marque, le processus va générer un nouveau classifieur avec une partie condition plus spécifique et utilisant les attributs de la marque.

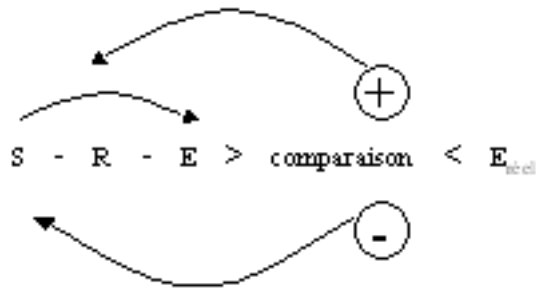


FIG. 6.3 – Modèle d'anticipation du comportement

6.2.5 MCS : systèmes de classifieurs multiples

Enfin, le dernier type dérivé de LCS que nous présentons est le MCS. Ce système est composé d'une population de sous-systèmes de classifieurs. Dans un MCS, toutes bases de règles sont indépendantes les une des autres mais leur efficacité va provenir de leur interaction, par coopération ou par communication. Ainsi, les MCS offrent de nouveaux horizons et de nouvelles applications, comme le montrent les trois exemples suivants.

J. Donnart utilise un MCS pour permettre à un Animat de se déplacer vers une cible en évitant des obstacles de formes diverses [141]. Le modèle utilise deux systèmes de classifieurs hiérarchisés appelés module réactif et module de planification. Le module réactif est le cœur du système car il détermine le comportement à adopter (direction de déplacement). Le module de planification permet de décomposer les tâches en sous-tâches, c'est-à-dire de découper la trajectoire en un nombre minimum de segments. De plus, le MCS utilise un module d'auto-analyse qui détecte les déplacements non-optima et qui transmet l'information du module réactif vers le module de planification. La symbiose entre les deux sous-systèmes reproduit alors des déplacements optima.

M. Dorigo a choisi de décomposer une tâche complexe en un ensemble de tâches simples avec un MCS [175]. Grâce au système de classifieurs Alecsys, il utilise une architecture hiérarchique qui permet à un système de classifieurs d'activer une tâche particulière, ou un autre système de classifieurs.

L'évaluation de son modèle s'effectue dans le simulateur AutoNoMouse. Une souris doit suivre une source lumineuse mobile et se réfugier dans son terrier lors de l'apparition d'un prédateur. Ainsi, M. Dorigo définit trois systèmes de classifieurs : les deux premiers apprennent les deux comportements de base en parallèle (suivre la lumière et éviter le prédateur) tandis que le troisième joue le rôle d'arbitre dans le choix du LCS qui va être activé.

C. Lattaud définit le NHCS (système de classifieurs non homogènes) comme un système où un nombre variable de systèmes de classifieurs cohabitent simultanément [51]. Chaque sous-système correspond à une classe représentée par son nom et son degré. Il propose la macro-mutation comme processus d'évolution du NHCS. Cet opérateur consiste en 2 méthodes exclusives : la mutation interne (augmentation ou diminution du degré d'une classe) et la mutation d'une classe (ajout ou suppression d'une

classe). Ainsi, lors d'une macro-mutation, le système détermine aléatoirement la méthode et le type d'évolution qui va opérer.

C. Lattaud utilise le NHCS dans un monde 2D composé d'agents, d'obstacles et de nourriture. Les capacités de chaque agent sont divisées en classes dont le degré symbolise les capacités de perception. Les agents peuvent se déplacer, se nourrir ou se reproduire. L'objectif de chaque agent est de maintenir un niveau énergétique suffisamment élevé pour ne pas mourir. De nombreux comportements émergent de son application comme l'évitement d'obstacle, le regroupement vers les ressources et la reproduction.

6.2.6 Synthèse

Nous avons présenté le fonctionnement d'un système de classifieurs, ainsi que les différentes versions qui tendent à améliorer le modèle.

La principale différence entre tous ces systèmes de classifieurs est leur aptitude à trouver des solutions optimales dans les environnements markoviens pour certains, et non-markoviens pour d'autres. Plus généralement, les améliorations apportées au système de classifieurs original semblent adaptées à des cas précis car, à ce jour, il n'existe pas de modèle qui pourrait résoudre tous les problèmes. En effet, même les systèmes les plus perfectionnés ont leurs faiblesses. Par exemple, la construction de la carte des paiements dans le XCS n'est efficace que si les rétributions sont discrètes et en nombre fixe. Le ACS ne trouve son utilité que dans le cas où chaque action entraîne un changement dans la perception du monde extérieur pour que les comportements s'enchaînent.

C'est pourquoi nous avons développé deux systèmes de classifieurs plus proches des contraintes issues des environnements dynamiques et appliqués à des comportements collectifs. Le premier prend en compte des notions de multicritères couplés avec de la communication alors que le deuxième manipule des données complexes dans le but de s'intégrer dans un modèle comportemental.

6.3 Apprentissage et évolution à travers un jeu de football virtuel

6.3.1 Le système α CS

Introduction

Notre objectif est de construire un système comportemental ayant de fortes capacités d'adaptation et d'évolution de manière à être utilisé par des entités virtuelles dans des environnements complexes.

Notre système, appelé α CS, utilise des concepts novateurs agissant à plusieurs niveaux. Au niveau interne, α CS permet de superviser la généralisation des règles, de contrôler les probabilités d'apparition des effecteurs (pour établir une pseudo-hiérarchie entre les comportements) et de maximiser simultanément plusieurs fonctions de fitness

[52]. Au niveau externe, aCS a été étendu à des capacités de coopération et de communication afin de simuler des comportements de groupes d'entités ayant pour objectif la résolution d'une tâche commune.

Notre modèle, inspiré des ZCS [286], est décrit dans les paragraphes suivants. Nous évaluons ensuite ses performances à travers une application de jeu de football virtuel.

Capteurs actifs

La première modification que nous avons apportée concerne le système sensoriel. En effet, nous utilisons une approche originale pour la représentation du message entrant. Avec α CS, le message entrant est le résultat de la concaténation de bits associés à des capteurs booléens appelés *capteurs actifs*. Cette dénomination provient de la définition même de ces capteurs. En effet, un capteur renvoie la valeur 1 s'il est *vrai*, et 0 s'il est *faux* ou si l'information n'est pas sûre. Nous allons ainsi constater que l'utilisation du symbole # est alors inutile.

La sélection

La construction particulière du message entrant implique une méthode de sélection adaptée à cette représentation. La sélection s'effectue grâce à la comparaison entre le message entrant et la condition de chaque règle. La correspondance entre les deux messages est validée si tous les capteurs actifs d'une règle sont actifs dans l'environnement représenté par le message entrant, d'où la notion d'infériorité bit à bit entre la partie condition et le message entrant. Par exemple, le message entrant *0011* peut activer les conditions *0010* et *0001* mais pas les conditions *1111* ou *1000*. Cette représentation du message environnemental apporte de nombreux avantages. L'absence du symbole # est compensée par la nouvelle définition de la fonction de sélection, tout en permettant la spécialisation ou la généralisation par le contrôle du nombre de bits 0 lors de l'initialisation des règles. De plus, cette méthode supprime les divergences induites par les oscillations dues au symbole # puisque les classifieurs ne peuvent être activés s'ils ne satisfont pas tous les capteurs actifs du message entrant.

Contrôle du comportement

Dans les environnements simples comme les mondes Woods, il n'est pas utile de définir une hiérarchie dans les comportements car les déplacements dans les huit directions cardinales sont à priori aussi importants les uns que les autres. Or, le problème est différent avec des espaces complexes comme les applications de réalité virtuelle que nous voulons développer. En effet, plus les comportements sont nombreux et variés, plus l'écart entre les comportements principaux et secondaires se creuse. A partir de cette constatation, nous avons dissocié les liens directs entre les messages actions et les comportements pour adopter une représentation plus souple.

Notre idée est basée sur la décomposition de la partie d'action en "NbEff" sous-chaînes, NbEff étant le nombre d'effecteurs. Chaque sous-chaîne *i* représente le poids du *i*ème effecteur dans la partie d'action. Pour chaque règle, l'action gagnante est celle

qui possède la sous-chaîne binaire la plus élevée, en donnant la priorité à la première sous-chaîne rencontrée.

Par exemple, avec $NbEff=3$, la partie action *000 010 101* correspond au 3ème effecteur, alors que *010 110 110* déclenche le 2ème effecteur.

La longueur de chaque sous-chaîne est définie par la valeur $1+\alpha$. Il apparaît que le paramètre α influence la répartition des effecteurs dans la base. En effet, lorsque α est élevé, la probabilité que deux sous-chaînes aient même valeur est faible. Ainsi, tous les effecteurs ont les mêmes chances d'être activés. Le phénomène inverse se produit lorsque α est faible. Une hiérarchie implicite s'établit automatiquement entre les effecteurs.

Par exemple, avec $\alpha=0$ et $NbEff=2$, nous obtenons les probabilités suivantes : l'effecteur 1 apparaît avec une probabilité $3/4$ (chaînes *00*, *10* et *11*) alors que l'effecteur 2 apparaît avec une probabilité $1/4$ (chaîne *01*).

Avec $\alpha=1$ et $NbEff=2$, l'effecteur 1 apparaît avec une probabilité $10/16$ (chaînes *00 00*, *01 00*, *01 01*, *10 00*, *10 01*, *10 10*, *11 00*, *11 01*, *11 10* et *11 11*) alors que l'effecteur 2 apparaît avec une probabilité $6/16$ (chaînes *00 01*, *00 10*, *00 11*, *01 10*, *01 11* et *10 11*).

Ainsi, nous vérifions que la probabilité d'apparition de l'effecteur 1 est plus élevée que celle de l'effecteur 2. Avec un nombre d'effecteurs plus important, cette propriété permet de gérer la distribution des actions dans la base de règles et donc d'influencer les comportements résultants.

Le système de rétribution

Le système de rétribution constitue la principale innovation de αCS . En effet, souhaitons utiliser notre système dans des environnements multi-objectifs fortement dynamiques. Ainsi, nous avons permis au système de rétribution d'intégrer plusieurs fonctions de fitness, chacune représentant un but à atteindre. Ces fonctions, appelées FFL (fonctions de fitness locales) doivent donc être maximisées simultanément, malgré les conflits internes qu'elles peuvent générer.

Le calcul de la rétribution s'effectue en trois étapes grâce à la somme pondérée des FFL. Après avoir été activées, les FFL mettent à jour la valeur des poids qui leurs seront associés. Les poids sont ajustés dynamiquement pour donner plus de valeur à une FFL élevée en valeur absolue, ou pour diminuer la valeur associée à une FFL peu significative, c'est-à-dire faible en valeur absolue. Chaque message entrant est associé à un ensemble différent de poids, de manière à établir une représentation du degré d'utilité des différentes FFL en fonction du contexte.

La rétribution R est ensuite calculée comme la somme pondérée des FFL par les poids correspondant au message entrant courant.

Afin de préserver l'efficacité du système face à des environnements bruités ou évolutifs, nous utilisons enfin les rétributions passées de chaque classifieur face au même message entrant pour calculer la rétribution finale. Les récompenses successives sont alors pondérées par une fonction qui décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne dans le passé.

La mise à jour de la force d'une règle est effectuée grâce à une formule classique où le classifieur voit sa force augmentée de la rétribution et diminuée de la part payée

pour être activé.

Extension d' α CS

Une des applications que nous allons privilégier avec α CS est l'affrontement entre des groupes d'entités confrontées à des tâches concurrentes. Il est donc nécessaire de disposer de moyens de coopération. Or, la coopération est un phénomène émergent : deux entités atteindront plus facilement leur objectif si les actions qu'elles génèrent sont complémentaires. Malgré cela, nous avons souhaité contrôler la coordination de comportements de façon plus précise, en rajoutant un deuxième niveau de fonctions de fitness appelées *fonctions de fitness indirectes* (FFI). En totale indépendance par rapport aux FFL, ces FFI sont déclenchées par des événements précis et contribuent à diversifier les comportements en imposant de nouvelles contraintes plus ponctuelles.

Nous avons enfin étendu α CS à des capacités de communication [51] pour permettre l'échange de règles entre entités. Nous avons choisi d'utiliser le protocole d'envoi de messages. Avec notre système, la communication se déclenche à l'initiative des entités. Une entité décide de communiquer lorsqu'elle se trouve dans l'impossibilité de trouver une règle efficace après plusieurs tentatives consécutives. Ainsi, elle envoie simplement le message représentant son état (message entrant) aux entités appartenant à son groupe et attend une ou plusieurs réponses, sous la forme d'une partie action. Ce mécanisme permet alors de construire de nouveaux classifieurs et d'augmenter les performances du système dans le cas où la communication est un succès.

Conclusion

Le système α CS propose donc des mécanismes particulièrement adaptés à des simulations coopératives et des environnements multi-objectifs dynamiques. Ainsi, face à des problèmes de type Woods [285], le système α CS ne permet pas de mettre en valeur ses capacités. Par exemple, la restriction des capteurs à une forme booléenne lui ôte la possibilité de représenter simplement la nature (vide, obstacle ou nourriture) des cases adjacentes.

L'application suivante présente une simulation temps réel de réalité virtuelle. Nous allons évaluer les performances du système α CS et ses capacités d'évolution à travers une expérience de co-évolution entre deux groupes d'entités concurrentes.

6.3.2 L'application NeViS : Networked Virtual Soccer

NeViS [53] est un monde virtuel en 3 dimensions représentant un jeu de football temps-réel (figure 6.4). L'environnement est formé de deux équipes de 11 joueurs. Chaque entité est constituée d'un modèle physique et d'un modèle comportemental. Le modèle physique définit la représentation 3D d'un joueur, ses mouvements prédéfinis (articulations des membres), les transitions entre les mouvements et les tests de collisions. Le modèle comportemental utilisé par chaque joueur est réduit à notre système α CS.

Les connaissances de chaque joueur sont limitées à la position des buts, à leur position initiale (position de placement) et aux informations évolutives comme la position



FIG. 6.4 – L'environnement NeViS

du ballon ou des joueurs.

L'interface d'entrée-sortie entre α CS et l'environnement utilise des capteurs et des effecteurs de haut niveau. Un ensemble de sept capteurs permet à chaque joueur de percevoir les informations provenant de l'environnement. Huit effecteurs représentent les déplacements possibles ainsi que les actions sur le ballon.

Capteurs	Effecteurs
1 AvecLeBallon	1 AllerVersLeBallon
2 SansLeBallon	2 AllerVersLaPositionPlacement
3 PasDeCollision	3 TaperFort
4 DevantLeBallon	4 TaperFaible
5 DerrièreLeBallon	5 PasserDevant
6 ProchePositionPlacement	6 PasserDerrière
7 LoinPositionPlacement	7 Avancer
	8 SeDéplacerAléatoirement

Le système de rétribution utilise trois fonctions de fitness (FFL_k) définies selon la formule suivante :

$$FFL_k = \Delta D_k \cdot D_k(t)$$

$$\Delta D_k = D_k(t-1) - D_k(t)$$

avec $D_1(t)$ = distance entre le ballon et le but adverse
avec $D_2(t)$ = distance entre le joueur et le ballon
avec $D_3(t)$ = distance entre le joueur et sa position de placement

Grâce à ces capteurs, effecteurs et FFL, les joueurs sont tous munis du même ensemble d'attributs et ne possèdent donc pas de capacités spécifiques initiales. Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter quelques exemples de classifieurs et

l'évolution de ces règles, permettant ainsi la spécialisation des joueurs au sein de leur équipe.

6.3.3 Résultats

Emergence de comportements

Pour chaque simulation, nous utilisons 100 classifieurs par joueur car c'est un bon compromis entre vitesse d'exécution (20 images par seconde minimum) et choix varié de classifieurs. Le paramètre α est fixé à 2 pour favoriser les comportements 1 et 2 et ainsi assurer une cohérence dans le jeu.

Nous effectuons une première analyse basée sur l'observation des comportements. Assez rapidement, nous constatons que des comportements variés émergent de chaque simulation, reproduisant ainsi les stratégies classiques d'attaquants et de défenseurs, comme le montrent les exemples suivants :

- Un joueur progresse avec le ballon vers le but adverse, en combinant les actions suivantes : il avance vers le ballon, tape dedans et répète la même opération tant qu'il n'est pas gêné par un autre joueur.
- Un joueur reste sur sa position de placement en attendant que le ballon arrive à proximité et tape très fort si celui-ci se présente (comportement de gardien de but).
- Un joueur refait une passe immédiatement après avoir reçu le ballon de la part d'un autre joueur (comportement de passeur).
- Un joueur progresse avec le ballon, fait une passe et retourne se placer.
- Un attaquant tape très fort vers le but adverse quand il est assez près pour marquer (comportement d'attaquant).

Les actions que nous venons de décrire dénotent une certaine spécialisation de l'ensemble des joueurs. Cette spécialisation provient en effet de la co-évolution car nous obtenons des résultats comparables en initialisant toutes les bases de règles avec les mêmes données. L'émergence de cette spécialisation est un long processus d'évolution qui commence par l'apprentissage des moyens de déplacements, puis des moyens d'actions sur le ballon et enfin de la stratégie de groupe. Avec l'exemple suivant, nous allons tenter d'explicitier ce phénomène.

Evolution des comportements

Le monde NeViS est fortement interactif et entraîne de ce fait une évolution constante des comportements des différents joueurs. Ainsi, les classifieurs les plus efficaces varient avec le temps pour s'adapter aux stratégies de groupe grâce au renforcement donné par les fonctions de fitness. L'exemple suivant montre l'évolution des règles utilisées avec succès par un joueur placé en position d'attaquant ainsi que l'intervalle de temps correspondant.

```
t1000
R1 SI SansLeBallon ET LoinPositionPlacement ET DerrièreLe-
Ballon ALORS
  AllerVersLeBallon.
```

6.3. APPRENTISSAGE ET ÉVOLUTION À TRAVERS UN JEU DE FOOTBALL VIRTUEL 123

R2 SI AvecLeBallon ET DerrièreLeBallon ET PasDeCollision ALORS TaperFort.
R3 SI PasDeCollision ALORS TaperFort.
R4 SI SansLeBallon ET LoinPositionPlacement ET PasDeCollision ALORS
AllerVersLaPositionPlacement.

t5000

R1

R4

R5 SI SansLeBallon ET DevantLeBallon ET PasDeCollision ALORS
AllerVersLaPositionPlacement.

R6 SI AvecLeBallon ET PasDeCollision ALORS TaperFaible.

t10000

R1

R4

R7 SI SansLeBallon ET PasDeCollision ALORS AllerVersLaPositionPlacement.

R8 SI AvecLeBallon ET ProchePositionPlacement ET PasDeCollision ALORS

PasserDevant.

t15000

R1

R4

R8

R9 SI ProchePositionPlacement ET DevantLeBallon ET PasDeCollision ALORS

AllerVersLeBallon.

Avec cet exemple, nous constatons que le joueur utilise 4 règles qui varient assez régulièrement tout au long de la simulation. La règle R3 disparaît car elle trop générale tandis que les classifieurs plus spécialisés résistent mieux. En effet, à l'instant 15000, les 4 règles utilisent chacune 3 capteurs actifs.

Le comportement global de ce joueur est très offensif car il a tendance à progresser vers le ballon face à deux messages entrants différents. Le même phénomène de spécialisation se retrouve avec, par exemple, un comportement de passeur. Ainsi, les règles dominantes vont progressivement émerger jusqu'à ce qu'elles soient validées et réutilisées avec succès.

Sur l'exemple précédent et plus généralement pour tous les joueurs, nous avons remarqué qu'après quelques itérations, il subsiste à chaque fois trois types de règles :

- Une règle permettant de se diriger et de rester sur la position de placement.
- Une règle favorisant le déplacement vers le ballon.
- Une règle déterminant le type d'action à réaliser sur le ballon.

Ainsi, grâce à ces quelques règles, chaque joueur arrive à recouvrir l'espace des messages entrant et à agir efficacement sur une période de temps qui peut être limitée à cause de la perpétuelle évolution de l'ensemble des acteurs.

6.4 Stratégies de groupes dans un environnement dynamique

6.4.1 Introduction

Le but de cette simulation est de présenter et d'évaluer un modèle pour simuler des comportements individuels et collectifs au sein d'une même plate-forme. Ce modèle combine une interaction entre systèmes de classifieurs et attracteurs pour gérer les déplacements avec une approche déterministe pour les autres comportements. Un utilisateur n'a donc qu'à définir les éléments sensibles de la simulation qui serviront de base pour le déplacement ainsi que les comportements complémentaires qu'il souhaite apporter à ses entités. Il obtiendra ainsi aisément un comportement collectif et adaptatif.

Les premières approches se sont dirigées vers un apprentissage supervisé [215], mais les limitations étant trop importantes nous avons décidé de nous orienter vers une autonomie plus importante en modifiant les caractéristiques de notre modèle. Ce modèle s'articule autour d'un système de classifieurs et d'une combinaison avec des attracteurs pour contrôler le mouvement.

6.4.2 Le modèle comportemental

Le modèle (figure 6.5) se décompose en trois parties : les capteurs, les effecteurs et le module comportemental qui permet le lien entre les deux parties précédentes. Les capteurs et le module comportemental s'organisent selon une structure hiérarchique permettant de répartir les événements suivant leur degré de complexité.

Les capteurs : Chaque entité a accès à la position des différents composants de la simulation tels que les autres entités ou d'autres objets de la scène dans sa couche la plus basse. Ils ont la possibilité de connaître des éléments de plus haut niveau comme la distance à une entité poursuivant le même but.

Les effecteurs : Les effecteurs vont permettre d'agir dans l'environnement. Le déplacement s'effectue sur un espace continu et l'entité a la possibilité de se déplacer dans une des huit positions cardinales sur une distance unitaire.

Le module comportemental : Il s'articule autour d'une architecture hiérarchisée permettant de décrire le comportement que doit avoir une entité. Les couches les plus élevées permettent de définir des comportements de haut niveau et sont spécifiées dans des fichiers externes par l'utilisateur et sont de la forme condition : action. Les actions sont des classes chargées dynamiquement dans la simulation et ayant accès aux capteurs et aux effecteurs. Le centre de décision gère toutes ces couches et la couche la plus basse n'est donc activée que lorsque aucune autre action n'a eu lieu. Elle s'occupe de gérer les déplacements. La gestion des déplacements étant à la base de comportements collectifs, nous allons donc se focaliser essentiellement sur cette couche.

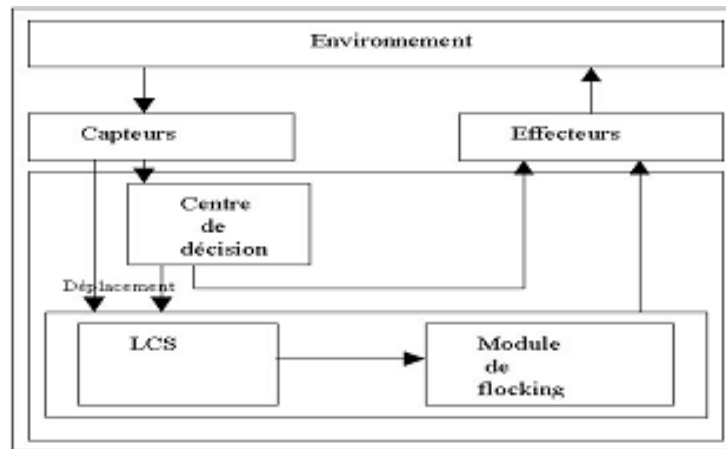


FIG. 6.5 – Schéma d'ensemble du modèle

6.4.3 Le système MDCS (Multiple Data Classifier System)

Notre LCS est un nouveau type de système de classifieurs dérivé des LCS classiques. Celui-ci a été développé de manière à pouvoir mieux prendre en compte les différentes contraintes issues de la réalité virtuelle.

La première contrainte se situe dans le type des données à manipuler : au lieu d'utiliser des chaînes de bit ou trits, notre système va devoir traiter toutes sortes d'informations. Dorigo [175] a déjà mis en place des classifieurs avec deux parties conditions représentant des données différentes : mais là où des classifieurs classiques vont manipuler des chaînes de bit, des réels dans les XCSR [288] ou encore des S-Expressions [239], notre classifieur va manipuler un ensemble de données hétérogènes que ce soit dans la partie condition ou dans la partie action. La partie action consiste en une structure de données composée de plusieurs éléments.

Soit C une condition :

$$C = \{ (a_1)(a_2) \dots (a_n); \\ (b_1)(b_2) \dots (b_m); \\ \dots \\ (t_1)(t_2) \dots (t_p) \}$$

avec a_i, b_i, \dots, t_i des types de données différents

Une entrée X $xa_1, xa_2 \dots xa_n; xb_1, xb_2 \dots xb_m; \dots; xt_1, xt_2 \dots xt_p$ satisfait une condition C si

$$xa_i \text{ satisfait } a_i \\ xb_i \text{ satisfait } b_i \\ \dots \forall i \in 1..n \\ xt_i \text{ satisfait } t_i$$

Les données utilisées pour une entrée ou pour la partie condition sont, pour l'instant, de trois types bit, entier et réel. Les données utilisées pour la partie condition sont de quatre types trit, entier, intervalle entier et intervalle réel. Les intervalles sont utilisés de la même manière que pour Wilson mais sont aussi étendus aux intervalles entiers. C'est à dire qu'une condition réelle ou entière c satisfait un intervalle de borne inférieure inf et de borne supérieure sup si : $inf \leq c \leq sup$.

On représente alors un classifieur comme la concaténation de deux génomes, un pour la partie condition et un pour la partie action :

Exemple de classifieur : `< 0.5;2 1 # a 1 : 2 2.5 true >`

Génome condition : Génome action

Les opérateurs génétiques de croisement et mutation doivent donc être définis pour chacun des types de données. La sélection s'effectue par tournoi pour garder une certaine diversité dans les génomes. Le croisement s'effectue pour chacun des chromosomes du génome. La mutation ne s'applique que sur un des chromosomes de manière à ne pas trop altérer le génome de départ. C'est pourquoi le taux de mutation sera plus élevé.

Pour chaque pas de simulation, il y a une probabilité p d'invocation de l'algorithme génétique. Une succession de mauvaises récompenses résulte dans une baisse de cette valeur p , alors que de bons résultats entraînent une hausse. Le taux de croisement est de 0.2 alors que le taux de mutation est de 0.05.

Afin d'optimiser cet algorithme génétique, le système de corporation mis en place par Tomlinson [3] est mis en place dans notre système. Il permet de regrouper les règles par familles de manière à appliquer un algorithme génétique par groupe pour favoriser la diversité et l'optimalité des règles. Pour cela, chaque classifieur se voit associer une distance qui est dépendante du génotype de la partie condition, action ou des deux. Dans chaque famille, lors de la création d'une nouvelle règle, celle ci vient remplacer une des moins performantes. Lors du croisement, la nouvelle règle reçoit la moyenne des forces des règles parentes.

La deuxième contrainte concerne les rétributions. En effet, celles ci n'ont pas lieu à chaque pas de temps de la simulation mais uniquement après des événements ayant des incidences directes. Tout comme dans les Zeroth Classifier [286] la boucle interne directe disparaît au profit d'une boucle indirecte. En effet un classifieur activé modifie son environnement qui active un autre classifieur jusqu'à récompense. Deux types de récompenses sont alors attribuées: une récompense indirecte qui rétribue chacun des classifieurs activés selon leur fréquence d'apparition (Bucket Brigade) couplé à une récompense directe qui rétribue seulement le dernier classifieur activé afin de favoriser les actions décisives.

Pour optimiser la simulation, lorsqu'un message arrive aux classifieurs et que le classifieur à activer n'est pas le même que lors du pas de simulation précédent, seule la partie action du dernier classifieur est activé. Cela permet d'éviter, soit d'utiliser de trop grands pas de temps qui pourraient faire diverger le système, soit de ralentir la simulation qui se veut temps réel.

La dernière modification concerne les messages n'activant aucun classifieur. Dans ce cas le principe de covering est appliqué afin de rajouter une règle qui pourra répondre au message entrant.

6.4.4 Interaction entre Le MDCS et les attracteurs

Le déplacement est déduit de l'utilisation d'une carte cognitive réduite. Cette carte est construite à partir de fonctions d'attraction. Ces attracteurs peuvent être d'autres entités ou des zones sensibles dans l'environnement. Une combinaison linéaire de ces attracteurs est alors appliquée à chacun des huit points cardinaux autour de l'entité.

Il ne reste alors qu'à définir les priorités au niveau des attracteurs avec les coefficients.

$$f(x) = \alpha f_a(x) + \beta f_b(x) + \dots + \tau f_c(x) + \varepsilon$$

avec $\alpha, \beta, \dots, \tau \in \mathbb{Z}[-4,4]$ et ε un bruit gaussien $\in [-0.1, 0.1]$

Pour cela notre MDCS sera chargé de donner les paramètres $\alpha, \beta, \dots, \tau$ en fonction de l'état observé de l'environnement. un bruit gaussien permet alors d'éviter des situations de blocage.

La complexité d'un tel système est en $O(n^2)$ et augmente au carré avec le nombre d'attracteurs concernés. Cette complexité peut cependant être réduite à $O(n)$ en utilisant un processeur par entité. Une autre manière de réduire la complexité serait de trier les attracteurs à chaque pas de la simulation de manière à ce que dès qu'une entité doit évaluer sa position, elle ne le fasse que par rapport aux attracteurs essentiels en éliminant tous les intermédiaires.

On peut imaginer un module d'apprentissage utilisant des LCS associés à chacune des couches hautes du centre de décision. Mais nous nous sommes concentrés uniquement sur le déplacement car c'est la base d'un comportement collectif. Les autres couches pourraient être gérées plus simplement avec des méthodes d'apprentissage par renforcement.

6.4.5 La simulation

Désireux d'obtenir des comportements collectifs et utilisant uniquement des fitness globales, nous avons choisi une simulation de basket-ball. En effet, comparé à une simulation de football, lors d'un match de basket, beaucoup plus d'événements marquants ont lieu. L'évolution du score est plus rapide, des séquences de jeu plus courtes et les actions se finissent en un temps minimum. L'évolution des caractéristiques d'apprentissage convergera donc plus rapidement que dans toute autre simulation de jeu en équipe. Dans les expériences suivantes, lorsqu'on parle de comportement spécifié, le module comportemental tel que nous l'avons défini est surchargé et un scénario donne un lien direct entre les capteurs et les effecteurs. Les entités contrôlées ainsi ont donc un comportement statique.

6.4.6 Les résultats

Expérience 1 : Cette simulation et ces résultats ont été obtenus lors d'une confrontation entre une équipe au comportement spécifié et une équipe avec notre module

comportemental. Voici alors une séquence de valeurs représentant l'évolution de la fitness de deux joueurs contrôlés par notre système:

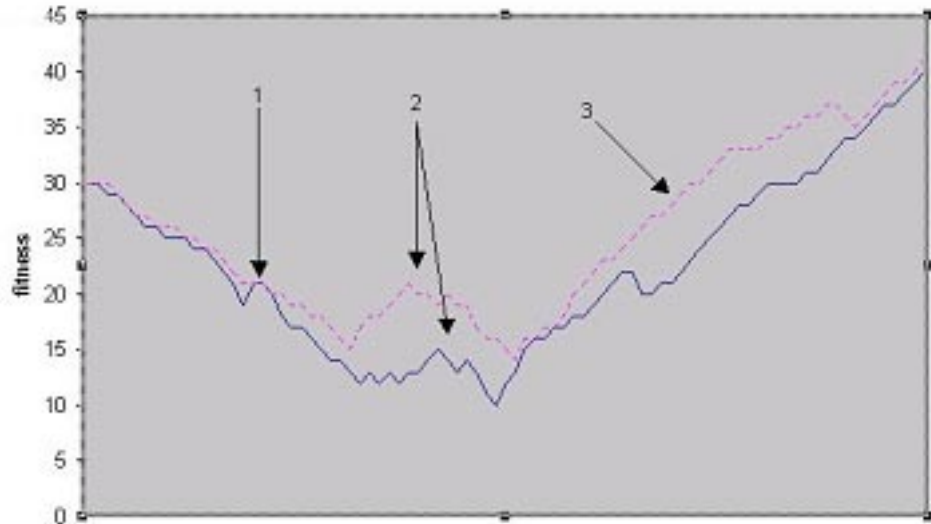


FIG. 6.6 – évolution de la fitness pour deux joueurs d'une même équipe

On constate alors trois points marquants sur ces courbes : (1) Tout d'abord une augmentation de la fitness du joueur 1 alors que la fitness du joueur 2 continue à baisser. C'est dû à quelques récompenses individuelles dues à de bonnes actions individuelles. (2) Cette fois-ci les récompenses individuelles pour le joueur 1 entraînent une amélioration globale de la fitness de l'autre joueur et donc de l'équipe. (3) L'évolution de la fitness des deux joueurs correspond à l'évolution globale de la fitness jusqu'à avoir un résultat et une équipe prenant le dessus sur l'équipe au comportement spécifié.

Expérience 2 : L'équipe 1 est contrôlée par notre modèle comportemental. L'équipe 2 possède deux types de comportements spécifiés. Le joueur 3 possède un comportement offensif et égoïste alors que les autres joueurs de son équipe n'ont qu'un comportement défensif.

Après 10 minutes de simulation voici le classifieur ayant la meilleure fitness de tous les joueurs de l'équipe 1. $\langle 0\ 03\ \# 28.76 : 1\ 1\ -1\ 4\ 0\ 0\ 1 \rangle$

Cela signifie que lorsqu'il n'a pas la balle (0) et que le joueur adverse 3 l'a (03), quelle que soit la zone dans laquelle il se trouve (#) du moment qu'il est au plus à une distance de (28.76) de ce joueur, les valeurs d'attraction sont moyennes sauf pour le joueur 3 qui attire particulièrement. Un phénomène de marquage s'est alors mis en place contre le joueur ayant des tendances individualistes.

Expérience 3 : Confrontation en co-évolution avec donc deux équipes utilisant notre modèle :

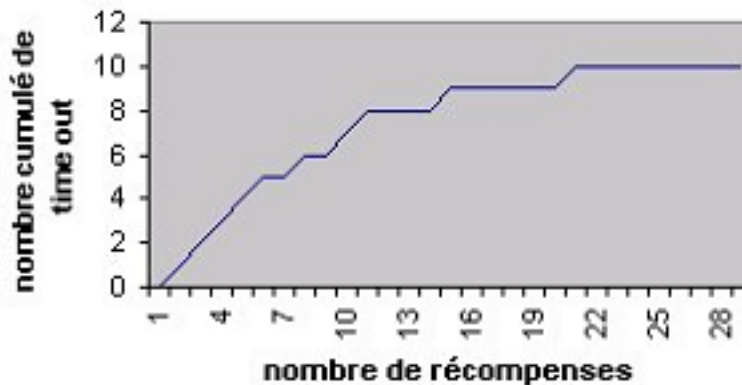


FIG. 6.7 – nombre cumulé de situations de blocage

Un blocage (time out) arrive lorsque l'équipe qui a le ballon n'a pas tenté d'actions significatives pendant 30 secondes. Le ballon est alors donné à l'équipe adverse. Cela permet d'achever des situations improductives lors de situations de co-évolution. Or le nombre cumulé de blocage stagne assez rapidement. Après une vingtaine de récompenses attribuées, celui-ci ne bouge plus et les deux équipes arrivent à jouer, les séquences de classifieurs étant satisfaisantes pour la simulation.

On note cependant un jeu haché et les tactiques offensives prennent rapidement le dessus sans voir apparaître de situations défensives. Des problèmes de subsistent lors de la co-évolution. Cela est dû à la lenteur de la convergence. Une solution pour remédier à cela serait d'introduire des fonctions de fitness plus locales pour accélérer ce traitement. L'espace de recherche du LCS pourrait également être réduit en simplifiant la nature des données utilisées dans le LCS en contraignant les intervalles ou les données à l'intérieur de bornes restreintes par exemple.

A partir de trois comportements définis de manière externe, passe tir et interception, on obtient une simulation de basket avec des équipes au comportement adaptatif important. En effet des comportements d'attaque/défense ainsi que de marquage sur les joueurs adverses émergent de la simulation. Cependant il subsiste une certaine lenteur dans la convergence surtout lors de situation de co-évolution. Il reste donc à améliorer cet aspect du modèle pour obtenir des entités au comportement plus robuste.

6.5 Conclusion

Cet article a présenté les principaux types de systèmes de classifieurs, présentant leurs aspects et insistant sur leurs capacités de prédiction de la rétribution, d'anticipation ou de planification de comportement. Dans notre approche, nous avons envisagé de prendre en compte des éléments tels que la collaboration ou le multi-tâches pour intégrer des LCS dans des simulations temps-réel en environnement dynamique.

Le premier modèle appelé α CS propose un système comportemental particulière-

ment adapté à la résolution de problèmes multicritères. Grâce à des stratégies de coopération et de communication basées sur l'échange de règles, ce système permet d'obtenir des comportements évolutif et favorise ainsi la spécialisation d'entités confrontées à une tâche commune. Le deuxième est plus un modèle comportemental qu'une évolution d'un LCS. Il se caractérise par un modèle hiérarchique utilisant un LCS plus adaptée aux différents types de données utilisées dans ces environnements virtuels (MDCS). Il apporte ses facultés d'adaptation pour aider un utilisateur à définir des comportements complexes.

Ces deux applications ont montré la puissance des LCS dans le domaine peu exploré des simulations coopératives en environnement virtuel. Les résultats sont encourageants et devraient déboucher sur des simulations plus complexes, avec des interactions plus importantes avec des utilisateurs.

Ces deux simulations s'appuient sur la plate forme d'animation de personnages LIVE développée dans notre équipe [316]. Elle contrôle l'animation de personnages articulés et s'interface à l'aide d'un langage de haut niveau. Une plate-forme de Réalité Virtuelle Distribuée [219] devrait également permettre la concurrence des deux systèmes sachant qu'il faudra auparavant régler le problème de fréquence lié à l'utilisation ou non de fitness locales dans les modèles.

Chapitre 7

Conclusion

Le mot-clé principal de l'ensemble des travaux présentés est celui de l'humanoïde virtuel : comment le modéliser, l'animer, le contrôler, définir ses interactions avec son environnement et avec ses congénères. Nous nous sommes focalisé au sein du thème cinq sur l'aspect modélisation du comportement humain individuel et collectif. A travers ce document, nous avons cherché à rendre compte à la fois de l'activité de recherche effectuée dans ce domaine mais aussi des relations existant avec plusieurs disciplines connexes fermes de ces travaux : la psychologie, la sociologie et les sciences cognitives.

Bibliographie

- [1] A. (ROBERT), F. (CHANTEMARGUE) et M. (COURANT). – Grounding agents in emud artificial worlds. *In: Virtual world, First International Conference, VW'98*, éd. par Heudin (J.C.). – Paris, France, juillet 1998.
- [2] A. (TOMLINSON) et L. (BULL). – A corporate xcs. *In: IWLCS'99, Second International Workshop on Learning Classifier Systems*. – Orlando, USA, juillet 1999.
- [3] A. (TOMLINSON) et L. (BULL). – A zeroth level corporate classifier system. *In: IWLCS'99, Second International Workshop on Learning Classifier Systems*. – Orlando, USA, juillet 1999.
- [4] Acquisti (Alessandro), Clancey (William J.), van Hoof (Ron), Scott (Mike) et Sierhuis (Maarten). – *BRAHMS TUTORIAL, VERSION 1.0*, juillet 2003.
- [5] Ahmad (O.), Cremer (J.), Hansen (S.), Kearney (J.) et Willemsen (P.). – Hierarchical, concurrent state machines for behavior modeling and scenario control. *In: Conference on AI, Planning, and Simulation in High Autonomy Systems*. – Gainesville, Florida, USA, 1994.
- [6] Albrechtsen (H.), Andersen (H.H.K.), Bodker (S.) et Pejtersen (A.M.). – *Affordances in activity theory and cognitive systems engineering*. – Rapport technique nRiso-R-1287(EN), Riso National Labolatoty, Roskilde, 2001.
- [7] Ambroszkiewicz (S.) et Komar (J.). – *Formal Models of Agents*, chap. A Model of BDI-Agent in Game-Theoretic Framework, pp. 8–19. – Springer, 2000, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, volume 1760.
- [8] Andersen (G.J.), Cisneros (J.), Atchley (P.) et Saidpour (A.). – Speed, size and edge-rate information for the detection of collision events. *Journal of Experimental Psychology: Human, Perception and Performance*, vol. 25, 1999, pp. 256–269.
- [9] Anderson (David) et Copeland (B. Jack). – Artificial life and the chinese room argument. *Artificial Life*, vol. 8, n4, 2003, pp. 371–378.
- [10] Anderson (J.R.). – *Rules of the Mind*. – Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates, 1993.
- [11] Anderson (J.R.), Bothell (D.), Byrne (M.D.), Douglass (S.), Lebiere (C.) et Qin (Y.). – An integrated thory of the mind. – disponible sur le site de J.R. Anderson.

- [12] Anderson (J.R.) et Lebiere (C.). – *The atomic components of thought.* – Lawrence Erlbaum Associates, 1998.
- [13] André (E.), Rist (T.), Van Mulken (S.), Klesen (M.) et Baldes (S.). – The automated design of believable dialogues for animated presentation teams. *In : Embodied Conversational Agents*, éd. par Cassell (J.), Sullivan (J.), Prevost (S.) et Churchill (E.), pp. 220–255. – MIT Press, 2000.
- [14] Andronache (V.) et Scheutz (M.). – Contention scheduling: a viable action-selection mechanism for robotics? *In : Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference (MAICS).* – AAAI Press.
- [15] Arbib (M.A.). – *The metaphorical brain: an introduction to cybernetics as artificial intelligence and brain theory.* – New York, USA, Wiley Interscience, 1972.
- [16] Archea (J.). – *The Evacuation of Non-Ambulatory Patients from Hospital and Nursing Home First: A Framework for a Model.* – Rapport technique, National Engineering Laboratory, Washington DC, National Bureau of Standards, Center for Building Technology, 1979.
- [17] Ashida (K.), Lee (S.), Allbeck (J.), Sun (H.), Badler (N.) et Metaxas (D.). – Pedestrians: Creating agent behaviors through statistical analysis of observation data. *In : Computer Animation*, éd. par Society (IEEE Computer), pp. 84–92. – Seoul, Korea, 2001.
- [18] Atkinson (R.C.) et Shiffrin (R.M.). – Human memory: A proposed system and its control processes. *In : The Psychology of Learning and Motivation*, éd. par Spence (K.W.) et Spence (J.T.), pp. 89–95. – New York: Academic Press, 1968.
- [19] Azimzadeh (Mir) et Klarqvist (Björn). – Phenomenal space: Attitudes and methods. *In : Space Syntax, 4th International Symposium.* – University College London, juin 2003.
- [20] B. (Rouse W.) et M. (Morris N.). – On looking into the black box : prospects and limits in the search for mental models. *Psychological bulletin*, vol. 100, 1986, pp. 349–363.
- [21] Baddeley (A.D.). – *Working memory.* – Clarendon Press, 1986.
- [22] Baddeley (A.D.). – *Human Memory: Theory and practice.* – Lawrence Erlbaum Associates, 1990.
- [23] Baddeley (A.D.) et Hitch (G.J.). – Working memory. *In : The psychology of learning and motivation Vol. VIII*, pp. 47–89. – New York, Academic Press., g. bower édition, 1974.
- [24] Badler (N.), Cassell (J.), Hayes-Roth (B.), Johnson (W.L.), Lester (J.) et Rickel (J.). – Smart(er) animated agents. *In : Cours numéro 27 de la conférence SIG-GRAPH'99.* – ACM, 1999.
- [25] Badler (N.I.), Phillips (C.B.) et Webber (B.L.). – *Simulating humans : computer graphics animation and control.* – New York, Oxford University Press, 1993.
- [26] Badler (N.I.), Reich (B.D.) et Webber (B.L.). – Towards personalities for animated agents with reactive and planning behaviors. *Lecture Notes in Artificial*

- Intelligence, Creating Personalities for synthetic actors*, no1195, 1997, pp. 43–57.
- [27] Bakker (Bram). – The adaptive behavior approach to psychology. *Cognitive Processing*, vol. 1, 2000, pp. 39–70.
- [28] Ballaz (C.), Marendaz (C.), Chauvin (A.) et Peyrin (C.). – L'orientation canonique comme déterminant de la saillance perceptive. *InCognito*, vol. 22, 2001, pp. 37–46.
- [29] Bates (J.). – Virtual reality, art, and entertainment. *Presence*, vol. 1, n1, 1992, pp. 133–138.
- [30] Berne (Eric). – *Transactional Analysis in Psychotherapy*. – Ballantine Books (new edition), 1961.
- [31] Berne (Eric). – *Games people play: The Psychology of Human Relationships*. – Ballantine Books (new edition), 1964.
- [32] Bernstein (N.). – *The coordination and regulation of movement*. – New York, Pergamon Press, 1967.
- [33] Berthoz (A.). – *Le sens du mouvement*. – Paris, Odile Jacob, 1997.
- [34] Blumberg (B.M.) et Galyean (T.A.). – Multi-level direction of autonomous creatures for real-time virtual environments. *In: Siggraph*. pp. 47–54. – Los Angeles, California, U.S.A., août 1995.
- [35] Boden (M.A.). – Precis of the creative mind: myths and mechanisms. *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 17, n3, 1994, pp. 519–570.
- [36] Boles (W.). – Planning pedestrian environments: A computer simulation model. *Man-Environment Systems*, vol. 11, 1981, pp. 41–56.
- [37] Booth (M.), Cremer (J.) et Kearney (J.). – Scenario control for real-time driving simulation. *In: Fourth Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, pp. 103–119. – Politechnical University of Catalonia, septembre 1993.
- [38] Bordreux (C.), Boulic (R.) et Thalmann (D.). – Physically-based rendering and animation: an efficient and flexible perception pipeline for autonomous agents. *Computer Graphics Forum*, vol. 18, n3, 1999, pp. 23–30.
- [39] Bradshaw (J.M.), Greaves (M.), Holmback (H.), Karygiannis (T.), Jansen (W.) et Silverman (B.G.). – Agents for the masses? *IEEE Intelligent Systems*, vol. 14, n2, 1999, pp. 53–63.
- [40] Bratman (M.E.). – *Intentions, Plans and Practical Reason*. – Cambridge, MA, Harvard University Press, 1987.
- [41] Braun (A.), Musse (S.R.), de Oliveira (L.P.L.) et Bodmann (B.E.J.). – Modeling individual behaviors in crowd simulation. *In: CASA2003, 16th International Conference on Computer Animation and Social Agents*. pp. 143–148. – Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, USA, mai 2003.
- [42] Brazier (F.), Dunin-Keplicz (B.), Treur (J.) et Verbrugge (R.). – *Formal Models of Agents*, chap. Modelling Internal Dynamic Behaviour of BDI Agents, pp. 36–56. – Springer, 2000, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, volume 1760.

- [43] Brooks (R.A.). – Elephants don't play chess. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 6, 1990, pp. 3–15.
- [44] Brooks (R.A.). – Intelligence without reason. In : *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, éd. par Myopoulos (J.) et Reiter (R.). pp. 569–595. – Sydney, Australia, 1991.
- [45] Brooks (R.A.). – Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, vol. 47, 1991, pp. 139–159.
- [46] Brunia (C.H.M.). – Neural aspects of anticipatory behavior. *Acta Psychologica*, vol. 101, 1999, pp. 213–242.
- [47] Butz (M.V.) et Hoffmann (J.). – Anticipations control behavior: Animal behavior in an anticipatory learning classifier system. *Adaptive Behavior*, vol. à paraître, 2003.
- [48] Buzsaki (G.), Horvath (Z.), Urioste (R.), Hetke (J.) et Wise (K.). – High frequency network oscillations in the hippocampus. *Science*, vol. 256, 1992, pp. 1025–1027.
- [49] Byrne (M.D.). – *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications*, chap. Cognitive architecture. – Mahwah, NJ:L. Erlbaum, 2002.
- [50] C. (Bonnet), J.M. (Hoc) et G. (Tiberghien). – *Psychologie, intelligence artificielle et automatique*. – Collection Psychologie et Sciences Humaines. Bruxelles, 1986.
- [51] C. (LATTAUD). – A macro-mutation operator in genetic algorithms. In : *13th European Conference on Artificial Intelligence*. – Brighton, août 1998.
- [52] C. (SANZA), C. (PANATIER) et Y. (DUTHEN). – Communication and interaction with learning agents in virtual soccer. In : *VW'2000, 2nd International Conference on Virtual World, LNCS VOL. 1834*. – Paris, France, juillet 2000.
- [53] C. (SANZA), O. (HEGUY) et Y. (DUTHEN). – Evolution of cooperative virtual entities by classifier systems. In : *CAS'2001 Eurographics Workshop on Computer Animation*. – Manchester, septembre 2001.
- [54] C. (WATKINS). – *Learning from Delayed Rewards*. – Thèse de PhD, Cambridge University, 1989.
- [55] Cassel (J.) (édité par). – *Embodied Conversational Agents*. – MIT Press, 2000.
- [56] Chopra-Khullar (S.) et Badler (N.I.). – Where to look? automating attending behaviors of virtual human characters. In : *Autonomous Agents '99*. – Seattle, WA, 1999.
- [57] Christoffersen (K.), Hunter (C.N.) et Vicente (K.J.). – A longitudinal study of the effects of ecological interface design on deep knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 48, 1998, pp. 729–762.
- [58] Clancey (William J.). – *Situated Cognition: On Human Knowledge and Computer Representations*. – Cambridge University Press, 1997.

- [59] Clancey (William J.). – Simulating activities: Relating motives, deliberation, and attentive coordination. *Cognitive Systems Research*, vol. 3, n3, 2002, pp. 471–499.
- [60] Coderre (B.). – Modeling behavior in petworld. *In : artificial life*. pp. 407–420. – Addison-Wesley.
- [61] Cooper (R.) et Shallice (T.). – Contention scheduling and the control of routine activities. *Cognitive Neuropsychology*, vol. 17, 2000, pp. 297–338.
- [62] Cornwell (J.B.), O'Brien (K.), Silverman (B.G.) et Toth (J.A.). – Affordance theory for improving the rapid generation, composability, and reusability of synthetic agents and objects. *In : Conference on Behavior Representation in Modeling and Simulation (BRIMS)*. pp. 50–63. – SISO. <http://www.sisostds.org/conference/index.cfm?conf=03BRIMS>.
- [63] Courty (N.), Marchand (E.) et Arnaldi (B.). – A new application for saliency maps: synthetic vision of autonomous actors. *In : International Conference on Image Processing (ICIP)*. IEEE. – Barcelona, Spain, 2003.
- [64] Craik (K.). – *The nature of explanation*. – Cambridge University Press, 1943.
- [65] D. (CLIFF) et ROSS (S.). – Adding temporary memory to zcs. *Adaptive Behavior*, vol. 3, n2, 1995, pp. 101–150.
- [66] D. (Diapper) (édité par). – *Task analysis for Human-Computer Interaction*. – Ellis Horwood, 1989.
- [67] Daamen (W.) et Hoogendoorn (S.P.). – *Experimental Research of Pedestrian Walking Behavior*. – Rapport technique nTRB2003-001113, TRB, 2003.
- [68] Dautenhahn (K.). – The art of designing socially intelligent agents: science, fiction and the human in the loop. *Applied Artificial Intelligence Journal*, vol. 12, n7-8, 1998, pp. 573–617.
- [69] DE JONG (K.A.). – *An analysis of the behaviour of a class of genetic adaptive systems*. – Thèse de PhD, University of Michigan, 1975.
- [70] Decugis (V.) et Ferber (J.). – Action selection in an autonomous agent with a hierarchical distributed reactive planning architecture. *In : Autonomous Agents'98*. pp. 354–361. – Minneapolis, USA, 1998.
- [71] Devillers (F.), Donikian (S.) et Lamarche (F.). – A programming environment for behavioral animation. *Visualisation and Computer Animation*, vol. 13, 2002, pp. 263–274.
- [72] Dewey (J.). – The reflex arc concept in psychology. *Psychological Review*, vol. 3, 1896, pp. 357–370.
- [73] D.L. (Scapin) et J.M.C. (Bastien). – Analyse des tâches et aide ergonomique à la conception : l'approche mad. *In : Systèmes d'information et interactions homme-machine*, éd. par C. (Kolski). – Toulouse, 2001.
- [74] Donikian (S.). – Les modèles comportementaux pour la génération du mouvement d'objets dans une scène. *Revue Internationale de CFAO et d'Infographie*, vol. 9, n6, 1994, pp. 847–871. – Numéro Spécial 1re journées AFIG Groplan.

- [75] Donikian (S.). – HPTS: a behaviour modelling language for autonomous agents. *In: Fifth International Conference on Autonomous Agents.* – Montreal, Canada, mai 2001.
- [76] Donikian (S.) et Arnaldi (B.). – Complexity and concurrency for behavioral animation and simulation. *In: Fifth Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, éd. par Hégron (G.) et Fahlander (O.). – Oslo, Norvège, septembre 1994.
- [77] Donikian (S.) et Rutten (E.). – Reactivity, concurrency, data-flow and hierarchical preemption for behavioural animation. *In: Programming Paradigms in Graphics'95*, éd. par R.C. Veltkamp (E.H. Blake). – Springer-Verlag.
- [78] Doyle (P.). – Believability though context: using "knowledge in the world" to create intelligent characters. *In: International Joint Conference on Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS)*. pp. 342–349. – ACM Press.
- [79] Doyle (P.) et Hayes-Roth (B.). – *Agents in annotated worlds.* – Rapport technique nKSL-97-09, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, 1997.
- [80] Doyle (P.) et Hayes-Roth (B.). – Agents in annotated worlds. *In: Autonomous Agents'98*. pp. 173–180. – Minneapolis, USA, 1998.
- [81] Droulez (J.) et Berthoz (A.). – Servo-controlled (concerervative) versus topological (projective) modes of sensory motor control. *In: Disorders of Posture and Gait*, éd. par Bles et Brandt (T.), pp. 83–97. – Amsterdam, Elsevier, 1988.
- [82] Duchon (A. P.) et Warren (W. H.). – Robot navigation from a gibsonian viewpoint. *In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, pp. 2272–2277. – San Antonio, TX, USA, 1994.
- [83] Duchon (A.P.), Warren (W.H.) et Kaelbling (L.P.). – Ecological robotics. *Adaptive Behavior*, vol. 6, n3/4, 1998, pp. 471–507.
- [84] Duckham (Matt) et Kulik (Lars). – Simplest paths: Automated route selection for navigation. *In: COSIT'03*, éd. par Kuhn (W.), Worboys (M.F.) et Timpf (S.). pp. 169–185. – Springer-Verlag.
- [85] E. (Ritter F.), R. (Shabolt N.), D. (Elliman), R. (Young), F. (Gobet) et D. (Baxter G.). – *Techniques for modeling Human performance in synthetic environments : a supplementary review.* – Rapport technique, Wright Patterson Air Force Base, OH : Human systems Information Analysis Center, 2001.
- [86] Egenhofer (M.J.). – Reasoning about binary topological relations. *In: Advances in Spatial Databases, 2nd Symposium SSD'91*, éd. par Gunther (O.) et Schek (H.J). pp. 143–160. – Zurich, Suisse, août 1991.
- [87] Elliott (C.). – I picked up catapia and other stories: a multimodal approach to expressivity for "emotionally intelligent" agents. *In: International Conference on Autonomous Agents (Agents)*, pp. 451–457.
- [88] Engle (Randall W.) et Oransky (Natalie). – *The Nature of Cognition*, chap. Multi-Store versus Dynamic Models of Temporary Storage in Memory, pp. 515–555. – The MIT Press, 1999.

- [89] Farenc (N.), Boulic (R.) et Thalmann (D.). – An informed environment dedicated to the simulation of virtual humans in urban context. *In: EUROGRAPHICS'99*, éd. par Brunet (P.) et Scopigno (R.). pp. 309–318. – Blackwell.
- [90] Fechner (G.). – *Elemente der psychophysik*. – Leipzig: Breitkopf und Härtel, 1860.
- [91] Ferber (J.). – *Les systemes multi-agents, vers une intelligence collective*. – Paris, InterEditions, 1995.
- [92] Firth (D.E.). – *Pedestrian Accidents*, chap. 2: Pedestrian Behaviour. – John Wiley & Sons Ltd, 1982.
- [93] Flach (J.M.) et Holden (J.G.). – The reality of experience: Gibson's way. *Presence*, vol. 7, n1, 1998, pp. 90–95.
- [94] Fodor (J.A.). – *The Language of Thought*. – Cambridge, MA, MIT Press, 1975.
- [95] Forssén (P.). – *Autonomous navigation using active perception*. – Rapport technique nLiTH-ISY-R-2395, Sweden, Dept. EE, Linköping University, 2001.
- [96] Franck (A.). – Formal models for cognition - taxonomy of spatial location description and frames of reference. *In: Spatial Cognition - An Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge*. – Springer-Verlag.
- [97] Franck (A.U.), Bittner (S.) et Raubal (M.). – Spatial and cognitive simulation with multi-agent systems. *In: COSIT2001*. pp. 124–139. – Springer-Verlag.
- [98] Frese (Michael) et Zapf (Dieter). – Action as the core of work psychology : a german approach. *In: Handbook of Industrial and Organizational Psychology*, éd. par Donnetti (M.D.), Hough (L.M.) et Triandis (H.C.), pp. 271–340. – Palo Alto, USA, Consulting Psychology, 1994.
- [99] Fuchs (P.), Arnaldi (B.) et Tisseau (J.). – *Le traité de la réalité virtuelle, volume 1*, chap. La réalité virtuelle et ses applications. – Paris, Presses de l'Ecole des Mines, 2003. ISBN 2-911762-47-9.
- [100] Funge (J.), Tu (X.) et Terzopoulos (D.). – Cognitive modeling: Knowledge, reasoning and planning for intelligent characters. *In: SIGGRAPH'99*, pp. 29–38. – Los Angeles, août 1999.
- [101] Gardner (H.). – *The mind's new science: a history of the cognitive revolution*. – New York, Basic Book Inc., 1985.
- [102] Gibson (J.). – The theory of affordances. *In: Perceiving, acting and knowing - Towards an ecological psychology*. pp. 67–82. – Houghton-Mifflin.
- [103] Gibson (J.J.). – Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *British Journal of Psychology*, vol. 49, 1958, pp. 182–194.
- [104] Gibson (J.J.). – The theory of affordances. *In: Perceiving, acting and knowing - toward an ecological psychology*, éd. par Shaw (R.E.) et Bransford (J.). – London, Lawrence Erlbaum Associates, 1977.
- [105] Gibson (J.J.). – *The ecological approach to visual perception*. – London, Lawrence Erlbaum Associates, 1979.
- [106] Gibson (J.J.). – *The ecological approach to visual perception*. – NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc, Hillsdale, 1986.

- [107] Goel (V.) et Pirolli (P.). – The structure of design problem space. *Cognitive Science*, vol. 16, 1992, pp. 395–429.
- [108] Goffman (E.). – *Relations in public : microstudies of the public order*. – New York : Basic Books, 1971.
- [109] Goldenstein (S.), Karavelas (M.), Metaxas (D.), Guibas (L.), Aaron (E.) et Goswami (A.). – Scalable nonlinear dynamical systems for agent steering and crowd simulation. *Computer & Graphics*, vol. 25, 2001, pp. 983–998.
- [110] Golson (H.L.) et Dabbs (J.M.). – Line following tendencies among pedestrians: A sex difference. *Personality and Social Psychology Bulletin*, vol. 1, n1, 1974, pp. 16–18.
- [111] Gratch (J.), Rickel (J.), André (E.), Badler (N.), Cassell (J.) et Petajan (E.). – Creating interactive virtual humans: some assembly required. In : *IEEE Intelligent Systems, Virtual Humans Workshop (IEEE-IS)*, pp. 54–63.
- [112] Guillot (A.) et Meyer (J.A.). – From sab94 to sab2000: what's new, animat? In : *From Animals to Animats (SAB)*, pp. 1–10.
- [113] H. (Hammouche). – *De la modélisation des tâches à la spécification d'interfaces utilisateur*. – Rapport technique n1959, Rocquencourt, INRIA, 1993.
- [114] H. (Johnson) et P. (Johnson). – Task knowledge structures: Psychological basis and integration into system design. *Acta Psychologica*, vol. 78, 1991, pp. 3–26.
- [115] Harnad (Stevan). – The symbol grounding problem. *Physica D*, vol. 42, 1990, pp. 335–346.
- [116] Harrell (W.A.). – Factors influencing pedestrian cautiousness in crossing streets. *The journal of social psychology*, vol. 131, n3, 1990, pp. 367–372.
- [117] Harrell (W.A.). – Gap acceptance by pedestrians. *Perceptual and motor skills*, vol. 75, n2, 1992, pp. 432–434.
- [118] Havelange (V.), Lenay (C.) et Stewart (J.). – Les représentations: mémoire externe et objets techniques. *Intellectica*, vol. 35, 2002, pp. 115–129.
- [119] Hayes (P.J.). – *Readings in planning*, chap. The frame problem and related problems in artificial intelligence, pp. 588–595. – Morgan Kaufmann, 1990.
- [120] Hayes-Roth (B.) et Van Gent (R.). – *Story-making with improvisational puppets and actors*. – Rapport technique nKSL-96-05, Stanford, CA, USA, Stanford University, 1996.
- [121] Helbing (D.), Farkas (I.) et Vicsek (T.). – Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, vol. 407, 2000, pp. 487–490.
- [122] Henderson (L.F.). – The statistics of crowd fluids. *Nature*, vol. 229, 1971, pp. 381–383.
- [123] Hillier (B.), Penn (A.), Hanson (J.), Grajewski (T.) et Xu (J.). – Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 20, 1993, pp. 29–66.
- [124] Hirose (Naoya). – An ecological approach to embodiment and cognition. *Cognitive Systems Research*, vol. 3, n3, 2002, pp. 289–299.

- [125] Hoc (J.M.) et Amalberti (R.). – Diagnosis: some theoretical questions raised by applied research. *Current Psychology of Cognition*, vol. 14, 1995, pp. 73–101.
- [126] Hochmair (H.). – *Spatial Information in the Environment, Innovations in GIS* 8, chap. Adapting One's Mental Model: An Essential Process for Successful Navigation in an Environment, pp. 147–163. – Taylor and Francis, 2001.
- [127] Hostetler (T. R.) et Kearney (J. K.). – Strolling down the avenue with a few close friends. In : *Third Irish Workshop on Computer graphics*, pp. 7–14.
- [128] Howarth (Ian). – The relationship between objective risk, subjective risk and behaviour. *Ergonomics*, vol. 31 (4), 1988, pp. 527–535.
- [129] Isbister (K.) et Hayes-Roth (B.). – *Social implications of using synthetic characters: an examination of a role-specific intelligent agent*. – Rapport technique nKSL-98-01, Knowledge Systems Laboratory, Standford University, 1998.
- [130] Isla (D.A.). – *The virtual hippocampus : spatial common sence for synthetic creatures*. – Thèse de PhD, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [131] J.C. (Sperandio) et M. (Wolff) (édité par). – *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie*. – Paris, Presses Universitaires de France, 2003.
- [132] J.E. (Laird), A. (Newell) et P.S. (Rosenbloom). – Soar: an architecture for general intelligence. *Artificial Intelligence*, vol. 33, n1, 1987, pp. 1–64.
- [133] Jefferies (M.E.) et Yeap (W.K.). – The utility of global representations in a cognitive map. In : *COSIT2001*, pp. 233–246. – Springer-Verlag.
- [134] J.F. (Richard), C. (Bonnet) et R. (Ghiglione). – *Traité de Psychologie Cognitive : Le traitement de l'information symbolique*. – Paris, Dunod, 1990.
- [135] J.H. (HOLLAND). – *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. – Ann Arbor, University of Michigan Press, 1975.
- [136] J.H. (HOLLAND). – Adaptation. In : *Progress in theoretical biology*, éd. par Rosen (R.) et Snell (F.N.). – New York Academic Press.
- [137] J.H. (HOLLAND). – Adaptive algorithms for discovering and using general patterns in growing knowledge bases. *International Journal for Policy Analysis and Informations Systems*, vol. 4, n3, 1980, pp. 245–268.
- [138] J.H. (HOLLAND) et J. (REITMAN). – Cognitive systems based on adaptive algorithms. In : *Pattern Directed Inference Systems*, pp. 313–329. – New York Academic Press.
- [139] J.M. (Burkhardt), B. (Bardy) et D. (Lourdeaux). – Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. *Psychologie Française*, vol. 48, 2003, pp. 35–42.
- [140] Johnson (M.P.), Wilson (A.), Kline (C.), Blumberg (B.M.) et Bobick (A.F.). – Sympathetic interfaces: using a plush toy to direct synthetic characters. In : *Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 152–158.

- [141] J.Y. (DONNART) et J.A. (MEYER). – A hierarchical classifier system implementing a motivationally autonomous animat. In: *SAB'94, From Animals To Animats 3, Third International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. – Brighton, UK, 1994.
- [142] Kallmann (M.). – *Object Interaction in Real-Time Virtual Environments*. – Lausanne, Thèse de PhD, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001.
- [143] Kallmann (M.E.) et Thalmann (D.). – Modeling objects for interaction tasks. In: *Eurographics Workshop on Animation and Simulation*. – Lisbon, Portugal, septembre 1998.
- [144] Kanngiesser (Siegrefied). – Inside and outside the chinese room. In: *Foundations of Computer Science: Potential - Theory - Cognition*, éd. par Freksa (C.), Jantzen (M.) et Valk (R.). pp. 359–368. – Springer-Verlag.
- [145] Keijzer (Fred). – Representation in dynamical and embodied cognition. *Cognitive Systems Research*, vol. 3, n3, 2002, pp. 275–288.
- [146] Kesner (R.P.) et Rolls (E.T.). – Role of long-term synaptic modification in short-term memory. *Hippocampus*, vol. 11, 2001, pp. 240–250.
- [147] Kieras (D.E.) et Meyer (D.E.). – An overview of the epic architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, vol. 12, n4, 1997, pp. 391–438.
- [148] Kieras (D.E.), Meyer (D.E.), Mueller (S.) et Seymour (T.). – Insights into working memory from the perspective of the epic architecture for modeling skilled perceptual-motor and cognitive human performance. In: *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*, éd. par Miyake (A.) et Shah (P.). pp. 183–223. – New York, 1999.
- [149] Kihlstrom (John F.). – *The Nature of Cognition*, chap. Conscious versus Unconscious Cognition, pp. 173–203. – The MIT Press, 1999.
- [150] Kintsch (W.). – *Comprehension: A paradigm for cognition*. – New York, Cambridge University Press, 1998.
- [151] K.J. (Gilhooly) et A.J.K. (Green). – *Acquisition and Performance of cognitive skills*, chap. Learning problem skills. – John Wiley and sons, 1989, a.m. colley and j.r. beech édition.
- [152] Klatzky (R.J.). – Allocentric and egocentric spatial representation: definitions, distinctions and interconnections. In: *Spatial Cognition - An Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge*. – Springer-Verlag.
- [153] Knauff (Markus), Rauh (Reinhold) et Renz (Jochen). – A cognitive assessment of topological spatial relations: Results from an empirical investigation. In: *CO-SIT'97*, éd. par Hirtle (Stephen C.) et Franck (Andrew U.). pp. 193–206. – Springer.
- [154] Koga (Y.), Annesley (G.), Becker (C.), Svihura (M.) et Zhu (D.). – On intelligent digital actors. In: *IMAGINA'98*.
- [155] Kosko (B.). – Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 24, 1986, pp. 65–75.

- [156] Kuhl (J.). – Volitional aspects of achievement motivation and learned helplessness : towards a comprehensive theory of action control. *In : Progress in experimental personality research*, éd. par Maher (B. A.), pp. 99–171. – New York, USA, Academic Press, 1984.
- [157] Kuipers (B.). – *Spatial Orientation: Theory, Research, and Application*, chap. The cognitive map: Could it have been any other way?, pp. 345–359. – Plenum Press, 1983.
- [158] Kuipers (B.). – The spatial semantic hierarchy. *Artificial Intelligence*, vol. 119, 2000, pp. 191–233.
- [159] Lahlou (S.). – Attracteurs cognitifs et travail de bureau. *Intellectica*, vol. 30, 2000, pp. 75–113.
- [160] Laird (J.E.) et Congdon (C. Bates). – *The Soar User's Manual Version 8.5.* – University of Michigan, novembre 2003.
- [161] Lamarche (F.). – *Humanoïdes virtuels, réaction et cognition : une architecture pour leur autonomie.* – Thèse de PhD, Université de Rennes I, décembre 2003.
- [162] Lamarche (F.) et Donikian (S.). – Automatic orchestration of behaviours through the management of resources and priority levels. *In : Autonomous Agents and Multi Agent Systems.* – Bologna, Italy, 2002.
- [163] Landauer (T.K.) et Dumais (S.T.). – A solution to plato's problem: The latent semantic analysis theory of acquisition, induction, and representation of knowledge. *Psychological Review*, vol. 104, n2, 1997, pp. 211–240.
- [164] Lee (J.R.E) et Watson (R.). – Regards et habitudes des passants. *Les Annales de la recherche urbaine*, vol. 57-58, 1992.
- [165] Lee (W.Y.). – *Spatial Semantic Hierarchy for a Physical Mobile Robot.* – Thèse de PhD, Department of Computer Sciences, The University of Texas at Austin, décembre 1996.
- [166] Lenay (C.) et Sebbah (F.D.). – La constitution de la perception spatiale. approches phénoménologique et expérimentale. *Intellectica*, vol. 32, 2001.
- [167] Leplat (J.). – *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie*, chap. La modélisation en ergonomie à travers son histoire, pp. 1–26. – Paris, Presses Universitaires de France, 2003, sperandio j.c. and wolff m. édition.
- [168] Lisman (J.E.) et Idiart (M.A.P.). – Storage of short term memories in oscillatory subcycles. *Science*, vol. 267, 1995, pp. 1512–1515.
- [169] Lord (R. G.) et Levy (P. E.). – Moving from cognition to action : A control theory perspective. *Applied Psychology : an international review*, vol. 43 (3), 1994, pp. 335–398.
- [170] Loyall (A.B.). – *Believable agents: building interactive personalities.* – Rapport technique, cmu-cs-97-123, School of Computer Science Computer Science Department, Carnegie Mellon University, 1997.
- [171] Loyall (A.B.) et Bates (J.). – Personality-rich believable agents that use language. *In : Autonomous Agents'97.* – Marina del Rey, USA, 1997.

- [172] Loyall (A.B.) et Bates (J.). – Personality-rich believable agents that use language. *In: International Conference on Autonomous Agents (Agents)*, éd. par Johnson (W.L.) et Hayes-Roth (B.). pp. 106–113. – ACM Press.
- [173] Lynch (K.). – *The image of the city*. – Cambridge, Mass, MIT Press, 1960.
- [174] M. (Abed), H. (Ezzedine) et C. (Kolski). – Modélisation des tâches dans la conception et l'évaluation des systèmes interactifs : la méthode sadt/petri. *In: Analyse et Conception de l'IHM. Interaction Homme-machine pour les SI*, éd. par C. (Kolski). pp. 145–174. – Paris, 2001.
- [175] M. (DORIGO). – Genetic and non-genetic operators in alecsys. *Evolutionary Computation*, vol. 1, n2, 1993, pp. 151–164.
- [176] M. (Minsky). – A framework for representing knowledge. *In: The Psychology of Computervision*, éd. par P. (Winston). – New York, 1975.
- [177] Machrouh (Y.), Liénard (J.S.) et Tarroux (P.). – Multiscale feature extraction from visual environment in an active vision system. *In: Fourth International Workshop on Visual Form (VF)*. pp. 388–397. – Capri, Italy, 2001.
- [178] Maes (P.). – Situated agents can have goals. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 6, 1990, pp. 49–70.
- [179] Maes (P.) (édité par). – *Designing autonomous agents*. – Bradford MIT press, 1991.
- [180] Maes (P.). – Artificial life meets entertainment: interacting with lifelike autonomous agents. *Communications of the ACM*, vol. 38, n11, 1995, pp. 108–114.
- [181] Maffre (E.), Tisseau (J.) et Parenthoën (M.). – Virtual agents self-perception in virtual storytelling. *In: International Conference on Virtual Storytelling (ICVS)*. pp. 155–158. – Springer.
- [182] Mallot (H.A.). – Spatial cognition: Behavioral competences, neural mechanisms, and evolutionary scaling. *Kognitionswissenschaft*, vol. 8, 1999, pp. 40–48.
- [183] Mallot (Hanspeter A.). – Behavior-oriented approaches to cognition : theoretical perspectives. *Theory in biosciences*, vol. 116, 1997, pp. 196–220.
- [184] Mandler (G.). – Recognizing: the judgment of prior occurrence. *Psychological Review*, vol. 87, 1980, pp. 252–271.
- [185] Marr (D.). – Representing and computing visual information. *In: Artificial Intelligence: An MIT Perspective*, éd. par Winston (P.H.) et Brown (R.H.). – Cambridge, MA, MIT Press, 1979.
- [186] Marsella (S.) et Gratch (J.). – A step toward irrationality: using emotion to change belief. *In: Autonomous Agent and Multi-Agent Systems (AAMAS)*. pp. 334–341. – ACM Press.
- [187] Mateas (M.). – *Interactive drama, art, and artificial intelligence*. – Pittsburgh, PA, USA, Rapport technique, cmu-cs-02-206, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 2002.
- [188] Maturana (H.) et Varela (F.). – *Autopoesis and cognition: The realization of the living*. – Boston, Reidel, D., 1980.

- [189] Mayo (Michael J.). – Symbol grounding and its implications for artificial intelligence. *In : ACSC2003*, éd. par Oudshoorn (M.).
- [190] McCulloch (W.S.). – *Embodiments of mind*. – Cambridge, MA, USA, MIT Press, 1965. For a review by Seymour Papert, see <http://www.papert.org/articles/embodiments.html>.
- [191] McNamara (T.P.). – How are the locations of objects in the environment represented in memory? *In : Spatial Cognition III*, pp. 174–191. – Springer-Verlag, 2003.
- [192] Melinek (S.J.) et Booth (S.). – *An analysis of evacuation times and the movement of crowds in buildings*. – Rapport technique nCP 96/75, Building Research Establishment, Fire Research Station, 1975.
- [193] Meltzoff (A.N.). – Understanding the intentions of others: re-enactment of intended acts by 18-month-old children. *Developmental Psychology*, vol. 31, 1995, pp. 838–850.
- [194] Merleau-Ponty (M.). – *Phénoménologie de la perception*. – Paris, Gallimard, 1945.
- [195] Meyer (J.J. Ch.) et Schobbens (P.Y.) (édité par). – *Formal Models of Agents*. – Springer, 2000, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, volume 1760.
- [196] Milgram (S.) et Toch (H.). – *The handbook of social psychology*, chap. Collective Behavior: Crowds and social movements, pp. 507–610. – Addison-Wesley, 1969.
- [197] Minsky (M.), Singh (P.) et Sloman (A.). – The St. Thomas common sense symposium: designing architectures for human-level intelligence. *AI Magazine*, vol. 25, n2, 2004, pp. 113–124.
- [198] Moreau (G.). – *Le traité de la réalité virtuelle, Tome 2*, chap. Comportement des objets du monde virtuel, pp. 47–83. – Paris, Presses de l'école des Mines, 2003, p. fuchs and g. moreau édition.
- [199] Moreau (G.) et Donikian (S.). – From psychological and real-time interaction requirements to behavioural simulation. *In : Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation*. – Lisbon, Portugal, septembre 1998.
- [200] Moreau (Guillaume). – *Modélisation du comportement pour la simulation interactive : application au trafic routier multimodal*. – Thèse de PhD, Université de Rennes I, 1998.
- [201] Morin (E.). – *Introduction à la pensée complexe*. – Paris, ESF Editeur, 1990.
- [202] Morineau (T.). – Context effect on problem solving during a first immersion in virtual environment. *Current Psychology of Cognition*, vol. 14, 2000, pp. 73–101.
- [203] Morineau (T.). – L'émergence d'une perspective écologique en psychologie ergonomique, à ravers la distinction entre différents niveaux de contrôle cognitif dans l'activité. *In : Colloque de l'Association pour la Recherche Cognitive (ARCo)*, pp. J3–S1. – Compiègne, France, 2004.

- [204] Morineau (T.), Chedmail (P.) et Parenthoën (M.). – An affordance-based model to support simulation in virtual environment. *In: Virtual Reality International Conference (VRIC)*, pp. 19–26. – Laval, France, 2001.
- [205] Morineau (T.) et Parenthoën (M.). – Une présentation de l'approche écologique en psychologie ergonomique. *Psychologie Française*, vol. 48, n2, 2003, pp. 77–88.
- [206] Moulin (B.), Chaker (W.), Perron (J.) et Pelletier (P.). – Mags project: Multi-agent geosimulation and crowd simulation. *In: COSIT 2003*, éd. par Kuhn (W.), Worboys (M.F.) et Timpf (S.), pp. 151–168. – Springer-Verlag, 2003.
- [207] Musse (S. Raupp). – *Human Crowd Modelling with Various Levels of Behaviour Control*. – Lausanne, Suisse, Thèse de PhD, EPFL, janvier 2000.
- [208] Musse (S. Raupp), Garat (F.) et D. Thalmann. – Guiding and interacting with virtual crowds in real-time. *In: Eurographics Workshop on Animation and Simulation '99 (CAS '99)*. pp. 23–34. – Springer.
- [209] Musse (S. Raupp) et Thalmann (D.). – A model of human crowd behavior : Group inter-relationship and collision detection analysis. *In: Computer Animation and Simulation '97*. pp. 39–51. – Springer Verlag.
- [210] Newell (A.). – *Unified Theories of Cognition*. – Harvard University Press, 1990.
- [211] Newell (A.) et Simon (H.A.). – Computer simulation of human thinking. *Science*, vol. 134, 1961, pp. 2011–2017.
- [212] Newell (A.) et Simon (H.A.). – *Human problem solving*. – Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1972.
- [213] Ngo (J.T.) et Marks (J.). – Spacetime constraints revisited. *In: Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings)*, éd. par Kajiya (James T.), pp. 343–350. – Anaheim, California, août 1993.
- [214] Noser (H.) et Thalmann (D.). – Sensor based synthetic actors in a tennis game simulation. *In: Computer Graphics International '97*. pp. 189–198. – Hasselt, Belgium, juin 1997.
- [215] O. (HEGUY), A. (BERRO) et Y. (DUTHEN). – Learning system for cooperation in a virtual environment. *In: SCI'2001 The 5th World Multi-Conference on Systemic, Cybernetics and Informatics*. – Orlando, Floride, juillet 2001.
- [216] O'Hara (N.). – K-d tree neighbour finding for the flocking algorithm. *In: Pacific Graphics*.
- [217] O'Hara (N.). – Hierarchical impostors for the flocking algorithm in 3d. *Computer Graphics Forum*, vol. 21, n4, 2002, pp. 723–731.
- [218] Oman (C.M.), Shebilske (W.L.), Richards (J.T.), Tubré (T.C.), Beall (A.C.) et Natapoff (A.). – Three dimensional spatial memory and learning in real and virtual environments. *Spatial Cognition and Computation*, vol. 2, 2002, pp. 355–372.
- [219] P. (TORGUET), O. (BALLET), JP. (JESSEL), E. (GOBETTI), J. (DUCHON) et E. (BOUVIER). – Cavalcade a system for collaborative virtual prototyping. *Journal of Design and Innovation Research*, vol. 2, n1, 2000.

- [220] Paillard (J.). – *Itinéraire pour une psychophysiologie de l'action*. – Paris, Actio, 1986.
- [221] Paillard (J.). – Système nerveux et fonction d'organisation. In : *Encyclopédie de la Pléiade*, éd. par Piaget (J.), Mounoud (P.) et Bronckart (J.P.), chap. Psychologie, pp. 1378–1441. – Paris, Gallimard, 1986.
- [222] Paillard (J.). – Réactif et prédictif: deux modes de gestion de la motricité. In : *Pratiques sportives et modélisation du geste*, pp. 13–56. – Grenoble, UFRAPS, Nougier, V. and Bianch, J.P., 1990.
- [223] Parenthoën (M.). – *Animation de la mer — une approche énaactive* —. – Brest, Thèse de PhD, Université de Bretagne Occidentale (UBO), Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes (LISyC), 2004.
- [224] Parenthoën (M.), Buche (C.) et Tisseau (J.). – Action learning for autonomous virtual actors. In : *International Symposium on Robotics and Automation (ISRA)*, pp. 549–554. – Toluca, Mexico, 2002.
- [225] Parenthoën (M.), Tisseau (J.) et Morineau (T.). – Autonomy and proactive perception for virtual actors. In : *Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI)*, pp. 359–364. – Orlando, Florida, 2002.
- [226] Parenthoën (M.), Tisseau (J.) et Morineau (T.). – Perception active pour acteurs virtuels/active perception for virtual actors. In : *Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA)*, pp. 219–226. – Montpellier, France, 2002.
- [227] Paris (S.). – *Etude préalable à la thèse : caractérisation des niveaux de service et modélisation des circulations de personnes dans les lieux d'échanges*. – Rapport technique, AREP - SNCF DAAB, mars 2004.
- [228] Pauls (J.). – The movement of people in buildings and design solutions for means of egress. *Fire Technology*, vol. 20, n1, 1984, pp. 27–47.
- [229] Peirce (C.S.). – *Ecrits sur le signe (Textes traduits par G. Deledalle)*. – Seuil, 1978.
- [230] Penn (Alan). – Space syntax and spatial cognition. In : *3rd International Space Syntax Symposium*. – Atlanta, USA, 2001.
- [231] Peschl (I.). – Flow capacity of door openings in panic situations. *BAUN*, vol. 26, n2, 1971, pp. 62–67.
- [232] Peters (C.) et O'Sullivan (C.). – Synthetic vision and memory for autonomous virtual humans. *Computer Graphics forum*, vol. 21, n4, 2002, pp. 743–752.
- [233] Phelps (Elizabeth A.). – *The Nature of Cognition*, chap. Brain versus Behavioral Studies of Cognition, pp. 295–322. – The MIT Press, 1999.
- [234] Piaget (J.). – *Logique et connaissance scientifique*, chap. Nature et méthodes de l'épistémologie, pp. 1–132. – Encyclopédie de la Pléiade, 1967, nrf Gallimard édition.
- [235] P.L. (LANZI). – A study of the generalization capabilities of xcs. In : *Seventh International Conference on Genetic Algorithms (ICGA97)*. – Morgan Kaufmann, San Francisco, USA.

- [236] P.L. (LANZI). – Adding memory to xcs. *In: ICEC98, IEEE Conference on Evolutionary Computation.* – Anchorage, Alaska, 1998.
- [237] P.L. (LANZI). – An analysis of the memory mechanism of xcs. *In: GP98, Third Genetic Programming Conference.* – San Francisco, USA, 1998.
- [238] P.L. (LANZI). – Extending the representation of classifier conditions part i : From binary to messy coding. *In: GECCO99, Genetic and Evolutionary Computation Conference.* – Orlando, USA, juillet 1999.
- [239] P.L. (LANZI) et M. (COLOMBETTI). – An extension to the xcs classifier system for stochastic environments. *In: GECCO99, Genetic and Evolutionary Computation Conference.* – Orlando, USA, juillet 1999.
- [240] Portugali (J.) et Omer (I.). – Systematic distortions in cognitive maps: The north american west coast vs. the (west) coast of israel. *In: COSIT 2003*, éd. par Kuhn (W.), Worboys (M.F.) et Timpf (S.). pp. 93–100. – Springer.
- [241] Powers (W.T.). – Feedback : beyond behaviorism. *Science*, no179, 1973, pp. 351–356.
- [242] Predtechenskii (V.M.) et Milinskii (A.I.). – *Planning for Foot Traffic Flow in Buildings.* – traduit du russe, Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, India, 1969 (traduit en 1978).
- [243] Pylyshyn (Z.W.). – Is vision continuous with cognition? the case for cognitive impenetrability of visual perception. *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 22, n 3, 1999, pp. 341–423.
- [244] Randell (D.A.), Cui (Z.) et Cohn (A.G.). – A spatial logic based on regions and connection. *In: Proceedings of the third Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, éd. par Nebel (B.), Swarthout (W.) et Rich (C.). pp. 165–176. – Morgan Kaufmann.
- [245] Rao (A.S.) et Georgeff (M.P.). – An abstract architecture for rational agents. *In: Knowledge Representation and Reasoning (KR&R-92)*, éd. par Rich (C.), Swartout (W.) et Nebel (B.), pp. 439–449.
- [246] Raubal (M.) et Worboys (M.). – A formal model of the process of wayfinding in built environments. *In: Spatial Information Theory - Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science, International Conference COSIT '99.* pp. 381–399. – Springer-Verlag.
- [247] R.C. (Schank) et C. (Riesbeck). – *Inside Computer Understanding.* – Erlbaum, Hillsdale, 1981.
- [248] R.E. (SMITH) et B.A. (DIKE). – The fighter aircraft lcs: A case of different goals and techniques. *In: IWLCS.*
- [249] Reilly (W.S.N.). – *Believable social and emotional agents.* – Pittsburgh, PA, Technical report cmu-cs-96-138, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1996.
- [250] Relieu (M.). – Voir et se mouvoir en marchant dans la ville. *In: Le courrier du CNRS : Villes*, pp. 107–109. – CNRS, juin 1996.

- [251] Relieu (M.) et Quéré (L.). – *Les Risques urbains : Acteurs, systèmes de prévention*, chap. Mobilité, perception et sécurité dans les espaces publics urbains. – anthropos : Collection VILLES, 1998.
- [252] Reynolds (Craig W.). – Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. In : *Computer Graphics (SIGGRAPH '87 Proceedings)*, éd. par Stone (Maureen C.), pp. 25–34.
- [253] Reynolds (C.W.). – Steering behaviors for autonomous characters. In : *Game Developers Conference*, pp. 763–782. – San Francisco, California, 1999.
- [254] Rhodes (B. J.). – *PHISH-Nets : Planning Heuristically In Situated Hybrid Networks*. – Thèse de PhD, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [255] Rizzo (P.), Veloso (M.M.), Miceli (M.) et Cesta (A.). – Goal-based personalities and social behaviors in believable agents. *Applied Artificial Intelligence*, vol. 13, 1999, pp. 239–271.
- [256] Salvucci (D.D.). – Modeling driver distraction from cognitive tasks. In : *24th Annual Conference of the Cognitive Science Society*.
- [257] Salvucci (D.D.), Boer (E.R.) et Liu (A.). – Toward an integrated model of driver behavior in a cognitive architecture. *Transportation Research Record*, no1779, 2001.
- [258] Sanza (C.), Panatier (C.) et Duthen (Y.). – Communication and interaction with learning agents in virtual soccer. In : *International Conference on Virtual Worlds (VW)*, éd. par Heudin (J.C.). pp. 147–158. – Paris, 2000.
- [259] Scheutz (M.) et Schermerhorn (P.). – Many is more, but not too many: dimensions of cooperation of agents with and without predictive capabilities. In : *International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT)*.
- [260] Schmidt (B.). – *The Modelling of Human Behaviour*. – SCS - The Society for Computer Simulation International, 2000.
- [261] Schneider (L.F.) et Taylor (H.A.). – How do you get there from here. *Applied Cognitive Psychology*, vol. 13, 1999, pp. 415–441.
- [262] Scholl (M. Jeanne). – The role of a self-reference system in spatial navigation. In : *COSIT2001*. pp. 217–232. – Springer-Verlag.
- [263] Searle (J.) et Débat (Le). – Langage, conscience, rationalité : une philosophie naturelle, entretien avec John Searle. – texte trouvable sur le site web de J. Searle.
- [264] Searle (J.R.). – Minds, brains, and programs. *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 3, 1980, pp. 417–424.
- [265] Segal (L.). – *The dream of reality: Heinz Von Foerster's constructivism*. – Springer, 2001.
- [266] Shallice (T.). – Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 298, 1982, pp. 199–209.
- [267] Shaw (R.). – The agent-environment interface: Simon's indirect or gibson's direct coupling? *Ecological Psychology*, vol. 15, n1, 2003, pp. 37–106.

- [268] Shepard (R.N.). – Ecological constraints on internal representation: resonant, kinematics of perceiving, imagining, thinking and dreaming. *Psychological Review*, vol. 91, 1984, pp. 417–447.
- [269] Sierhuis (Maarten). – *Modeling and Simulating Work Practice. BRAHMS: a multiagent modeling and simulation language for work system analysis and design*. – Thèse de PhD, University of Amsterdam, septembre 2001.
- [270] Sierhuis (Maarten), Clancey (William J.), Seah (Chin), Trimble (Jay P.) et Sims (Michael H.). – Modeling and simulation for mission operations work system design. *Journal of Management Information Systems*, vol. 19, n4, 2003, pp. 85–128.
- [271] Siikonen (M.L.) et Hakonen (H.). – Efficient evacuation methods in tall buildings. In : *Elevcon 2002*, pp. 237–246.
- [272] Silverman (B.G.). – Expert critics: operationalizing the judgement/decisionmaking literature as a theory of bugs and repair strategies. *Knowledge Acquisition*, vol. 3, 1991, pp. 175–214.
- [273] Simon (H.A.). – The structure of ill-structured problems. *Artificial Intelligence*, vol. 4, 1973, pp. 181–201.
- [274] Sloman (A.). – Motives, mechanisms and emotions. *Cognition and Emotion*, vol. 1, n3, 1987, pp. 217–234.
- [275] Sloman (A.). – What sort of control system is able to have a personality. In : *Creating Personalities for Synthetic Actors*, éd. par Trappl (R.) et Petta (P.). pp. 166–208. – Springer-Verlag.
- [276] Sloman (A.) et Scheutz (M.). – A framework for comparing agent architectures. In : *UK Workshop on Computational Intelligence (UKCI)*. – Birmingham, UK, 2002.
- [277] Sparacino (F.), Davenport (G.) et Pentland (A.). – Media actors, characters in search of an author. In : *International Conference on Multimedia Computing and Systems (IEEE-ICMCS)*, pp. 439–446. – Firenze, Italy, 1999.
- [278] Sperandio (J.C.). – *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie*, chap. Modèles et formalismes, ou le fond et la forme. – Paris, Presses Universitaires de France, 2003, sperandio j.c. and wolff m. édition.
- [279] Squire (L.R.) et Cohen (N.J.). – *The neurobiology of learning and memory*, chap. Human Memory and Amnesia, pp. 3–64. – Guilford, 1984.
- [280] Squire (L.R.) et Knowlton (B.J.). – Memory, hippocampus and brain systems. In : *The cognitive neurosciences*, éd. par Gazzaniga (M.). pp. 825–837. – MIT Press.
- [281] StAmant (R.). – User interface affordance in a planning representation. *Human Computer Interaction*, vol. 14, 1999, pp. 317–354.
- [282] Steck (S.D.) et Mallot (H.A.). – The role of global and local landmarks in virtual environment navigation. *Presence*, vol. 9, n1, 2000, pp. 69–83.
- [283] Stevens (A.) et Coupe (P.). – Distortions in judged spatial relations. *Cognitive Psychology*, vol. 10, n4, 1978, pp. 526–550.

- [284] Stoffregen (T.A.) et Bardy (B.G.). – On specification and the senses. *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 24, n1, 2001, pp. 195–261.
- [285] S.W. (WILSON). – Knowledge growth in an artificial animal. In : *International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*, pp. 16–23.
- [286] S.W. (WILSON). – Zcs: A zeroth level classifier system. *Evolutionary Computation*, vol. 2, n1, 1994, pp. 1–18.
- [287] S.W. (WILSON). – Classifier fitness based on accuracy. *Evolutionary Computation*, vol. 3, n2, 1995.
- [288] S.W. (WILSON). – Get real! xcs with continuous-valued inputs. In : *Learning Classifier Systems. From Foundations to Applications, LNAI Vol. 1813*. pp. 209–219. – Springer-Verlag.
- [289] T. (KOVACS). – *Evolving Optimal Populations with XCS Classifier Systems*. – Thèse, Université de Birmingham, 1996.
- [290] T. (KOVACS). – *Steady State Genetic Algorithms Deletion Techniques*. – Rapport technique, School of Computer Science, University of Birmingham, 1997.
- [291] Tambe (M.), Johnson (W.L.), Jones (R.M.), Koss (F.), Laird (J.E.) et Rosenbloom (P.S.). – Intelligent agent for interactive simulation environments. *AI Magazine*, vol. 16, n1, 1995, pp. 15–39.
- [292] Tecchia (F.), Loscos (C.) et Chrysanthou (Y.). – Visualizing crowds in real-time. *Computer Graphics Forum*, vol. 21, n4, 2002, pp. 753–765.
- [293] Thalmann (Nadia Magnenat), Thalmann (Daniel) et Renault (Olivier). – A vision-based approach to behavioral animation. *Journal of Visualization and Computer Animation*, vol. 1, n1, août 1990, pp. 18–21.
- [294] Thomas (G.). – *Environnements virtuels urbains : modélisation des informations nécessaires à la simulation des piétons*. – Thèse de PhD, Université de Rennes I, décembre 1999.
- [295] Thomas (G.) et Donikian (S.). – Modelling virtual cities dedicated to behavioural animation. In : *EUROGRAPHICS'2000*, éd. par Gross (M.) et Hopgood (F.R.A.). – Interlaken, Switzerland, août 2000.
- [296] Thomas (G.) et Donikian (S.). – Virtual humans animation in informed urban environments. In : *Computer Animation*. pp. 129–136. – Philadelphia, PA, USA, May 2000.
- [297] Thomas (R.). – *Modèle de mémoire et de carte cognitive spatiales : application à la navigation du piéton en environnement urbain*. – Thèse de PhD, Université de Rennes 1, février 2005.
- [298] Thomas (R.) et Donikian (S.). – A model of hierarchical cognitive map and human memory designed for reactive and planned navigation. In : *4th International Symposium on Space Syntax*, éd. par Hanson (J.), pp. 72.1–72.18. – University College, London, UK, juin 2003.
- [299] Tisseau (J.). – *Réalité virtuelle : autonomie in virtuo*. – Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), document de synthèse, Université de Rennes 1, 2001.

<http://www.enib.fr/~tisseau/>.

- [300] Tisseau (J.) et Harrouet (F.). – *Le traité de la réalité virtuelle, volume 2*, chap. Autonomie des entités virtuelles. – Paris, Presses de l'École des Mines, 2003.
- [301] Tisseau (J.), Parenthoën (M.), Buche (C.) et Reignier (P.). – Comportements perceptifs d'acteurs virtuels autonomes – une application des cartes cognitives floues. *Technique et Science Informatiques*, vol. à paraître, 2004.
- [302] Tom (A.) et Denis (M.). – Referring to landmark or street information in route directions: What difference does it make? *In : COSIT 2003*, éd. par Kuhn (W.), Worboys (M.F.) et Timpf (S.). pp. 362–374. – Springer.
- [303] Travers (M.). – Animal construction kits. *In : artificial life*. pp. 421–442. – Addison-Wesley.
- [304] Tricot (A.), Détienne (F.) et Bastien (C.). – Recherches en psychologie ergonomique – introduction. *Psychologie Française*, vol. 48, n2, 2003, pp. 1–8.
- [305] Tsutsuguchi (Ken), Sugiyama (Kazuhiro) et Sonehara (Noboru). – The motion generation of pedestrians as avatars and crowds of people. *In : Digital Cities*. pp. 275–287. – Springer-Verlag.
- [306] Tu (Xiaoyuan) et Terzopoulos (Demetri). – Artificial fishes: Physics, locomotion, perception, behavior. *In : Computer Graphics (SIGGRAPH'94 Proceedings)*, pp. 43–50. – Orlando, Florida, juillet 1994.
- [307] Tulving (E.) et Schacter (D.L.). – Priming and human memory systems. *Science*, vol. 247, 1990, pp. 301–306.
- [308] Turner (R.H.). – *Handbook of modern sociology*, chap. Collective Behavior, pp. 382–425. – Rand McNally, 1964.
- [309] Turvey (M.T.), Shaw (R.E.), Reed (E.S.) et Mace (W.M.). – Ecological laws of perceiving and acting: in reply to fodor and pylyshyn. *Cognition*, vol. 9, 1981, pp. 237–304.
- [310] Tversky (B.). – Distortions in memory for maps. *Cognitive Psychology*, vol. 13, 1981, pp. 407–433.
- [311] Tversky (B.). – Structures of mental spaces. *In : 3rd International Space Syntax Symposium*. – Atlanta, USA, 2001.
- [312] Tversky (B.). – Navigating by mind and by body. *In : Spatial Cognition III*. pp. 1–10. – Springer-Verlag.
- [313] Tyndiuk (F.), Schlick (C.), Claverie (B.) et Thomas (G.). – Modèles et facteurs humains en IHM - application à la réalité virtuelle. *In : Modèles Formels de l'Interaction (MFI)*, éd. par Herzig (A.), Chaid-draa (B.) et Mathieu (P.). pp. 301–306. – Lille, France, 2003.
- [314] Ulicny (B.) et Thalmann (D.). – Towards interactive real-time crowd behavior simulation. *Computer Graphics Forum*, vol. 21, n4, 2002, pp. 767–775.
- [315] Urban (C.) et Schmidt (B.). – Pecs - agent-based modelling of human behaviour. *In : Emotional and Intelligent II - The Tangled Knot of Social Cognition, AAAI Fall Symposium*,. – AAAI Press.

- [316] V. (BONNAFOUS), E. (MENOUE), J.P. (JESSEL) et R (CAUBET). – Co-operative and concurrent blending motion generators. *In: WSCG'01.* – Plzen. Czech Republic, 2001.
- [317] Vallée (R.). – Théorisation de la perception-action et autonomie de Vendryès. *Revue Internationale de Systémique*, vol. 11, n5, 1997, pp. 445–454.
- [318] van de Panne (Michiel) et Fiume (Eugene). – Sensor-actuator networks. *In: Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings)*, éd. par Kajiya (James T.), pp. 335–342.
- [319] van der Molen (Hugo) et Bütticher (Anton). – A hierarchical risk for traffic participants. *Ergonomics*, vol. 31 (4), 1988, pp. 537–535.
- [320] Varela (F.J.). – *Principles of biological autonomy.* – New York, Elsevier, 1979.
- [321] Vicente (K.J.) et Wang (J.H.). – An ecological theory of expertise effects in memory recall. *Psychological Review*, vol. 105, 1998, pp. 33–57.
- [322] Vogt (Paul). – The physical symbol grounding problem. *Cognitive Systems Research*, vol. 3, n3, 2002, pp. 429–457.
- [323] von Uexküll (J.). – *Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen (incursion dans l'environnement des animaux et des hommes).* – Hambourg, Allemagne, Rowohlt, 1956.
- [324] W. (STOLZMANN). – Learning classifier systems using the cognitive mechanism of anticipatory behavioral control. *In: First European Workshop on Cognitive Modeling*, pp. 14–16.
- [325] Wagner (J.). – Crossing streets : reflections on urban pedestrian behavior. *Man-environment systems*, vol. 11, n1&2, 1981, pp. 57–61.
- [326] Waller (D.), Loomis (J.), Golledge (R.G.) et Beall (A.C.). – Place learning in humans: The role of distance and direction information. *Spatial Cognition and Computation*, vol. 2, 2002, pp. 333–354.
- [327] Warren (W.H.). – *Perception of Space and Motion*, chap. Self-Motion: Visual Perception and Visual Control, pp. 263–325. – Academic Press, 1995.
- [328] Warren (W.H.) et Whang (S.). – Visual guidance of walking through apertures: body-scaled information for affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human, Perception and Performance*, vol. 13, 1987, pp. 371–383.
- [329] Wender (K.F.), Haun (D.), Rasch (B.) et Blümke (M.). – Context effects in memory for routes. *In: Spatial Cognition III*, pp. 209–231. – Springer-Verlag, 2003.
- [330] Widyanto (T.), Marriott (A.) et West (M.). – Applying a visual perception system to a behavioral animation system. *In: Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, pp. 89–98. – Vienna, Austria, 1991.
- [331] Wiener (J.M.) et Mallot (H.A.). – 'fine-to-coarse' route planning and navigation in regionalized environments. *Spatial Cognition and Computation*, 2003.
- [332] Wilhelms (Jane) et Skinner (Robert). – An interactive approach to behavioral control. pp. 1–8.

- [333] Wooldridge (M.). – Intelligent agents. *In: Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*, pp. 27–77. – MIT Press, 1999.
- [334] Wooldridge (M.). – *Reasoning about Rational Agents*. – MIT Press, 2000.
- [335] Yamori (K.). – Going with the flow: Micro-macro dynamics in the macrobehavioral patterns of pedestrian crowds. *Psychological Review*, vol. 105, n3, 1998, pp. 530–557.
- [336] Yeap (W.K.) et Jefferies (M.E.). – Computing a representation of the local environment. *Artificial Intelligence*, vol. 107, 1999, pp. 265–301.
- [337] Yoon (S.), Blumberg (B.) et Schneider (G.E.). – Motivation-driven learning for interactive synthetic characters. *In: International Conference on Autonomous Agents*. pp. 365–372. – ACM Press.
- [338] Zacks (J.M.), Mires (J.), Tversky (B.) et Hazeltine (E.). – Mental spatial transformations of objects and perspective. *Spatial Cognition and Computation*, vol. 2, 2002, pp. 315–332.
- [339] Ziemke (Tom). – *Understanding Representation in the Cognitive Sciences*, chap. Rethinking Grounding. – Plenum Press, 1999.
- [340] Ziemke (Tom). – Introduction to the special issue on situated and embodied cognition. *Cognitive Systems Research*, vol. 3, n3, 2002, pp. 271–274.