
Autonomisation de modèles de simulations participatives

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

PIERRE DE LOOR

←VERSION PROVISOIRE →

Soutenance prévue le 5 Décembre 2006, devant le jury composé de :

Marie-Pierre GLEIZE, Maître de Conférences (HDR), Université de Toulouse .. *Rapporteure*
Christophe KOLSKI, Professeur, Université de Valenciennes*Rapporteur*
Jean LORANT, Professeur, Université de Bretagne Occidentale*Examineur*
Annie LUCIANI, Ingénieure de recherche (HDR), IMAG*Examinatrice*
Anne NICOLLE, Professeure, Université de Caen*Rapporteure*
Jacques TISSEAU, Professeur, Université de Bretagne Occidentale/ENIB *Directeur*

Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes (LISyC, EA 3883)

Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV)

Remerciements

Voici l'exercice des remerciements. La difficulté relève de trois ordres : éviter de faire si convenu que cela devient ennuyeux comme un formulaire administratif, ne pas oublier *la* personne que je ne voulais pas oublier mais qui, allez savoir pourquoi, se retrouve absente de mes pensées au moment fatidique et le risque d'étaler des tartines au sujet des gens que je souhaite pourtant remercier sincèrement (je commence d'ailleurs fort en terme de tartines). Par conséquent, ceux qui ne sont pas remerciés ici peuvent passer la page sans regret, sauf celui de ne pas être sûr de ne pas en être.

Il y a des personnalités que je ne connais qu'indirectement. Je les ai entendues ou lues sans qu'elles ne puissent me voir les lire ou les écouter. Elles m'impressionnent d'autant plus qu'elles me furent toutes les deux recommandées par JACQUES TISSEAU, dont l'avis m'inspire un profond respect. Je remercie donc Madame ANNE NICOLLE d'avoir accepté d'être rapporteure de ce travail, ainsi que Madame ANNIE LUCIANI d'en être l'examinatrice.

Je suis un anxieux, ma mère me l'a dit très tôt. Que voulez-vous faire après ça ? Depuis, je dois me *dépatouiller* avec et parfois j'ai besoin de *rassureurs*. Parmi eux, et particulièrement pour mes activités de recherche, il y a MARIE-PIERRE GLEIZE et CHRISTOPHE KOLSKI. Je les remercie donc chaleureusement d'avoir accepté d'être rapporteur(e)s de cette synthèse.

Le professeur JEAN LORANT est un psychologue arrivé il y a peu dans notre laboratoire. Il n'a pas hésité à m'offrir un café et à accepter d'examiner mes travaux qui je l'espère ne lui paraîtront pas trop obscurs. Je l'en remercie vivement.

Certaines personnes marquent votre vie professionnelle. Elles incarnent une sorte de Graal scientifique, mêlant sagesse, compétence et simplicité. JACQUES TISSEAU et JEAN YVES GUINARD sont de ceux-là. J'ai la chance d'avoir été guidé par JACQUES durant ces années et lui dois une part de mon avenir. J'ai eu celle également de partager mon bureau avec JEAN-YVES, qu'il parte en retraite avec la satisfaction de m'avoir appris beaucoup de choses qui m'étaient étrangères jusqu'alors.

PIERRE CHEVAILLIER fut le responsable de l'équipe SPI (vous verrez plus loin). Il garde son sérieux pour signaler les écueils et nous faire redescendre de nos nuages, tout en respectant les points de vue de chacun. Parfois, son regard s'allume, sa gorge s'agite car les phrases s'accélèrent, enchaînant les idées qui vont de toute façon plus vite que ses paroles, il nous transmet de l'énergie. Nous nous sommes lancés tous les deux dans la rédaction d'une habilitation et nous sommes encouragés mutuellement dans la bonne humeur des instants de doute. Avec lui, c'était moins dur.

J'ai eu la chance de participer à l'encadrement de nombreux thésards. Sans eux, ce mémoire serait un autre ou ne serait peut-être pas. Qu'ils ne me tiennent pas rigueur de mes faiblesses, j'essaie de faire pareil. Merci donc à PIERRE ALEXANDRE FAVIER, LAURENT LE BODIC et CÉDRIC BUCHE dont les travaux sont le support de certains chapitres de ce mémoire. Je souhaite également bonne chance à ROMAIN BENARD et

KRISTEN MANAC'H en espérant les mener à bon port.

Je ne peux citer tous les membres du laboratoire et les collègues devenus amis, rencontrés dans le cadre du travail, loin d'ici ou au bout du couloir d'à côté. Disponibles pour me sortir d'un clavier devant lequel j'ai l'air d'un manchot (ou d'un pingouin selon le système d'exploitation) ou assez fous pour me demander si j'ai compris Merleau-Ponty tout en me payant une bière. Ils sont nombreux à compter et je ne vois pas bien ce qu'il peut y avoir au-dessus des rapports humains.

Le travail c'est bien mais j'ai deux autres vies : celle de père et celle de musicien, c'est important l'équilibre. Mes trois *gars* et leur mère, j'ai tenté de ne pas les envoyer balader, mais n'ai pas toujours réussi. Aussi je promets qu'on ira faire un *ciné* un de ces dimanches, puis se *goïnfrer* de crêpes. Ensuite ils nous laisseront nous éloigner un peu, moi et leur mère. On rentrera faire un feu car l'hiver, le vent *cogne* à Brest. Brest, ma ville d'exil et de musiciens chaleureux, qui m'ont accueilli en souriant l'air de rien, attendant un peu voir ce que j'avais dans le ventre et les doigts puis m'ouvrant leur porte et leur cœur pour laisser vibrer les toms, les cordes et les soufflants. Grâce à eux je peux toujours regarder mon travail, un peu étonné, en me disant que ce n'est pas si grave.

Enfin, mon père est parti un peu tôt, je lui aurais bien dédié ce document, mais il m'aurait sans doute dit : '*t'embête pas avec ça...*'

Table des matières

Table des matières	v
Table des figures	vii
1 Positionnement	3
1.1 Simulation participative et <i>Cré-action</i>	4
1.2 Autonomie et phénomènes	5
1.3 Autonomie et crédibilité	8
1.3.1 Crédibilité et résistance	8
1.3.2 L'héritage de l'intelligence artificielle	9
1.3.3 Autonomie et réalité virtuelle	12
1.4 Plan du mémoire	12
2 Une abstraction pour les agents situés : l'intention	15
2.1 Simulation participative d'agents situés	15
2.2 Modèles d'agents autonomes situés	16
2.2.1 Les approches réactives	17
2.2.2 Les approches délibératives	19
2.2.3 Les approches hybrides	20
2.3 Modèle d'agent intentionnel réactif	20
2.3.1 Des BDI aux agents réactifs intentionnels	20
2.3.2 L'intention crée des liens	22
2.3.3 Sélection d'action	25
2.3.4 Réalisation	27
2.3.5 Exploitation	29
2.4 Conclusion	30
3 Une métaphore pour la résolution distribuée de problèmes : le stress	33
3.1 Résolution distribuée dynamique de problèmes	33
3.1.1 Simulation participative et RdP	33
3.2 Principales approches de RdP	34
3.2.1 Soft-Computing et Méta-Heuristiques	34
3.2.2 Des CSP aux CSP dynamiques	35
3.2.3 Résolution de problème par SMA	37
3.3 Les agents stressés	38
3.3.1 Principe de résolution	39
3.3.2 Réalisation	40

3.4	Résultats	41
3.5	Conclusion	43
4	Un apprentissage : le tuteur adaptatif	45
4.1	Apprentissage en environnement virtuel de formation	45
4.1.1	Aspects participatifs	47
4.1.2	Aspect adaptatif	47
4.1.3	Les systèmes de classeurs	50
4.2	Tuteur adaptatif	52
4.2.1	Structure du système de classeurs	53
4.2.2	Apprentissage	57
4.3	Réalisation	59
4.4	Conclusion	60
5	Une synthèse : la simulation participative d'interactions	63
5.1	Evaluation prédictive des systèmes interactifs multimodaux	63
5.1.1	Principales approches d'évaluation par simulation	64
5.2	L'approche SIHMM	66
5.2.1	Modélisation de l'environnement d'interaction	67
5.2.2	Modélisation du système interactif multimodal	69
5.2.3	L'utilisateur virtuel	70
5.2.4	Résultats	76
5.3	Conclusion	78
6	Perspectives	81
6.1	Réflexions	81
6.2	Le contexte pour l'abord des situations dynamiques collaboratives	84
6.3	Autonomisation et énaction	85
6.3.1	Définition de l'énaction	85
6.3.2	Enaction et cognition	89
6.3.3	Autopoïèse artificielle	89
6.3.4	Lignes directrices	91
6.4	Pour Conclure	93
	Références consultées	95
	Références citées	109

Table des figures

1.1	Les comportements crédibles : entre l'aléatoire et le déterminé.	8
1.2	Autonomie, crédibilité et signification.	9
1.3	L'abstraction simplifie les comportements.	10
1.4	La métaphore restreint les comportements.	11
1.5	L'apprentissage "extrait" les comportements.	11
1.6	Le prototypage interactif des modèles.	12
2.1	Le sens des actions sera exploité par l'intention.	22
2.2	Les propriétés d'un agent participent à son extériorité.	23
2.3	Lien sémantique pour la <i>création</i>	25
2.4	Le triplé d'entrée pour la prise de décision.	26
2.5	Principe de la prise de décision.	26
2.6	Répartition entre PROLOG et C++ des principaux composants d'un agent intentionnel, modifiables <i>en-ligne</i>	28
2.7	Echange d'information entre PROLOG et C++.	29
3.1	Agents émotionnels : charge cognitive, diffusion et perception des messages.	39
3.2	Exemple d'évolution du stress d'un agent.	41
3.3	Visualisation du phénomène de "colères en cascades"	43
3.4	Comparaison de performances entre l'AWC et les Agents stressés	43
4.1	Les environnements virtuels de formation.	46
4.2	Système tutoriel intelligent.	49
4.3	Principe des systèmes de classeurs.	51
4.4	Structure du tuteur adaptatif.	53
4.5	Principe de sélection d'une assistance pédagogique, sans apprentissage.	57
4.6	Apprentissage : chaque flèche continue pointe vers des règles dont le poids aura tendance à être augmenté, les flèches pointillées pointent vers les règles dont le poids aura tendance à être diminué.	58
4.7	Interface du modèle pédagogique de l'ITS.	59
4.8	Suivi pédagogique grâce à l'EVF du projet MASCARET.	60
5.1	Les trois modèles de SHIMM	67
5.2	Le modèle de l'environnement quantifie l'ensemble des perturbations sur l'utilisateur	68
5.3	Exemple simple de scénario d'une simulation	69
5.4	Illustration des modalités d'action/contrôle et sortie à la base d'UMAR.	70
5.5	Modèle de décision SCU	71

5.6	Les influences sur la décision d'abandon	72
5.7	Modélisation de quelques interférences environnementales	73
5.8	Exemple de l'influence de deux concepts d'entrée sur l'usage d'une modalité	73
5.9	Exemple de faits PROLOG du modèle de décision	75
5.10	Quelques vues offertes par le logiciel SIHMM.	77
5.11	Configuration du modèle sensitif (gauche) et décisionnel (droite).	77
5.12	Complexité simulées versus complexité réelle	79
6.1	Regard sur les approches abordées	82

Résumé

Depuis plusieurs années, dans le cadre de mes activités d'enseignant chercheur au Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV), j'ai effectué ou encadré des travaux portant sur la mise en œuvre de simulations participatives. De telles simulations donnent un statut particulier à l'utilisateur qui devient acteur et créateur de la simulation. Elles doivent alors posséder des propriétés d'ouverture, de compréhension et de substitution. Ces propriétés sont obtenues à partir de modèles permettant d'exhiber des comportements autonomes, dont la crédibilité est relative aux significations qu'ils doivent présenter. Comme dans de nombreuses tâches de modélisation, cette autonomie et ces propriétés sont obtenues à l'aide d'abstractions, de métaphores ou d'apprentissages artificiels. Je propose une synthèse du travail effectué en l'abordant sous cet angle, relatif au problème du choix des représentations, même si la plupart des sujets abordés couvrent des questions plus larges et des domaines variés.

Après une présentation de la problématique liée aux simulations participatives, objet du chapitre 1, je commence par décrire une abstraction, basée sur la notion d'intention, pour la spécification d'agents situés autonomes (chapitre 2). L'intention est ici considérée du point de vue de la sélection d'action réactive, inspirée de considérations neurophysiologiques. Elle constitue une abstraction permettant d'établir un lien entre une partie délibérative de l'agent et la sélection d'action à proprement parlé. Elle effectue un autre lien entre le modélisateur et le modèle simulé pour faciliter le prototypage interactif. Elle s'appuie sur la notion de tendances sur des propriétés internes de l'agent. L'autonomie est ainsi obtenue par la construction d'une extériorité, à partir de ces propriétés. Techniquement, la mise en place du modèle repose sur l'interaction entre un moteur d'inférence interruptible et un mécanisme de sélection d'action qualitatif.

Le chapitre 3 propose l'usage d'une métaphore émotionnelle pour la résolution de problèmes distribués. Ici, des agents, artificiels ou humains, doivent échanger des propositions pour élaborer les combinaisons du problème. La métaphore introduit les notions de stress et de colère ainsi que celle de perception de l'ambiance collective. Une heuristique de résolution est issue de ces notions qui introduisent une sémantique d'un niveau d'abstraction distinct de celui des variables du problème. Cette heuristique enclenche des retours arrière locaux que nous montrons pertinents. Cette proposition, éprouvée sur un exemple de calcul d'emploi du temps proposé par le groupe ASA du GDR-I3, fut à la source du lancement du programme de résolution des emplois du temps de l'ENIB.

Un apprentissage artificiel est présenté au chapitre 4. Celui-ci s'intègre au milieu d'un projet plus vaste de construction d'environnements virtuels de formation. L'objet de l'apprentissage artificiel est de permettre à un tuteur intelligent de proposer des assistances pédagogiques adaptées à un couple apprenant/formateur au sein d'une simulation d'exercice. Une grande part du travail a porté sur l'élaboration des abstractions permettant de définir les entrées et sorties de l'algorithme d'apprentissage. Ainsi la notion de *situation pédagogique* a été précisée au regard de travaux en science de l'éducation et un environnement virtuel informé a été mis en place pour générer des aides pédagogiques utilisant des techniques de virtualité augmentée. L'apprentissage

artificiel est mis en œuvre sous la forme d'un système de classeurs hiérarchiques utilisant des règles structurées, établies en concertation avec des psychologues spécialistes des théories de l'apprentissage. L'apprentissage consiste à équilibrer des poids sur les liens entre des ensembles de règles de différents niveaux hiérarchiques.

Le chapitre 5 fait office de synthèse car il présente un modèle basé sur des abstractions explicitées à l'aide de la notion de contexte et utilisées pour faire coopérer des modèles s'appuyant sur des métaphores différentes et comportant des possibilités d'apprentissage. Le cadre de ce travail, réalisé en collaboration avec FRANCE TÉLÉCOM est l'évaluation d'usage d'interfaces multimodales qui ne peut se faire sans une simulation globale, intégrant l'environnement et les perturbations qu'il occasionne sur l'utilisateur durant l'usage. Nous nous concentrons sur le modèle de cet utilisateur virtuel qui doit à la fois posséder des connaissances explicites sur l'artefact multimodal et être perturbé par différentes interférences sensorielles avec l'environnement. En résumé, il doit exhiber des comportements hésitants, entâchés d'erreurs, prenant en compte des effets de récence, d'activité routinière ou d'agacement. Pour cela, le modèle est un mixage entre un modèle connexionniste traitant les perceptions et un modèle cognitiviste destiné au calcul de plans élaborés en lien avec des ergonomes et des psychologues.

Pour terminer, le chapitre 6 tente de montrer qu'il est possible de situer les autonomies obtenues selon une échelle portant sur l'extériorité des modèles : leur capacité à se construire une représentation de l'environnement. Ainsi, les modèles basés sur une représentation explicite de celui-ci pourront exhiber des comportements très complexes mais finalement peu autonomes, tandis que les autres seront plus autonomes mais souvent plus triviaux. Se dégagent alors deux perspectives principales : l'une consistant à enrichir l'extériorité à l'aide de l'investigation de la notion de contexte des agents autonomes ; l'autre, plus conceptuelle, proposant d'utiliser le courant de l'énaction des sciences cognitives, qui rejette la notion de représentation explicite, pour contribuer à l'approche dynamique de la cognition artificielle dans le cadre de nos simulations.

Chapitre 1

Positionnement

Je propose de commencer ce mémoire par un bref historique qui posera, en arrière-plan, des éléments permettant au lecteur d’y porter un regard particulier.

La problématique de ma thèse portait sur la validation formelle de propriétés de systèmes dynamiques [41]. Mon arrivée au sein du LISYC¹ en tant que maître de conférences en 1998, a été l’occasion d’une reconversion thématique puisque la recherche que j’ai effectuée depuis s’est orientée vers la simulation, la réalité virtuelle et l’intelligence artificielle.

Cependant, la transition fut progressive, en témoignent mes premiers travaux au LISYC qui tentaient une unification entre ces deux périodes de ma vie professionnelle [34, 43]. Je parle d’unification à différents titres car il existait des points communs comme l’usage de la programmation en logique ou la description de systèmes. Progressivement, je m’appliquais à intégrer les notions portées par JACQUES TISSEAU telles que l’approche multi-agents, la réalité virtuelle ou la simulation phénoménologique. Certaines d’entre-elles m’interpellaient : sans synchronisme, quelle validité pour un modèle dynamique parallèle ? Dans un système ouvert, quelle représentation pour préserver la consistance des connaissances et la rationalité des raisonnements ? Quels modèles pouvaient rendre compte de traitements cognitifs crédibles en temps contraints ? Comment adapter *en ligne* une solution partiellement découverte, à un changement des prémisses d’un problème ? J’obtenais progressivement des réponses. Certaines d’entre-elles étaient surprenantes car plutôt que de réponses à proprement parler, elles renvoyaient les questions à elles mêmes. JACQUES TISSEAU m’apprenait le changement de point de vue². D’autres réponses provenaient de mes travaux ou du co-encadrement de doctorants. J’entrais, avec toute l’équipe du laboratoire, dans l’aventure du CERV³ en intégrant l’équipe “Simulations Participatives et Immersives” dirigée par PIERRE CHEVAILLIER. Les thèses allaient à leur terme et m’ouvraient d’autres perspectives de recherche. Il devenait alors opportun de développer ce mémoire de synthèse.

Les simulations participatives offrent aux utilisateurs la possibilité d’en devenir les constructeurs. Ils observent et modifient les simulations, durant leur déroulement, à l’aide d’interactions réifiées en leur sein. Dans ce contexte, la problématique des travaux de recherche présentés dans ce mémoire est celle-ci : *quels sont les modèles adaptés*

¹Laboratoire d’Informatique des Systèmes Complexes, à l’époque il s’agissait du LI2 (Laboratoire d’Ingénierie Informatique).

²Je me souviens d’une discussion avec Jacques, qui se posait l’interêt de la validation d’un modèle ouvert sur le monde étant donné que la principale part de son comportement est issue de cette ouverture imprévisible.

³Centre Européen de Réalité Virtuelle. www.cerv.fr.

pour créer une simulation participative. Une réponse conceptuelle a été apportée par JACQUES TISSEAU : *des modèles qui soient autonomes* [151].

L’objectif de nos recherches est donc d’autonomiser des modèles pour la création de simulations participatives.

Cet objectif a été abordé au travers de plusieurs projets dont certains traitent bien plus que de l’autonomisation des modèles puisqu’ils intègrent des aspects pédagogiques, ergonomiques, combinatoires ou relevant du génie logiciel. Il serait possible de les résumer un à un sans y voir de liens particuliers. Néanmoins, ce qui m’a frappé pour chacun d’eux, c’est la difficulté d’établir les représentations conceptuelles pertinentes sur lesquelles reposent les modèles et qui dépendent de la crédibilité de l’autonomie attendue. Ces représentations ne sont que des abstractions et leur manipulation est largement basée sur l’usage de métaphores ou d’apprentissage artificiel. D’un certain point de vue, le problème du choix de la représentation est une évidence à laquelle sont confrontés tous les modélisateurs. Tous les informaticiens en sont plus ou moins conscients, en témoigne l’existence des outils du génie logiciel [264] ou la difficulté reconnue du métier de cognitif en intelligence artificielle [152]. Cependant, dans le cadre de la construction de modèles autonomes, c’est à dire, étymologiquement, *qui se conduisent eux-mêmes*, ce constat peut être la source de réflexions, inspirées des sciences cognitives, que nous mènerons lors de la présentation de nos perspectives. Je vois à ce titre la constitution de ce mémoire comme l’occasion de dresser un bilan sur le travail effectué, mais également comme une possibilité de prendre un peu de recul pour orienter les travaux à venir.

Avertissement relatif aux références bibliographiques

J’ai fait le choix de distinguer les références *consultées* de celles *citées* (voir pages 94 à 119). En effet, je suis souvent impressionné par la quantité de références reportées au sein des travaux de recherche. Celle-ci me semble par ailleurs croissante et s’explique au regard du foisonnement de publications dont nous sommes témoins. Il me semble qu’il est plus raisonnable et constructif d’indiquer d’une façon ou d’une autre les travaux dont la citation est elle-même relative à une citation initiale, trouvée dans la littérature, entendue lors de présentations ou de discussions de travail. Ceci permet au lecteur, ainsi averti, d’éviter les amalgames qui, de fil en aiguille, de lecture en interprétation, ont parfois lieu et mènent ensuite à des contre-sens comme cela est décrit concernant la thèse de CHURCH TURING dans [68]. Notons que cette séparation des bibliographies m’a été inspirée par le domaine de la philosophie.

Ceci dit, préalablement à la présentation de nos travaux, il est important de préciser ce que nous entendons par simulation participative, autonomie et crédibilité comportementale, objets des sections qui suivent.

1.1 Simulation participative et *Cré-action*

Simuler, c’est faire paraître comme réel ce qui ne l’est pas. Une simulation permet alors de prévoir un réel possible à l’aide d’un modèle. La simulation participative donne

un statut particulier à l’homme en l’intégrant *dans la boucle* : il peut interagir avec elle pendant son déroulement. Une interaction simple consiste à modifier les valeurs des variables manipulées par le modèle pour modifier de façon sensible le comportement observé. La simulation aide alors l’homme à comprendre, à tester et à apprendre. Il peut ensuite proposer des modifications pour *améliorer* le modèle sur lequel repose la simulation. Il devient alors un *cré-acteur* (créateur-acteur). La mise en place d’une simulation participative implique l’usage de modèles permettant :

- **L’ouverture** : un modèle ouvert accepte et s’adapte à des modifications “imprévues”. Ceci est une vue de l’esprit car du point de vue de l’informatique, une modification imprévue mène à un *bug*. Il s’agit, pour le modélisateur, de “prévoir l’imprévu” en le généralisant par le biais de concepts. La nature des modifications “imprévues” acceptables caractérise le degré d’ouverture du modèle. Elle peut par exemple aller jusqu’à une modification du modèle lui-même, durant la simulation.
- **La compréhension** : il faut que les modèle présentent des informations, des comportements et des interactions qui puissent être le support d’une *prise de conscience* par l’utilisateur. De lui permettre de *vivre* la simulation. De telles informations peuvent-être des variables particulières qui donnent accès à l’intérieur du modèle. Elles peuvent être aussi un comportement observable visuellement et plus généralement perceptiblement (vue, ouïe, toucher, ...) et qui fait sens pour l’utilisateur.
- **La substitution** : elle consiste à pouvoir substituer l’homme au modèle et réciproquement. Le modèle peut ainsi faire à la place de l’homme pour simuler ses comportements et l’homme se mettre à la place du modèle pour lui montrer un comportement ou tester la réaction des autres modèles. Si la substitution du modèle par l’homme peut être vue comme une ouverture particulière, l’inverse est plus délicat : il faut que le modèle puisse reprendre la main à tout instant sur son contrôle, donc savoir retrouver un état interne cohérent avec une situation courante qu’il n’a pas provoqué lui même.

L’illustration exemplaire d’une simulation participative est une expérience de réalité virtuelle [62]. La réalité virtuelle tente d’intégrer l’homme de façon ultime en proposant des modèles dont les entrées et les sorties sont directement reliées au corps. Idéalement, les modèles de la réalité virtuelle sont ouverts car l’utilisateur peut théoriquement leur faire subir *tout* ce que son corps et son esprit lui permettent. La compréhension du modèle est facilitée par une représentation la plus proche possible du réel (scène 3D, son, mouvement ...). L’ouverture reste un défi relevé par différentes équipes de recherche comme au CERV, où l’on développe des outils de prototypage *en-ligne*. Cette vision idéale de la réalité virtuelle ne doit pas cacher de nombreux écueils. Outre les difficultés techniques très importantes, un autre défi réside dans le fait que le modèle réagisse de façon compréhensible pour l’homme. Pour cela, et comme l’a initié JACQUES TISSEAU, nous proposons de passer par une autonomisation des modèles.

1.2 Autonomie et phénomènes

Les philosophes appellent *inquiétude ontologique* le fait que l’on ne perçoive notre existence qu’au travers du fait que la réalité s’oppose à nous [30]. Ce que JACQUES

TISSEAU reformule différemment par le fait que *la réalité nous résiste car elle est autonome par rapport à nous* [151]. L'homme pourra croire en une réalité virtuelle s'il y retrouve cette autonomie. En d'autres termes, une simulation participative ne peut l'être que parce que les phénomènes qu'elle simule sont autonomes.

Pour illustrer cette idée, prenons le cas de sciences telles que la physique. Dans ce cadre on utilise souvent une approche analytique de la simulation. Sans entrer dans un débat linguistique, je qualifie ces simulations d'*analytiques* car elles sont basées sur des équations manipulant directement les grandeurs observables dont on cherche à reproduire la dynamique qui constitue l'objet de l'analyse. Ce principe offre l'avantage d'autoriser l'usage d'outils mathématiques bien maîtrisés tels que les méthodes de résolution numérique. Sa faiblesse se résume par le caractère peu explicatif et non adaptatif des modèles proposés ainsi que par l'impossibilité d'aborder les systèmes complexes, composés de nombreux niveaux en interaction, munis de dynamiques propres [180]. Ceci est lié au fait que de telles équations ne rentrent pas au coeur des phénomènes, elles ne sont pas faites pour ça.

A l'inverse, les *simulations phénoménologiques*⁴ se basent sur la reconstitution des interactions entre phénomènes en tant qu'entités identifiées qui deviennent alors des agents. Elles présentent l'avantage de proposer un support pour l'approche des systèmes complexes et d'offrir l'adaptabilité à des conditions changeantes et l'explication causale. En effet, un phénomène est le passage observable d'un fait à un autre. Il est pensé en terme de causes et d'effets. Toute perturbation devient un phénomène supplémentaire s'ajoutant aux autres et le comportement global du système *émerge* des interactions entre ces phénomènes. La simulation peut alors devenir participative : l'homme causant des phénomènes supplémentaires par le biais d'interactions, devient un modèle parmi les autres, doté des mêmes capacités d'interactions qu'eux. La simulation phénoménologique peut alors autoriser le principe de substitution.

Un des problèmes de cette approche de la simulation est qu'elle ne manipule pas les variables observables résultant des phénomènes comme le font les méthodes analytiques. Elle passe par une identification des différents phénomènes possibles qui, une fois en interaction, *devraient* rendre compte de l'évolution de ces variables. La différence entre l'approche analytique et l'approche phénoménologique peut être vue relativement au contexte de la simulation : dans une simulation analytique, lorsqu'on fait varier un paramètre, cela n'a pas d'influence sur les autres, la modification est faite *toutes choses égales par ailleurs*. A l'inverse, dans une simulation phénoménologique, une telle variation est faite *toutes choses incertaines par ailleurs*. Une autre difficulté est liée aux dynamiques propres à chaque modèle et à l'utilisateur qui doivent pourtant interagir dans un temps commun [119]. C'est pourquoi il n'est pas simple de trouver *le bon* modèle. La difficulté est désormais déplacée de la recherche de méthodes de résolution numérique à celle d'abstractions et de métaphores pertinentes.

⁴Ce terme est souvent utilisé même s'il existe deux définitions de la phénoménologie : celle de la description des phénomènes, que nous adoptons ici et celle d'une posture philosophique qui s'intéresse aux phénomènes vécus.

Quelques exemples

La séparation simulation analytique/simulation phénoménologique peut être étendue, par analogie, à de nombreux domaines, qu'ils soient applicatifs ou conceptuels. A titre d'exemple, nous allons mentionner trois d'entre-eux qui nous intéressent particulièrement dans la suite de ce mémoire : la résolution de problèmes, l'évaluation d'usages d'interfaces et les paradigmes des sciences cognitives.

Une *résolution analytique de problèmes* est un algorithme optimal implicitant la recherche pour passer d'un état initial donné à un état final souhaité. L'exemple illustratif de ce type d'algorithme est le calcul récursif de la séquence de manipulation pour résoudre le problème des tours de Hanoi⁵. Il ne peut pas être appliqué à un problème dont l'état initial est quelconque et ne peut pas non plus s'adapter à une modification *en ligne* (ajout d'anneaux, changement de configuration des piquets, disparition d'anneaux, etc...). Une *résolution phénoménologique de problèmes* est basée sur la modélisation des causalités générant ou empêchant la solution d'apparaître. Pour les tours de Hanoi, les causes sont les actions sur les anneaux et les effets sont leur nouvelle position. L'algorithme doit donc modéliser toutes ces actions. Il doit également prendre en compte la règle du jeu, de façon explicite et non implicite (comme cela est le cas dans la version analytique). En d'autre terme, *l'algorithme doit trouver la solution, la construire, pas l'appliquer*. On retrouve alors la difficulté pour élaborer le modèle phénoménologique qui rendra compte de la solution exhibée par une résolution analytique comme nous le verrons au chapitre 3.

Dans le domaine de l'évaluation des interfaces homme-machine, la notion de *méthodes analytiques* d'évaluation est explicite (voir chapitre 5 et [85]). Ces méthodes partent d'une description des procédures de manipulation de l'interface, qu'elles utilisent pour évaluer des critères tels que le temps mis par un utilisateur pour atteindre un but particulier. Elles se distinguent des *méthodes par simulation* pour lesquelles on simule le comportement de l'utilisateur à partir d'une description causale de celui-ci. On peut alors faire évoluer, *en-ligne*, les conditions d'usage de l'interface et prendre en compte l'environnement de l'interaction.

Enfin, en sciences cognitives [154], le cognitivisme est basé sur la manipulation de symboles représentant le monde sur lequel il faut raisonner. Les états mentaux, utilisés par le cognitivisme, sont issus de la *philosophie analytique*. A l'inverse, pour le connexionnisme, ces représentations sont censées émerger par le biais de mécanismes d'interaction complexes qui sont alors l'équivalent de phénomènes. L'énectionnisme va plus loin en mettant de côté la notion de représentation et en introduisant celle de couplage entre l'organisme cognitif et son environnement. Notons que ce dernier paradigme trouve des appuis philosophiques en *phénoménologie* [156].

Une des difficultés de cette distinction est qu'une approche que nous qualifions de phénoménologique est, sous l'angle de la performance, bien moins intéressante qu'une

⁵Jeu très connu en algorithmie, consistant à déplacer des anneaux de taille différente sur des piquets en respectant des règles portant sur la taille des anneaux. Il fut proposé par le mathématicien Picart EDOUARD LUCAS au XIX^{ème} siècle.

approche analytique. Les apports sont ailleurs, dans l'ouverture et l'adaptativité (pour la résolution de problèmes et l'évaluation d'usages) ou simplement l'adéquation entre les paradigmes et les observations (pour les sciences cognitives). Ceci donne lieu à de nombreux débats que l'on retrouve dans chacun des domaines mentionnés ici.

1.3 Autonomie et crédibilité

1.3.1 Crédibilité et résistance

Un modèle autonome doit donc nous *résister*. Qu'entend-on par là ? Il faut que nous soyons capables de comprendre le modèle, de l'interpréter et à la fois d'être surpris, interpellé par lui. Un modèle non autonome ne surprend pas dans le sens où à chaque fois qu'on présente une valeur à ses entrées, il génère la même sortie. A l'inverse, la réalité intrigue, suscite la curiosité, nous pousse à comprendre, à agir. Cependant, un modèle autonome n'est pas non plus un modèle qui fait *n'importe quoi*, générant par exemple des sorties aléatoirement. Dans un tel cas, il devient tout aussi peu intéressant qu'un modèle non autonome. L'autonomie que nous recherchons est quelque part entre les deux, elle correspond à ce que nous nommerons l'**autonomie crédible**.

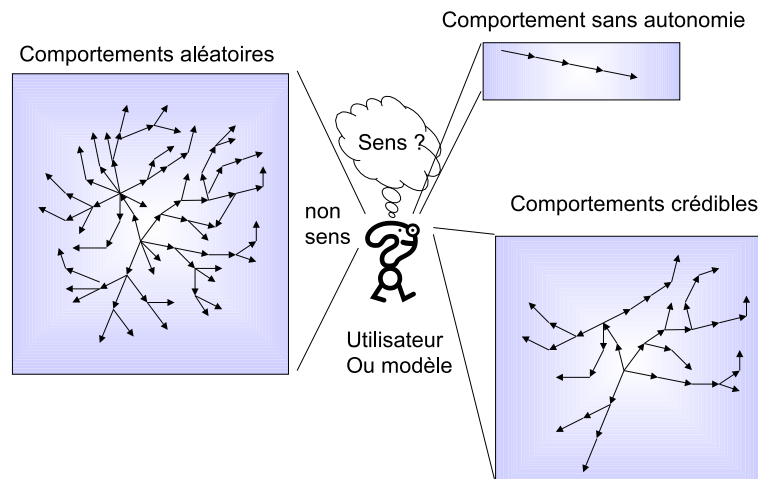


FIG. 1.1 – Les comportements crédibles : entre l'aléatoire et le déterminé.

Il est vain de proposer une échelle de crédibilité : les résultats à juger sont à confronter à l'application ciblée. Par exemple, un modèle comportemental de joueur de football pourra satisfaire un joueur de jeu vidéo sans être utilisable par un entraîneur. L'autonomie crédible est donc limitée à une certaine catégorie de comportements compréhensibles et satisfaisants pour celui qui s'y confronte. *Le modèle possède alors une **signification** ou un **sens** pour son utilisateur*. C'est cette signification qui guide sa construction. Dans notre cas, la signification va définir ce que doit voir et montrer le modèle, c'est le *quoi*. Elle va également préciser la façon dont le modèle doit s'y prendre, c'est le *comment*. La figure 1.2 illustre ce compromis : selon la signification, un niveau d'autonomie différent correspondra à une crédibilité satisfaisante.

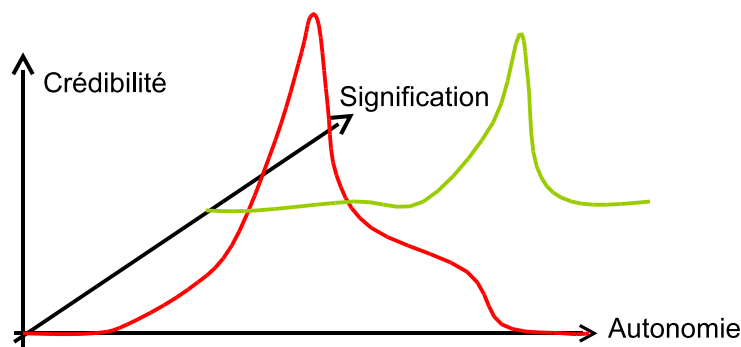


FIG. 1.2 – Autonomie, crédibilité et signification.

Cependant, dans notre cas, pour s'adapter à une situation, un modèle autonome doit *comprendre* celle-ci et donc comprendre les autres modèles ainsi que ses interactions avec l'homme. Par conséquent, *les modèles autonomes possèdent un sens pour les autres modèles*. Enfin, si la substitution a pour but de faire exécuter à un modèle ce qu'un avatar⁶ aurait fait, *il faut que le sens compris par les modèles soit cohérent avec celui compris par l'homme*.

1.3.2 L'héritage de l'intelligence artificielle

Comme nous le verrons dans les prochains chapitres, la plupart des simulations participatives auxquelles nous avons contribué sont complexes, c'est à dire qu'elles ne se limitent pas à des exemples jouets mettant en évidence un sous-problème précis mais intègrent de nombreux modèles pour rendre opérationnels des outils de réalité virtuelle. Cet aspect offre l'avantage de fournir un cadre pour l'expression d'abstractions et du sens que doit rendre l'autonomie des modèles. Cependant, il présente un écueil : il implique que ces modèles manipulent de nombreuses données dont la structure est complexe et la taille importante. Nous sommes alors contraints de proposer des modèles *technologiquement réalistes* dans le sens où ils doivent à la fois être implémentables et rendre compte de l'ensemble de l'autonomie souhaitée. Par conséquent, nous nous sommes souvent bornés à utiliser et à adapter des approches de l'intelligence artificielle classique.

Par conséquent, pour les quatre chapitres qui vont suivre, nous sommes dans une perspective cognitiviste, pour laquelle la sémantique est portée par les symboles au sein des modèles. Nous avons simplement *tordus* les modèles afin de nous éloigner des paradigmes classiques de l'IA en utilisant métaphores, abstractions et apprentissages.

Tentons d'illustrer le rôle de l'abstraction, de la métaphore et de l'apprentissage dans la définition d'un comportement.

- **L'abstraction** : les symboles et les représentations manipulés par nos machines

⁶L'avatar est la représentation d'un utilisateur d'un système de réalité virtuelle dans l'environnement virtuel.

sont inventés par l’homme. Ils sont une abstraction⁷. La difficulté pour le modélisateur consiste à les identifier - c’est le problème de la *transduction* - et à établir des mécanismes pour rendre compte des liens entre ces représentations abstraites et les observations réelles⁸. Dans notre cas, l’abstraction permet de définir les variables et les valeurs de variables pertinentes permettant de préserver un comportement crédible tout en évitant le calcul inutile de phénomènes ayant lieu à des échelles sans rapport avec l’observation attendue. Dans un système complexe, il peut y avoir des abstractions à différents niveaux. Ces abstractions multi-échelles permettent de rendre compte de phénomènes également multi-échelle. La figure 1.3 illustre ce fait en montrant que l’abstraction permet d’approximer les trajectoires d’un comportement réel (à gauche) en préservant les niveaux de détails importants relativement à l’objectif recherché (à droite). Du côté de la psychologie cognitive, des chercheurs tels que E. ROSCH ont mis en évidence le fait qu’un niveau d’abstraction s’impose dans les catégories cognitives. Ce niveau se caractérise par l’économie mentale et communicationnelle qu’il favorise, c’est le niveau d’abstraction nécessaire et suffisant pour comprendre efficacement quelque chose [120], [283]. D’autres proposent des modèles d’abstraction pour des domaines spécifiques [277]. C’est ce que nous faisons également mais, plus modestement, pour les modèles informatiques, en vue d’applications précises. Cependant, puisque nous sommes dans une démarche d’autonomisation, la dynamique des modèles est un aspect important qui nécessite parfois l’usage de métaphores associées aux abstractions pour représenter non seulement le *quoi* mais également le *comment*.

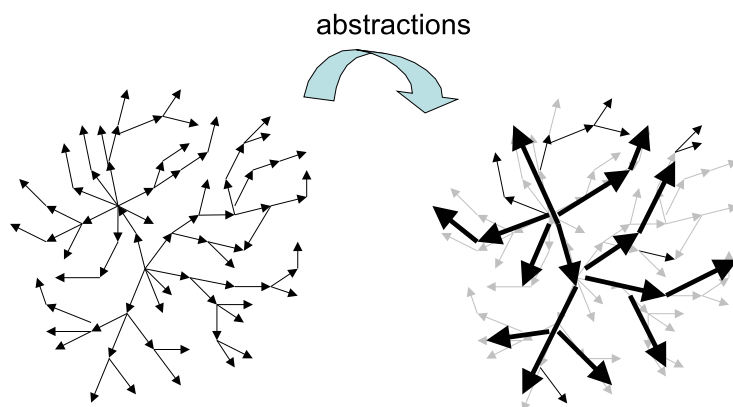


FIG. 1.3 – L’abstraction simplifie les comportements.

- **La métaphore** permet, par le biais d’analogies, de faciliter la définition et la compréhension des modèles. Elle permet également de contraindre le comportement dans un sous ensemble crédible propre à la métaphore. Les métaphores sont largement utilisées dans le discours quotidien pour faciliter la transmission d’idées en se référant à des schémas typiques communs [98]. En informatique elles ajoutent à l’abstraction un aspect dynamique et permettent de définir

⁷Le lecteur intéressé par ces aspects pourra se référer aux travaux de PEIRCE [267] cité dans [48]

⁸La complexité de ces mécanismes et la difficulté pour établir la liste des symboles est bien connue des chercheurs en IA comme des philosophes et s’appelle le “frame problem” [79]

des algorithmes (algorithmes génétiques, recuit simulé, etc...). En science cognitive, les courants cognitivistes et connexionnistes s'appuient respectivement sur la métaphore de l'ordinateur et celle du cerveau. Sur la figure 1.4 le comportement aléatoire de gauche est canalisé par la métaphore en une série de comportements nécessaires et suffisants pour rendre compte d'un sens particulier.

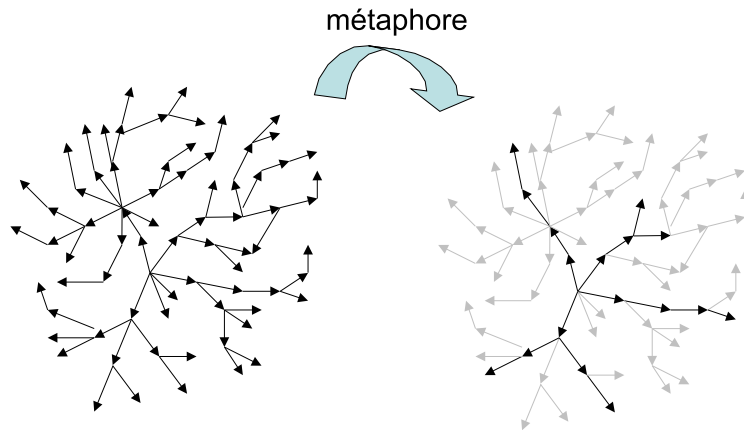


FIG. 1.4 – La métaphore restreint les comportements.

- **L'apprentissage** consiste à découvrir les *quoi(s)* et/ou les *comment(s)* de façon automatique, à partir d'exemples à généraliser. Il offre une alternative pour autonomiser des modèles complexes dont l'explicitation est difficile. Néanmoins, les algorithmes d'apprentissage eux-mêmes reposent sur des abstractions (granularité de leurs entrées/sorties) et des métaphores (le paradigme d'apprentissage qu'ils implémentent) qui vont conditionner leur succès. La figure 1.5 illustre l'apprentissage artificiel. Ici, les exemples enrichissent un modèle exhibant un comportement général proche d'eux. Dans le contexte de la simulation participative, un tel apprentissage est effectué *en ligne*, par le biais d'interactions et de renforcements.

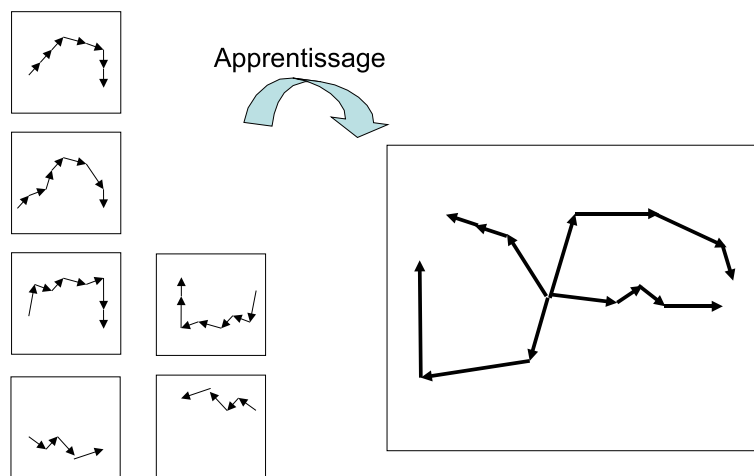


FIG. 1.5 – L'apprentissage “extrait” les comportements.

1.3.3 Autonomie et réalité virtuelle

L'élaboration d'abstractions, de métaphores ou d'apprentissages peut se co-construire grâce à la réalité virtuelle. En effet, l'association de la réalité virtuelle et d'une modélisation phénoménologique donne accès, moyennant des techniques de modification de spécification *à la volée*, à un prototypage interactif. La réalité virtuelle montre les effets d'une modélisation en cours et offre au spécialiste un outil d'interprétation. Ce dernier peut localiser ce qui fait sens pour lui et enrichir, modeler ou redéfinir certaines abstractions ou métaphores sans que cela ne nécessite un re-calcul complet de la simulation (grâce à la localité des phénomènes). La réalité virtuelle contribue à améliorer un modèle pour amener progressivement le sens obtenu vers le sens attendu.

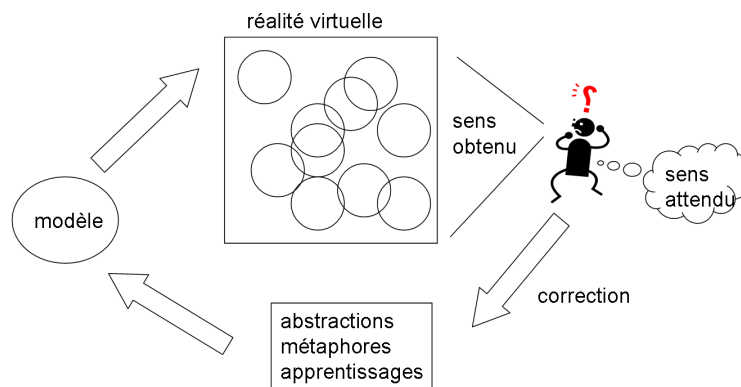


FIG. 1.6 – Le prototypage interactif des modèles.

1.4 Plan du mémoire

Au travers de ce positionnement, nous avons tenté de dresser un cadre conceptuel des travaux que nous allons décrire. Il faut garder à l'esprit que cette synthèse nécessite un certain pragmatisme lié à la chronologie de ces travaux qui justement ont été élaborés parallèlement ainsi qu'à leurs cadres applicatifs différents. Pour chacun d'eux, je tenterais une articulation relative aux simulations participatives en les situant relativement aux points mentionnés en section 1.1. Je présenterais également une revue bibliographique des travaux qui leurs sont connexes, avant de les décrire à proprement parler. Cette présentation ne détaille que certains aspects des travaux effectués, en rapport avec l'autonomisation. Ils ont majoritairement fait l'objet du co-encadrement de thèses durant lesquelles d'autres problèmes ont été abordés. La suite de ce mémoire s'articule donc de la façon suivante :

- Le chapitre 2 présente l'autonomisation d'agents intentionnels pour la réalité virtuelle : l'objectif est de définir et de simuler des comportements d'agents situés dont le raisonnement est contraint par le temps et ce à partir de la notion d'intention. Cette notion devient le support de l'abstraction proposée. Ce travail a fait l'objet de l'encadrement de la thèse de PIERRE ALEXANDRE FAVIER [55].
- Le chapitre 3 propose une méthode de résolution distribuée et adaptative de problèmes. Celle-ci est basée sur une métaphore émotionnelle formant une heu-

ristique permettant l'élagage du graphe de résolution. Ces travaux personnels ont été initié par ma participation au groupe de travail ASA⁹ et sont à l'origine du logiciel de calcul des emplois du temps de l'ENIB¹⁰.

- Le chapitre 4 s'attache à décrire un tuteur intelligent pour les environnements virtuels de formation, rendu adaptatif par le biais d'un apprentissage artificiel. Ce tuteur est spécialisé dans la détection et l'explication d'erreurs sur des apprentissages de compétence. Il a été mis au point dans le cadre de la thèse de CÉDRIC BUCHE [22].
- Le chapitre 5 offre un regard sur le modèle d'un utilisateur virtuel de système interactif multimodal. Celui-ci a été développé dans le cadre d'un projet, en partenariat avec FRANCE-TÉLÉCOM et l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, visant à aider les ergo-psychologues dans l'évaluation des mobiles du futur. Il fait figure de synthèse dans le sens où il repose sur un mixage des métaphores cognitivistes et connexionnistes par le biais d'une abstraction appelée *contexte interne* et qu'il contient des algorithmes d'apprentissage. Il a fait l'objet de la thèse de LAURENT LE BODIC [100, 101].
- Le chapitre 6 propose les perspectives de ce travail. Il positionne les travaux effectués en fonction de la construction d'une extériorité par les modèles, impliquant une non représentation explicite de l'environnement ou du problème investi. Il en déduit deux perspectives principales pour améliorer cette extériorité. L'une proposant d'investir la notion de contexte dans les modèles autonomes et l'autre, plus fondamentale, considérant la théorie de l'énaction comme support d'une autonomisation.

Enfin, certains travaux ne seront tout simplement pas abordés. C'est le cas par exemple de la génération d'interactions entre agents situés, à partir de contraintes temporelles [43], objet de l'encadrement du DEA de ANDRÉ RIBES [135] ou de la modélisation du contexte d'interaction pour la mise en place d'aides pédagogiques, objets de la thèse de ROMAIN BÉNARD, actuellement en cours¹¹.

Nous vous souhaitons une bonne lecture.

⁹Groupe de travail "Approches par Sociétés d'Agents" du GDR I3.

¹⁰<http://www.enib.fr/edt>

¹¹La thèse de ROMAIN BÉNARD porte sur la modélisation du contexte d'interaction pour la mise en place d'aides pédagogiques selon une approche constructiviste de l'apprentissage des situations dynamiques collaboratives en réalité virtuelle. Nous résumons sa problématique lors de la présentation des perspectives au chapitre 6

Une abstraction pour les agents situés : l'intention

Résumé

Ces travaux portent sur la spécification de comportement d'agents autonomes situés en s'appuyant sur la notion d'intention. Après une présentation de la problématique (section 2.1) et un état de l'art sur les modèles d'agents autonomes sous contrainte temporelle d'exécution (section 2.2), ce chapitre explicite notre modèle intentionnel (section 2.3). Le modèle fournit une extériorité à l'agent, c'est à dire une représentation de l'environnement et de sa dynamique, qui lui est propre, à partir d'un nombre fini de symboles, adaptés à la description de comportements situés lui conférant son autonomie. Il a donné lieu à une implémentation et à l'outil de spécification SMAIN.

2.1 Simulation participative d'agents situés

Les agents situés peuplent les univers virtuels et sont dotés de capacités de perception et d'action¹ [52]. Ils agissent sur l'environnement virtuel qui agit sur eux. Leur autonomie résulte de leur capacité à traiter leurs perceptions pour guider leurs actions en fonction de buts à atteindre. En réalité virtuelle, les *environnements informés* sont généralement utilisés pour décrire ces agents [48]. Les éléments peuplant ces environnements sont associés à une sémantique utilisée dans la description des comportements. Ceci pose le problème du choix de cette sémantique et de sa flexibilité. Elle doit être de haut-niveau pour permettre une ouverture maximale de l'environnement (arrivée de nouveaux objets dans une scène, auxquels il faut s'adapter) tout en étant proche du domaine sujet de la simulation, afin qu'un spécialiste de ce domaine puisse décrire les comportements.

Enfin, la réalité virtuelle nous confronte à un autre problème : les univers virtuels contraignent les vitesses d'évolution de l'environnement ainsi que les vitesses d'exécution des actions des agents à une échelle temporelle qui est distincte de celle de leur prise de décision. Apparaît alors la nécessité d'introduire des architectures d'agents composées d'éléments fonctionnant à des échelles de temps différentes et asynchrones

¹Leur situation n'est pas nécessairement topologique. Elle peut par exemple être sociale. Ce qui importe, c'est que l'agent se trouve dans un monde lui donnant une situation qui influe sur sa perception.

[219]. Précisons les notions associées aux simulations participatives (section 1.1) que nous avons développé pour la définition d'agents situés autonomes :

- **L'ouverture** : il faut distinguer l'ouverture du modèle relativement à l'environnement et celle relative à l'utilisateur. La première permet à l'agent de s'adapter avec souplesse à des éléments nouveaux, arrivant à tout instant. La deuxième consiste à pouvoir modifier les décisions, les perceptions et les actions possibles de celui-ci *en-ligne*. Il faut définir un langage pour décrire les décisions ainsi qu'un modèle des perceptions qui soient pertinents relativement aux simulations en environnements virtuels. En particulier, le passage de grandeurs continues évoluant dans le temps à des symboles particuliers pour la délibération est un des facteurs déterminant de la nature de l'autonomie obtenue. Enfin, eu égard aux spécificités temporelles mentionnées plus haut, il faudra pouvoir modifier les temps de cycle des processus gérant action, perception et décision indépendamment les uns des autres. Notre contribution porte sur ces deux types d'ouverture.
- **La compréhension** : la compréhension par l'humain du comportement d'un agent situé en réalité virtuelle est facilitée par l'immersion de l'humain : l'agent y est directement observable. Cependant, dans le contexte d'une simulation participative, où il faut analyser et modifier les modèles, la compréhension et la définition des comportements seront facilitées s'il existe un pont entre l'ontologie du domaine manipulée par un langage de spécification et le langage d'implémentation, de sorte que ce qui se passe au bas niveau (lancer de rayon, calcul de collisions ...) ait un sens relativement au domaine d'application. Nous verrons que l'intention offre un support commun pour la constitution de telles ontologies. Elle introduit une abstraction qui facilitera également la compréhension des modèles par les autres modèles.
- **La substitution** : se substituer à un agent autonome ne pose pas de problème particulier. L'utilisateur peut choisir les actions que doit effectuer l'agent à l'aide d'une interaction homme/machine standard. Il faut toutefois maintenir le mécanisme de décision en fonctionnement et *débrancher* le déclenchement des actions, de sorte qu'il soit possible à tout moment, pour l'agent, de reprendre le contrôle de son comportement. Nous n'avons pas mis l'accent sur ce point dans le cadre de ce travail.

2.2 Modèles d'agents autonomes situés

Les comportements des agents situés sont très diversifiés. Une entité autonome peut tout aussi bien simuler un être humain [158], une voiture conduite par un humain [205], [80] ou un nuage poussé par le vent [208]. Ces trois exemples montrent l'étendue de cette notion et les différents aspects de crédibilité qui peuvent en découler. Chacun de ces domaines a donné lieu à des propositions spécifiques comme PECS [291] qui est un modèle pour la simulation de comportements humains dans un contexte social ou BRAHMS [163] un langage pour les activités humaines. MASCARET [130], intègre entre autre un modèle de travail procédural collaboratif et un modèle d'environnement physique (voir chapitre 4). Dans un autre domaine et ce depuis une quinzaine d'années, une communauté de chercheurs a développé une catégorie particulière d'agents situés :

les *animats* [252]. Cette approche, sur laquelle nous reviendrons au chapitre 6, propose de simuler le comportement de créatures virtuelles inspirées des animaux. Les architectures proposées sont souvent issues du connexionnisme, avec des représentations sub-symboliques de l'environnement. Il s'avère que ces modèles sont peu adaptés à la problématique du prototypage interactif d'environnements virtuels. Ce dernier nécessite un niveau d'abstraction et de généralité différent que ceux proposés par les travaux cités ci-dessus. Il s'agit pour nous de mettre en avant la notion d'autonomie au sein d'une architecture, associée à un langage pour développer des applications dans différents domaines.

Par conséquent, nous nous intéressons plus particulièrement aux architectures *générales* d'agents autonomes. La section suivante dresse un bilan de tels modèles. Il en existe de très nombreux et pour une synthèse détaillée, nous renvoyons le lecteur à [78] et [48]. De façon synthétique, on peut les regrouper selon leur nature *réactive*, *délibérative* ou *hybride*.

2.2.1 Les approches réactives

Les approches réactives ont pour objectif de définir une action à effectuer en fonction d'une perception donnée en évitant l'usage de mémoires et de représentation explicite de l'environnement. Elles ont été initiées par les recherches en robotique mobile et synthétisées dans des ouvrages comme [4] et [5]. Elles sont basées sur des fonctions comportementales entrée/sorties simples. L'architecture représentative de ces approches est l'architecture à subsomption proposée par RODNEY BROOKS [17]. Son principe réside sur des fonctions s'exécutant en parallèle et capables de s'inhiber mutuellement. Toujours dans le domaine de la robotique mobile, la théorie des schémas, inspirée de travaux en neurophysiologie, identifie des fonctions particulières qui s'influencent mutuellement. Par exemple, les schémas moteurs [170] sont dotés de paramètres qui peuvent être modifiés par des schémas perceptifs. Ceci permet d'accéder à la notion de perception active [181]. D'autres approches implémentent la concurrence à l'aide de la notion de force comme dans la théorie des champs de potentiels [232] où les éléments perçus par l'agent vont l'attirer ou le repousser et lui permettre de faire une planification de trajectoire simplement. Cette fois, ce sont les paramètres d'actions continues qui sont modifiés en permanence. Les comportements réactifs obtenus sont soit triviaux, comme l'évitement d'obstacles, soit délicats à élaborer ou à prévoir. Cet inconvénient apparent peut être un avantage pour exhiber une autonomie réactive crédible qui interpellera un utilisateur. Les approches réactives ont été adaptées à la réalité virtuelle dans le cadre de l'animation de personnages [174, 233]. Ce type d'application est typique de ce que permettent les approches réactives : des comportements que l'on qualifie généralement de *bas niveau*.

A Problèmes des modèles réactifs

Malgré leurs avantages en terme de performance, nous retiendrons que l'absence d'une représentation explicite de l'environnement pose problème pour définir des comportements complexes, étendre un modèle existant et créer un langage de spécification :

la modification du comportement nécessite d’intervenir sur l’implémentation du modèle la plupart du temps. Les liens entre les perceptions et les actions étant définis par le modélisateur, ils n’ont de sens que pour lui et ne sont pas explicités au sein de l’agent. De plus, d’après [211], cette démarche est sujette à l’explosion combinatoire du nombre de comportements à décrire². Il est de plus très délicat de concevoir une architecture réactive adaptative : l’obtention du comportement souhaité repose parfois sur le réglage de valeurs qui n’ont pas de signification pour le modélisateur (seuil d’activation, coefficient d’inhibition ...). Toutes ces critiques sont issues du point de vue de l’intelligence artificielle classique et peuvent se résumer par le problème de celle-ci : le manque de sémantique. Elles sont à modérer par le fait que le positionnement conceptuel des porteurs de la nouvelle intelligence artificielle est de considérer qu’il n’y a pas de représentation à expliciter donc pas de sémantique à manipuler [18]. Nous reviendrons sur ce point de vue lors de la présentation de nos perspectives au chapitre 6. Pour l’instant, étant donnée la perspective applicative de l’autonomisation d’agents en réalité virtuelle, nous ne ferons pas l’*économie* des représentations.

B Introduction des représentations

PATTIES MAES [111] a proposé une architecture réactive (Action Selection Mechanisms) originale qui tente de pallier le problème de la maîtrise de l’expressivité d’un modèle réactif en lui associant des symboles explicites et la capacité de planification. Pour cela, les actions sont dotées de conditions et d’effets permettant de définir des causalités entre-elles et d’établir un plan à partir de buts. De plus chacune de ces fonctions possède une valeur continue représentant une *énergie*. La fonction qui a la plus grande énergie est la fonction sélectionnée. L’énergie de la fonction est liée au temps depuis lequel elle n’a pas été activée et à son utilité pour réduire la distance entre l’état courant du système et le but à atteindre. L’approche Teleo-réactive [262] poursuit les mêmes objectifs avec une distinction dans le mécanisme de recherche d’action : les comportements sont décrits à l’aide de règles logiques réunies en ensembles (Teleo-reactive Programs) destinés à atteindre des buts particuliers. Le mécanisme de sélection s’appuie alors sur un chaînage arrière associé à un système de surveillance continu des préconditions des règles associées aux branches sélectionnées par ce chaînage en cours de résolution. Même si ce fonctionnement évite l’évaluation perpétuelle de toutes les règles, il semble probable qu’il soit confronté à des problèmes temporels dans des environnements complexes. Ces deux approches s’éloignent du concept initial d’architectures réactives tout en se réclamant de celles-ci. L’utilisation de symboles exprimant des états de l’environnement les confronte au problème de la maîtrise de ces symboles. Cependant, l’idée consistant à doter les actions d’un apport sémantique pour effectuer dynamiquement des choix en considérant à la fois l’environnement et les buts à atteindre se retrouve dans notre contribution. Plus proche de la réalité virtuelle, le modèle HPTS++³ [47], [243], propose à la fois un modèle réactif à base d’automates et un langage d’implémentation de celui-ci. L’accent est mis sur les aspects temporels et les synchronisations des comportements. Dans cette architecture, la notion d’agent

²GINSBERG souligne qu’obtenir la liste des comportements possibles à partir d’une action est un problème dont la complexité croît exponentiellement avec la difficulté du calcul de similarité entre le plan et l’état courant.

³Hierarchical Parallel Transition System.

est relative aux états des automates décrivant les comportements afin d'obtenir leur exécution parallèle et leur coordination.

2.2.2 Les approches délibératives

A l'inverse des approches réactives, les approches délibératives sont basées sur une représentation explicite de l'environnement et une modélisation la plus complète possible de celui-ci pour la prise de décision. Elles héritent des travaux sur les logiques et la planification. Nous les décomposons selon qu'elles sont spécialisées dans le calcul d'un plan optimal ou dans l'usage de plans pré-compilés.

A Approches basées sur un calcul de plan

GPS [260]⁴ et STRIPS [60] sont les modèles de base de la planification. Ils consistent à rechercher une séquence d'actions permettant de mener d'un état à un autre, grâce à une connaissance des préconditions et des postconditions de ces dernières. Ils ont donné naissance à des architectures cognitives plus sophistiquées telles que SOAR sur laquelle nous reviendrons au chapitre 5. Le problème du temps de calcul et de la définition des connaissances est le point bloquant de la planification classique [191, 169]. De plus, son extension aux environnements dynamiques (et donc aux simulations participatives) est confrontée à de nombreux problèmes [271]. Ce qui nous intéresse plus particulièrement ici est le fait que les conséquences des actions sont considérées connues. Sur un système participatif, c'est irréaliste. Un autre problème réside dans l'impossibilité d'utiliser une description qualitative, non binaire, pour décrire les causes ou les effets des actions. De telles descriptions, plus proches du *bon sens* seront nécessaires dans une simulation participative basée sur des actions continues définies à partir de perceptions continues propres aux agents situés. Enfin, les planificateurs classiques ne traitent pas les expressions conditionnelles ni les boucles. Ils ne peuvent par exemple planifier l'enfonçage d'un clou dans une planche à partir de plusieurs coups de marteaux, dont le nombre dépend de paramètres propres à la dureté de la planche. Il existe de nombreuses extensions de ce type d'approches, telles que HTN [298], GRAPHPLAN [183] ou les algorithmes *anytime* [78].

B Approches basées sur l'usage de plans pré-compilés

L'introduction de la planification pour le raisonnement d'agents délibératifs a donné naissance à d'autres approches dont l'objectif n'est pas de trouver une solution optimale ou complète mais une planification focalisée sur la remise en question des plans en cours, relativement à l'évolution, *en-ligne*, de l'environnement et des buts d'un agent. Cette notion de *pro-action* se retrouve dans les algorithmes dits de planification réactive. Leur principe repose sur les *Plans Universels* de SHOPPERS [292] : avant le *démarrage* de l'agent, l'ensemble des scénarios qu'il peut exécuter sont calculés et déclenchés en fonction des états rencontrés. C'est sur ce principe que reposent RAP (Reactive Action Package) [61] et PRS (Procedural Reasoning System) [63]. Les BDI (Beliefs Desires

⁴GPS fut développé en 1950

Intentions) constituent un modèle que l’on peut considérer comme une planification réactive. Cependant, leur originalité vient plus du fait qu’ils soient inspirés d’un *modèle pratique*⁵ du raisonnement humain [184]. Ce modèle manipulant explicitement la notion d’intention, nous y reviendrons en détail en section 2.3. En résumé, les mécanismes de plans pré-compilés manquent de souplesse dès que l’on a affaire à des systèmes ouverts, dynamiques et imprévisibles, peuplés d’une multitude d’agents.

2.2.3 Les approches hybrides

Les approches hybrides associent une *couche réactive* et une *couche délibérative*. SLOMAN ET SCHEUTZ en proposent une architecture générale : COGAFF qui ajoute une *couche réflexive* (ou méta) permettant de modifier en ligne les deux couches précédentes [295]. Les travaux basés sur COGAFF se distinguent surtout par les interactions entre les couches et la nature des problèmes qu’ils permettent d’aborder. Un exemple d’application est celui d’agents virtuels surveillant des enfants (virtuels), par définition imprévisibles [177]. Cet exemple exhibe clairement les aspects réactifs (séparer des enfants qui se battent) et les aspects délibératifs (planifier le repas). Dans les agents hybrides du projet Oz [12], la partie délibérative est un planificateur *anytime* capable de donner à tout instant un plan réactif prédéfini. Une idée intéressante des travaux de WRIGHT [310] réside dans la notion de filtre attentionnel. Ces filtres déterminent l’influence de la couche réactive sur la couche délibérative de la façon suivante : chacune des couches fonctionne de façon autonome mais une mesure d’insistance est associée aux buts générés par la couche réactive. Si cette mesure dépasse un seuil particulier, le but est alors considéré par la couche délibérative et influence les raisonnements qu’elle effectue. Réciproquement, si la couche délibérative est engagée dans une tâche particulière, la couche réactive sera toujours en mesure de réagir à la situation courante. De nombreuses autres architectures hybrides ont été développées comme la TOURING-MACHINE [205], le GUARDIAN AGENT [219], l’architecture CYPRESS AGENT [306] ou encore PECS et BRAHMS mentionnées plus haut. Elles se distinguent essentiellement en raison des applications par les primitives comportementales proposées, mais partagent généralement le souci de la différence entre les échelles de temps du fonctionnement interne de l’agent et de l’environnement ainsi que celui de la cohérence entre les représentations symboliques de la couche délibérative et celles des perceptions qui sont continues.

2.3 Modèle d’agent intentionnel réactif

2.3.1 Des BDI aux agents réactifs intentionnels

A Intention et délibération

Doter les agents d’intentions pour les rendre autonomes est la voie la plus évidente au regard de la définition de la notion d’intention⁶. Nous avons mentionné précé-

⁵practical reasoning

⁶L’intention désigne l’acte de la volonté par lequel on détermine le but d’une action, le motif qui fait agir.

demment l'existence des modèles BDI qui manipulent cette notion et distinguent formellement les croyances (**B**eliefs), les désirs (**D**esires) et les intentions (**I**ntentions). Ces travaux font référence à la notion d'intentionnalité telle qu'elle est vue en philosophie analytique par l'école cognitive anglo-saxonne [184, 197]. Les architectures et modèles BDI sont confrontés à des problèmes théoriques du type *frame problem* et sont donc difficiles à mettre en œuvre, même sur un monde fermé. A titre d'exemple, citons le problème de l'incomplétude entre les croyances et les intentions : il faut que le modèle formel rende compte du fait qu'*un agent peut rationnellement avoir l'intention de réaliser un acte tout en ne croyant pas qu'il le réalisera*. Citons également le problème des effets de bords : *si un agent croit que $\alpha \Rightarrow \beta$, le fait d'avoir l'intention de réaliser α ne doit pas l'obliger à avoir l'intention de réaliser β* ⁷.

Il existe plusieurs propositions de formalisation des BDI, les plus connues sont : la proposition de COHEN ET LEVESQUE [37], première formalisation de la théorie de BRATMAN, basée sur une extension des logiques modales et la sémantique des mondes possibles, celle de RAO ET GEORGEFF [131, 132] introduisant des probabilités sur les événements non déterministes et traitant les intentions comme des attitudes mentales au même titre que les désirs et les croyances, les distinguant ainsi de la notion d'engagement. Celle de KONOLIGE ET POLLACK [241] qui tente d'échapper au problème des effets de bords. Enfin, WOOLDRIDGE [161] propose un formalisme intitulé LORA (Logic Of Rational Agent) prenant en compte la durée des actions.

Les BDI sont des approches formelles intéressantes mais abordent des problèmes conceptuels très éloignés d'implémentations pragmatiques. Dans les simulations participatives avec un nombre important d'agents, un système ouvert et une gestion graphique non triviale, ces approches sont difficilement envisageables en l'état.

Par conséquent, bien que la notion d'intention soit adaptée à la définition d'un comportement autonome, nous voulons nous éloigner des écueils des approches formelles de type BDI car nous avons besoin d'une composante réactive, de performances temporelles élevées et de simplicité. L'association intention/réactivité n'est pas courante en intelligence artificielle. Tout au plus, certaines architectures hybrides font cohabiter un module *BDI* avec un processus réactif [257, 258], [115].

B Intention et réactivité

Nous avons donc cherché à définir un modèle hybride avec une composante intentionnelle réactive. Il se base non plus sur des concepts de philosophie analytique mais plutôt sur la notion d'intention étudiée en physiologie [181, 182]. De façon résumée (et simplifiée), nous retiendrons de ces études que l'intention permet non seulement de déclencher et d'arrêter une action mais également de *paramétrer*, d'ajuster l'action en permanence pour qu'elle soit en adéquation avec le but poursuivi. Il existe alors deux dynamiques. Une à court terme, de type réflexe, par le biais de schémas sensorimoteurs pour ajuster nos gestes ou notre regard (perception active) et l'autre s'appuyant sur un modèle intentionnel qui permet d'anticiper l'évolution d'une action de manière

⁷Un exemple très classique dans la littérature est le suivant : une personne qui croit qu'aller chez le dentiste va le faire souffrir et qui a l'intention d'aller chez le dentiste *n'a pas* l'intention de souffrir.

consciente et donc de prendre une décision de déclenchement volontaire, d’inhibition ou d’arrêt de cette action.

L’anticipation de l’effet des actions est au cœur de notre proposition, tout comme la désynchronisation des vitesses de perception relativement à celles de décision ou d’action. Par contre, l’ajustement continu de l’action en cours n’a pas été intégré. L’intention est utilisée comme support de l’abstraction. Elle permet de couvrir les concepts de bon sens accessibles par les concepteurs et couvrant la majorité des besoins d’expression comportementale propre aux environnements virtuels. La programmation logique est utilisée pour la partie délibérative de la spécification, tandis que la sélection d’actions est élaborée par un moteur qualitatif réactif. L’originalité technique réside dans l’interaction entre un langage logique interruptible asynchrone et un langage impératif support d’une plate-forme de réalité virtuelle. Nous allons maintenant développer ces éléments.

2.3.2 L’intention crée des liens

A L’intention support du sens des actions

La notion d’intention est le support d’un lien sémantique entre la partie décisionnelle et la partie réactive de l’agent pour le rendre autonome. L’intention va enrichir le modèle d’informations sur **le sens des actions**. Chaque action ou perception (qui est une action perceptive) fournit une information sur ses effets connus vis-à-vis de l’agent. C’est ce que JACQUES TISSEAU nomme ‘le **savoir sur le savoir-faire**’ pour contribuer à l’autonomisation des modèles (voir figure 2.1). Une action est donc composée d’une méthode impérative, capable de rendre compte d’un comportement au sein de l’univers virtuel et d’informations sémantiques déclaratives utilisables par la partie décisionnelle. Le concepteur définit les perceptions, les actions et instancie les liens sémantiques associés selon l’ontologie de son domaine. Ceci lui permet de comprendre et de créer son modèle.

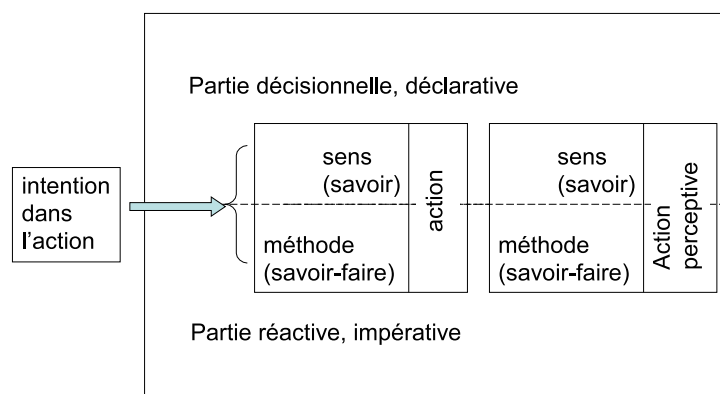


FIG. 2.1 – Le sens des actions sera exploité par l’intention.

Nous allons voir que la notion d’intention peut-être assimilée à celle de **tendances**

sur les propriétés internes de l'agent qui va créer le lien entre savoir et savoir-faire.

B Les propriétés : construction d'une extériorité

Au regard des critiques sur les approches symboliques, l'apport d'un lien sémantique basé sur l'exploitation de symboles au sein d'un modèle réactif semble contradictoire. De même, si nous reprenons les considérations conceptuelles abordées au chapitre 1, les intentions sont le support d'une abstraction destinée à rendre les agents autonomes. Mais en quoi apportent-elles le bon support ? La complexité d'élaboration des BDI montre que la notion d'intention en elle-même ne résoud pas le problème. Notre proposition consiste à permettre une construction d'une *représentation* de la réalité médiée par la perception de l'agent.

Ainsi nous refusons à ce dernier toute forme d'accessibilité directe au "sens" de son environnement : l'agent doit se construire *une représentation* de son environnement. L'intentionnalité de l'agent ne réside pas alors dans cette représentation, mais dans la *construction* de cette représentation. Ainsi, nous restreignons l'ensemble des symboles exprimant le sens des actions, manipulables par la partie décisionnelle de l'agent, à un ensemble fermé, même si l'environnement est ouvert. Ce sont ces symboles que nous nommons les **propriétés de l'agent**.

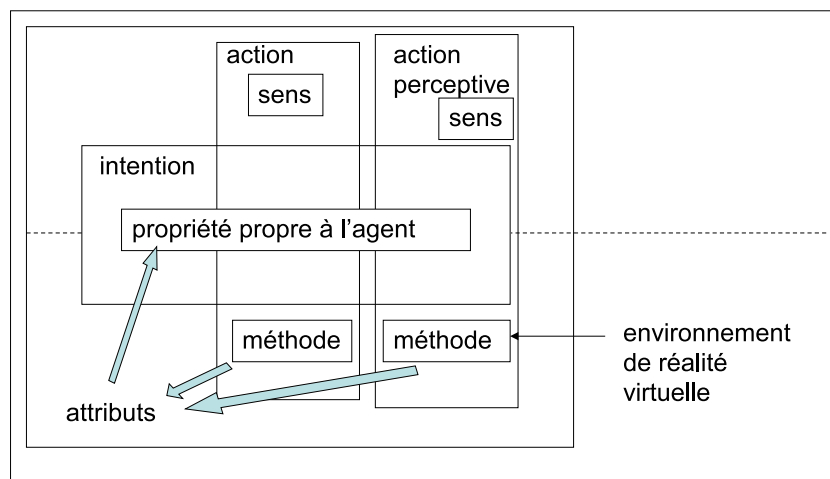


FIG. 2.2 – Les propriétés d'un agent participent à son extériorité.

Ainsi, l'agent ne doit pas prendre de décision en fonction de son environnement, mais plutôt en fonction de la perception qu'il a de son environnement. La décision porte toujours sur quelque chose qui appartient à l'agent, même si la propriété sur laquelle l'agent raisonne peut représenter n'importe quel objet appartenant (ou non)

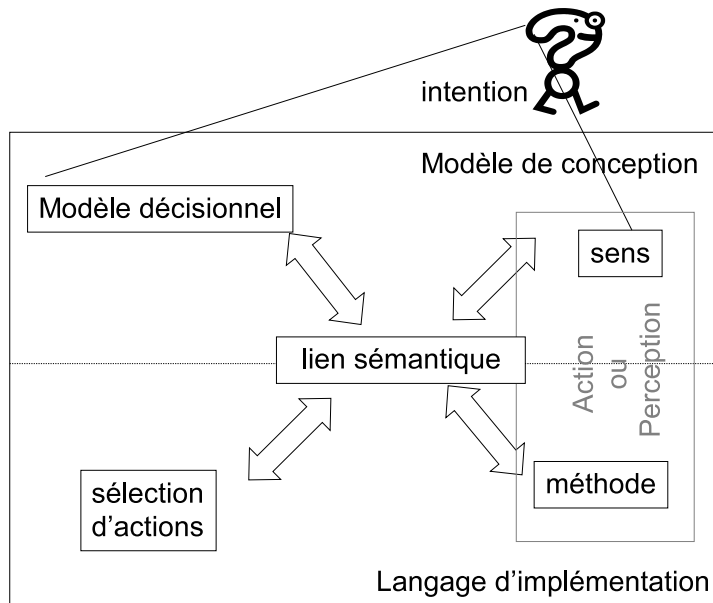
au monde virtuel. Il incombe aux actions perceptives de traduire l’environnement dans l’alphabet symbolique de l’agent. Elles le feront à partir des attributs des méthodes de leur partie réactive (voir figure 2.2). L’alphabet peut donc être arbitrairement restreint.

C Le sens des actions : les tendances sur les propriétés

Représentant l’environnement indirectement, les propriétés évoluent dans le temps, au fur et à mesure des actions de l’agent ou des événements extérieurs. Il est alors possible de parler de cette dynamique sous la forme de tendances pour élaborer les comportements. Ainsi, nous avons considéré que les intentions d’un agent sont sa volonté d’influencer certaines de ses propriétés selon différentes *tendances*. Quatre *tendances* sont définies : *augmenter*, *réduire*, *maintenir* et *indifférent*. Le modèle se base alors sur un mécanisme de résolution qualitative symbolique pour élire la ou les actions satisfaisant au mieux les intentions de l’agent. Ceci permet la sélection d’action même dans le cas où aucun *savoir-faire* ne correspond exactement au but poursuivi.

D L’intention support de la *cré-action*

Plus proche des préoccupations de la simulation participative, l’intention crée également un lien entre le modèle de conception et le langage d’implémentation. Elle contribue à la *cré-action* du comportement en facilitant la *compréhension* en temps-réel et *l’ouverture* caractérisant les simulations participatives : la partie inférieure de la figure 2.3 représente la partie cachée du modèle : son implémentation, reliée au code de la plate-forme de réalité virtuelle. Elle est composée d’un algorithme de sélection d’action (paramétrable par la partie décisionnelle) et des méthodes des actions. Si le lien sémantique utilisé pour relier cet algorithme aux méthodes est le même que celui reliant le modèle décisionnel aux perceptions et aux actions, le concepteur pourra obtenir facilement une explication de ce que fait son modèle en temps réel en observant ce lien. Les notions de propriété et de tendance offrent ce lien. L’ouverture est obtenue par le fait que la partie supérieure de cette même figure est prototypable en temps-réel, par l’utilisateur.


 FIG. 2.3 – Lien sémantique pour la *création*.

2.3.3 Sélection d'action

Nous allons expliciter le principe de la sélection d'action à partir de la description d'un modèle, sans nous intéresser ici aux problèmes temporels et architecturaux. Parallèlement à la spécification des tendances sur les propriétés des actions, le concepteur élabore la partie délibérative de l'agent à l'aide d'une approche déclarative à base de règles qui décrit des buts à atteindre également sous la forme de tendances sur des propriétés. Ces règles peuvent sélectionner des intentions différentes voire contradictoires. L'environnement influence sur les actions perceptives de l'agent, qui modifient, par le biais des attributs, les propriétés de ce dernier. Le triplé *valeur courante des propriétés - tendances sur les propriétés définies par les règles comportementales - tendances sur les propriétés décrivant le sens des actions* constitue l'entrée de la prise de décision qui va, par comparaison, perpétuellement choisir une action. Ceci est illustré par la figure 2.4.

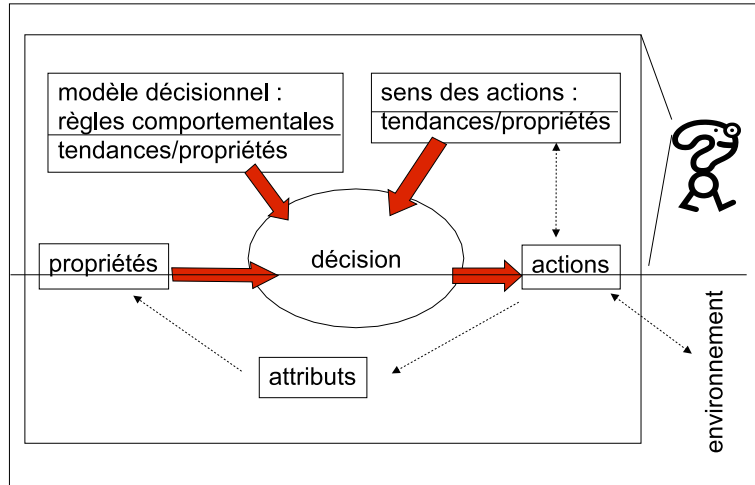


FIG. 2.4 – Le triplé d’entrée pour la prise de décision.

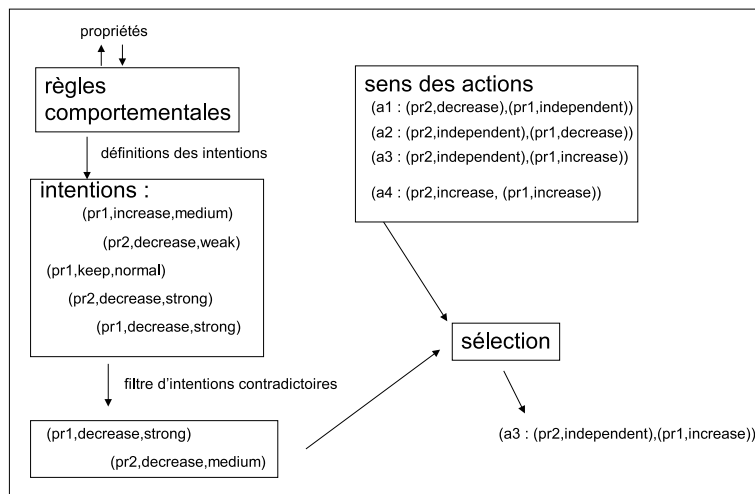


FIG. 2.5 – Principe de la prise de décision.

Une même règle comportementale est susceptible de générer plusieurs intentions qui concernent différentes propriétés. Afin de prendre en compte des comportements plus complexes et de gagner en expressivité, chaque intention est accompagnée d’une force qui indique son degré de nécessité. Par défaut, quatre forces symboliques sont proposées dans le modèle : *weak*, *normal*, *medium*, *strong*. La figure 2.5 résume le mécanisme de sélection : les règles génèrent une liste d’intentions associées à une force. La première opération consiste à filtrer les intentions contradictoires. Pour cela, les forces de toutes les intentions portant sur la même propriété mais selon des tendances différentes sont comparées. Après filtrage, les intentions résultantes ne sont plus contradictoires. Leur force a été réévaluée durant le filtrage. La sélection d’action est ensuite effectuée en comparant les intentions non contradictoires avec le sens des actions (également décrites sous la forme de tendances sur des propriétés). Un compromis est alors trouvé pour choisir l’action qui favorise le maximum d’intentions en respectant des priorités relatives au poids de ces dernières. La formalisation complète des agents intentionnels est proposée dans la thèse de PIERRE-ALEXANDRE FAVIER [55].

2.3.4 Réalisation

L'exploitation de cette architecture a donné lieu à la réalisation de l'outil SMAIN⁸. Celui-ci devait relever de nombreux défis :

- Supporter une approche multi-paradigmes : les contraintes de performance et la nature applicative de la réalité virtuelle impose une approche impérative pour l'exécution des comportements et des perceptions, tandis que la couche délibérative, contenant des règles comportementales, une description des intentions et du sens des actions s'élabore naturellement à l'aide d'une approche déclarative. A l'exécution, la communication entre les deux paradigmes doit être particulièrement soignée de sorte que l'on puisse faire apparaître le comportement *d'agir en réfléchissant* (voir section 2.3.1).
- Offrir une exécution asynchrone parallèle des perceptions/décisions/actions des différents agents avec un paramétrage possible de leurs vitesses respectives.
- Permettre un prototypage interactif en fournissant des services de modification en ligne de toutes les composantes de chaque agent et ce au niveau instance. Ceci nécessite une réification des règles comportementales, des perceptions, des actions, des propriétés, des méthodes et des attributs.

Pour toutes ces raisons, nous nous sommes appuyé sur la plate-forme ARÉVI⁹ [74] développée au CERV et sur SWI-PROLOG¹⁰, une implémentation parallélisable et modulable du langage de programmation logique PROLOG.

ARÉVI est une bibliothèque C++ conçue pour la réalisation d'applications de réalité virtuelle multi-agents. En plus de la gestion individu-centrée d'objets pouvant avoir une représentation graphique en trois dimensions, cette bibliothèque propose un ordonnancement d'activités paramétrable : chaque objet actif contient des activités qui possèdent leur propre fréquence de fonctionnement. Les méthodes des actions et des perceptions des agents intentionnels sont donc des activités ARÉVI. Contrairement aux idées reçues, il est parfaitement possible, même si cela relève d'une maîtrise technique importante, de compiler du code C++ *à la volée* et d'obtenir l'équivalent des fonctionnalités d'un langage interprété sans en subir la lenteur. Grâce à une réification adéquate, l'architecture sur laquelle repose SMAIN permet de modifier les classes ou les instances de classes des agents intentionnels pendant l'exécution de l'application. Il est en particulier possible de déclarer et de détruire dynamiquement les composantes du modèle représentées figure 2.6.

SWI-PROLOG présente les avantages de proposer un moteur d'inférence *multi-tread* et la séparation de bases de règles grâce à la notion de modules. Il reste *léger* car ne contient qu'un seul moteur d'inférence utilisé par chaque *thread*. De plus l'API¹¹ C de SWI-PROLOG permet de manipuler les *thread* PROLOG. Chaque agent intentionnel verra la recherche de ses intentions à partir des règles comportementales effectuée dans un *thread* PROLOG. Sa base de connaissance pourra lui être locale, grâce à l'usage des

⁸Acronyme de **S**ystème **M**ulti-**A**gents **I**Ntentionnels.

⁹Atelier de Réalité Virtuelle, voir www.enib.fr/~harrouet.

¹⁰www.swi-prolog.org.

¹¹Application Programmable Interface.

modules, mais, pour faciliter le prototypage et permettre à des agents d'hériter de règles comportementales, il sera possible de décrire celle-ci à l'extérieur de ces modules. La figure 2.6 illustre la répartition des informations entre PROLOG et C++ pour un agent intentionnel dans SMAIN.

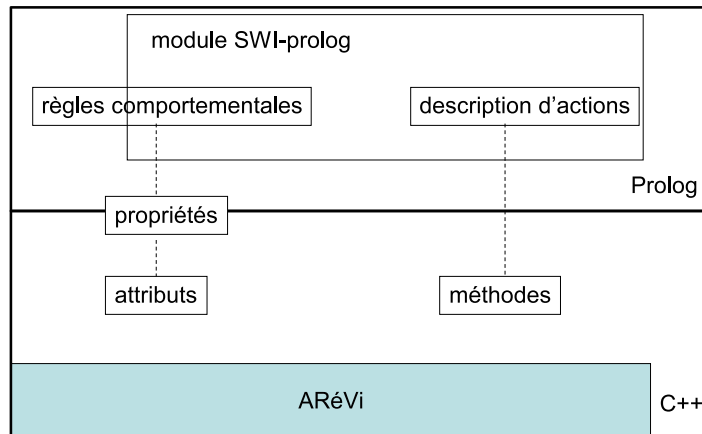


FIG. 2.6 – Répartition entre PROLOG et C++ des principaux composants d'un agent intentionnel, modifiables *en-ligne*.

L'aspect dynamique du comportement d'un agent intentionnel au sein de cette architecture est illustré par la figure 2.7 : les perceptions, décisions et actions sont des activités ARÉVI fonctionnant à leur propre vitesse. L'activité d'action consulte l'activité de décision de façon asynchrone qui calcule à son rythme l'action ayant la plus grande valeur. Ainsi, il est possible de rendre compte de l'influence d'une décision plus lente ou plus rapide qu'un déclenchement d'action (actions répétées ou ignorées). De façon analogue, l'activité de décision consulte régulièrement le moteur d'inférence. Là encore, celui-ci fonctionne à son propre rythme. Il peut donc y avoir décalage ou contradiction entre l'action exécutée et l'intention en cours d'élaboration. Ceci permet de rendre compte de comportements crédibles au regard des considérations mentionnées en section 2.3.1.B. De même, durant l'évaluation des intentions par le moteur d'inférence, les propriétés de l'agent sont consultées à la demande. Ainsi, une règle comportementale pourra commencer avec une valeur donnée pour une propriété et poursuivre avec une autre valeur pour cette même propriété (si cela est demandé par la règle). Ce qui permettra de rendre compte de l'engagement dans des plans qui doivent être adaptés.

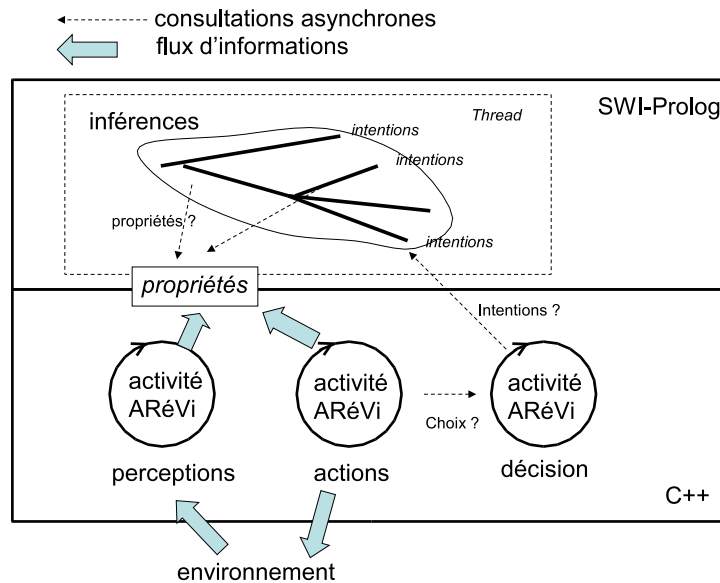


FIG. 2.7 – Echange d'information entre PROLOG et C++.

PROLOG étant un langage interprété, il est relativement aisé de construire une interface permettant la modification *en ligne* des règles comportementales de la partie décisionnelle. En revanche, la compilation *à la volée* du code C++ est plus complexe à mettre en place. Pour cela, un système de compilation en arrière-plan avec chargement *à la volée* du code compilé sans erreur a été développé. Le défi était de permettre la re-compilation partielle d'une classe sans destruction de ses instances, auquel cas nous n'aurions plus affaire à du prototypage interactif. Ainsi, chaque propriété ou méthode donne lieu à la génération de deux types de code. Le premier qui ne peut être modifié et correspond à la définition des classes, le second à la description des méthodes écrites dans une fonction C++ externe à la définition de la classe et qui pourra être recompilé dynamiquement, sans nécessiter de destruction de la classe. Pour le prototypage interactif, la majorité de la description des classes est effectuée dynamiquement. Ceci offre entre autre avantage, de définir des méthodes spécifiques à des instances particulières de classes.

La manipulation de tous ces *détails techniques* est transparente pour le concepteur grâce à l'interface homme-machine de SMAIN non détaillée ici, mais qui soulage ce dernier grâce à une présentation des modèles articulée autour des composants d'un agent intentionnel (actions, propriétés, méthodes, règles, vitesses des activités ...). Ainsi la compilation lui est transparente et la visualisation de la simulation en 3D est déportée sur une fenêtre propre à ARÉVI.

2.3.5 Exploitation

Le temps passé sur le développement de SMAIN n'a pas permis de l'exploiter parallèlement dans le cadre d'un projet de taille importante. Cependant, des *exemples jouets* ont été développés pour évaluer les capacités offertes à la fois par le modèle d'agent intentionnel et l'architecture logicielle sous-jacente. En particulier, la simula-

tion d’un problème de type proie/prédateur a été étudiée de façon approfondie. Elle a montré à la fois la facilité de compréhension du comportement du modèle par un concepteur et la validité technique de l’architecture. Par exemple,

- Il est naturel d’exprimer les propriétés **internes** des proies et prédateurs telles que la faim, la peur ou la vigueur.
- L’expression des tendances sur ces propriétés, liées à des actions particulières est également naturelle. Par exemple, **courir vers la proie** a tendance à augmenter la fatigue mais également à diminuer la faim (tendance supposée, qui pourra ne pas être effective).
- La description des méthodes des actions et des perceptions est laissée à la charge de l’informaticien ; le spécialiste du domaine a par contre accès à la valeur des propriétés pour comprendre ce qui se passe et modifier les règles comportementales pour tester des hypothèses. Voici un exemple de règle comportementale : **si une proie est perçue à moins de 10 mètres et que le prédateur a faim, alors cela provoque pour lui l’intention de diminuer sa faim.** En fait, l’intention de diminuer la faim est déjà générée par des règles de survie de base. Cette règle, quand elle s’active, augmente cette intention.
- Si l’on modifie les vitesses des décisions relativement aux perceptions, le comportement résultant attendu est bien exhibé par la simulation. Par exemple, un prédateur peut passer à coté d’une proie trop vite pour la voir ou foncer sur une proie qui *n’est plus là*.

Dans un exemple tel que celui-ci, le comportement peut sembler très réactif. Il est vrai qu’il serait souhaitable de pousser plus loin le modèle et d’introduire des règles comportementales complexes, faciles à expliciter avec des langages tels que PROLOG. Même si ce travail reste à faire, l’outil en a toute les capacités.

2.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté une abstraction pour l’autonomisation et la spécification d’agents situés. Le modèle et l’architecture résultante s’appuient sur une version réactive de l’intention. Cette dernière propose une crédibilité comportementale basée sur un découplage temporel des perceptions, des décisions et des actions qui peut engendrer des comportements “hésitants” ou “distracts” qui font sens pour l’utilisateur. En effet, dans le cadre de la réalité virtuelle, ce dernier voit ce que perçoivent les agents et peut interpréter les erreurs apparentes en termes naturels. S’il ne veut pas désynchroniser les trois activités pour modéliser un comportement délibératif classique, rien ne l’en empêche. Mais il est clair que c’est une des caractéristiques originale de l’approche concernant la crédibilité.

Un autre point original est la construction d’une extériorité pour accroître l’autonomie. Tout nouvel événement ou objet perturbant l’environnement ne sera pas perçu comme un intru ou un inconnu. Il sera un simple perturbateur des propriétés de l’agent, modifiées par la partie réactive de l’architecture. Le raisonnement délibératif ne fera

pas référence à cet intru et le comportement s'adaptera à la modification résultante. Ceci m'amène à revenir sur le terme d'intentionnalité, utilisé lors de ce travail et sujet à débat dans les cercles philosophiques : l'intentionnalité a été mise au centre des réflexions par BRENTANO qui la présente comme critère pour distinguer les faits psychiques des faits physiques [30]. Différentes interprétations ont été proposées [77] et la difficulté de traitement de ce concept en philosophie m'amène à considérer qu'il aurait pu être minimisé dans ce travail car nos agents, artificiels, ne possèdent pas l'intentionnalité. Le problème initial vient sans doute d'un amalgame entre la notion d'intention et celle d'intentionnalité. L'une ramène à l'autre ce qui a débouché sur un rapprochement discutable entre la phénoménologie, qui propose méthodologiquement de mettre le monde perçu comme extérieur entre parenthèse pour s'intéresser à la façon dont nous le percevons et le représentons, et notre volonté d'exprimer des comportements à l'aide de symboles internes à l'agent pour lui donner accès à une extériorité. Pourtant, comme le précise JEAN-PIERRE MÜLLER [115], ce rapprochement est semble-t-il une des voies prometteuses de recherche pour les sciences cognitives, et nous y reviendrons au chapitre 6.

Concernant l'abstraction : la représentation des intentions à l'aide de tendances sur des propriétés, associée à l'usage d'un système symbolique sur ces tendances atteint nos objectifs principaux. Cette représentation des savoirs sur les savoir-faire est un compromis intéressant entre la simplicité, la puissance d'expression et les contraintes d'exécution et ce, que ce soit pour la compréhension du modèle par lui-même ou par le concepteur. La réalité virtuelle, manipulant des objets qui ont des caractéristiques physiques (position, vitesse, poids ...) ne cesse de manipuler la notion de tendance qui est une valeur intuitive naturelle. Ceci a d'ailleurs été perçu par les physiciens avec l'apparition d'une physique qualitative, plus apte à exprimer le *sens physique* d'un phénomène [206] [139]. Il aurait été intéressant de poursuivre dans cette voie et d'élaborer des exemples pour lesquels les règles symboliques seraient complexes. En effet, notre proposition permet théoriquement d'aborder des problématiques telles que l'apprentissage, par un agent, de ses propres règles comportementales ou l'élaboration d'interactions sociales. L'abord de ces problématiques permettrait de mieux mesurer les apports et limites de la proposition.

Enfin, l'architecture sur laquelle repose le modèle d'agent intentionnel permet une coopération entre un moteur d'inférence et une partie réactive qui fonctionnent à des vitesses propres paramétrables offrant l'accès à des nombreux types de crédibilités comportementales. Elle gère les échanges asynchrones et synchrones entre ces deux parties. Si l'on considère en plus les aspects technologiques liés à la multiplicité du nombre d'agents, élégamment gérés par le partage d'un seul moteur d'inférence et les contraintes matérielles liées à la réalité virtuelle (coût de calcul des représentations graphiques, de la gestion des collisions ...) elle donne de grandes satisfactions.

En plus de la thèse de PIERRE ALEXANDRE FAVIER [55], ce travail a fait l'objet des publications : [58, 56, 57] et présenté au groupe de travail MFI¹² du GDR I3¹³ [1].

¹²Modèles Formels pour l'Interaction

¹³Information Interaction Intelligence

Une métaphore pour la résolution distribuée de problèmes : le stress

Résumé

Ce chapitre présente une illustration de l’usage d’une métaphore au travers du cas de la résolution distribuée de problèmes. La problématique et l’état de l’art constituent respectivement les sections 3.1 et 3.2. La métaphore des agents stressés, basée sur les notions de charge cognitive, de susceptibilité et de colère, apporte une sémantique et une dynamique permettant de résoudre des problèmes en s’adaptant à leur évolution *en-ligne* (section 3.3). Des résultats sont proposés en section 3.4.

3.1 Résolution distribuée dynamique de problèmes

Nous quittons le domaine de la réalité virtuelle pour nous intéresser à la simulation de résolution distribuée et adaptative de problèmes dynamiques. La notion de résolution de problèmes (notée RdP) est vaste. Pour les psychologues elle passe par des mécanismes tels que l’identification des situations, le raisonnement, la construction de connaissances, la mémorisation, l’inférence, l’élaboration de solutions et leur évaluation [136]. En intelligence artificielle, elle est beaucoup plus restreinte. Elle consiste souvent à rechercher automatiquement, par exploration combinatoire, une solution optimisant un critère évaluable [3].

3.1.1 Simulation participative et RdP

Mettre en place une résolution de problèmes par une simulation participative, c’est faire coopérer un algorithme de recherche et un ou des hommes, *co-chercheurs* de solutions. Ceci permet entre autre, de lutter contre l’impossibilité pratique de décrire formellement et définitivement la plupart de nos problèmes. En effet, il est souvent difficile d’exprimer toutes les règles implicites contraignant un problème, qui sont chargées d’une sémantique éloignée de celle des variables utilisées pour formaliser ce problème. Nous avons par exemple fait l’expérience de la gestion d’emploi du temps. Dans ce cadre, de nouvelles contraintes, parfois historiques ou culturelles, apparaissent au fur et à mesure de la proposition de solutions qui ne paraissent jamais satisfaisantes. Cette découverte de contraintes est chose courante dans la recherche de so-

lutions à des problèmes courants, impliquant l’homme dans la boucle. Cependant, pour les découvrir, il faut soit avoir un premier résultat, soit comprendre ce qui se passe pendant la résolution. Précisons les termes d’ouverture, de compréhension et de substitution relativement à une résolution de problèmes par simulation participative proposées en section 1.1 et auxquels notre proposition tente de répondre :

- **L’ouverture** : une résolution ouverte de problèmes consiste à accepter l’introduction ou le retrait de variables et de contraintes durant celle-ci. Cette ouverture peut être illustrée par les problèmes de planification dynamique, où l’on découvre durant l’exécution d’un plan, des obstacles à l’exécution de ce plan et la nécessité de l’adapter (voir section 2.2.2). En simulation participative, l’utilisateur observant un phénomène particulier, peut prendre conscience d’une incohérence. La résolution du problème en cours peut prendre une tournure qui ne correspond manifestement pas à quelque chose d’acceptable. Ceci peut être dû à l’oubli d’une contrainte ou à la nécessité d’un ajustement. La solution en cours de calcul doit alors s’adapter à des petites modifications. Ces dernières ne doivent pas remettre en cause le calcul complet mais doivent être *absorbées* par celui-ci pour *résoudre en interagissant*. L’ajout de contraintes est relativement facile à traiter, car il restreint l’ensemble des solutions possibles. À l’inverse, le retrait constitue un problème plus délicat car il faut ré-injecter des pistes abandonnées qui croissent exponentiellement dans le pire des cas.
- **La compréhension** : comprendre la résolution d’un problème consiste à avoir une vision synthétique et explicite des points bloquants. Si un nombre restreint de contraintes est la cause de la majorité des inter-blocages et des difficultés de résolution, il faut trouver un moyen de les identifier.
- **La substitution** : pour la résolution de problèmes, elle consiste à permettre à l’utilisateur de prendre la main sur la résolution. Il s’agit ici d’imposer une partie de la solution à tout moment et de laisser le programme faire le reste. Plus encore, si l’on se place dans le cas de résolutions collaboratives, il est imaginable que chaque intervenant puisse agir de la sorte et que le système tente de s’adapter à l’ensemble des protagonistes en présence. En poussant davantage cette démarche pour nous rapprocher des principes de réalité virtuelle, on peut imaginer que chaque protagoniste possède un avatar qui puisse se substituer à lui et qui soit capable de prendre des décisions à sa place. La compréhension de la résolution du problème doit alors être mise à la disposition des programmes eux-mêmes.

3.2 Principales approches de RdP

Nous allons explorer différentes familles de propositions qui peuvent contribuer à l’élaboration d’une résolution de problèmes par simulation participative.

3.2.1 Soft-Computing et Méta-Heuristiques

Les approches d’optimisation et d’apprentissage numérique du soft-computing constituent des solutions élégantes et efficaces pour la résolution de problèmes. Elles introduisent des méta-heuristiques pour tenter de s’approcher des *bonnes* combinaisons sans

tout explorer [11]. Ceci n'est généralement possible qu'à condition de savoir évaluer la qualité d'une solution ou de savoir définir la notion de distance entre deux solutions.

Cependant, elles explicitent très peu les phénomènes puisqu'elles "apprennent" les variations des grandeurs observables et non les phénomènes eux-mêmes. Prenons le cas d'un réseau de neurones artificiel. La connaissance du réseau, c'est à dire sa structure, les poids des arcs et la dynamique des unités aident difficilement à la compréhension du choix d'une solution et rend donc difficile la substitution¹.

Les algorithmes génétiques [226] posent un problème analogue : ils sont basés sur la génération aléatoire de multiples propositions. Cette multiplicité n'est pas faite pour aider à l'analyse et à la compréhension de la résolution.

Le recuit simulé nous semble plus intéressant [237] puisqu'il élabore des solutions proches les unes des autres. Il permet donc de voir évoluer la recherche de solutions. De plus, il opère parfois un *saut d'exploration* brutal lorsqu'il rencontre un minimum local afin d'explorer d'autres pistes potentielles. Il est facile d'imaginer, dans le cadre d'une résolution participative, qu'un tel saut soit provoqué par l'homme, de façon moins aléatoire. Cependant cette approche fait l'hypothèse qu'il existe un gradient significatif entre deux solutions voisines. La notion de voisin d'une solution est-elle corrélée avec un gradient quelconque dans une résolution de problèmes combinatoire ? Cela ne semble pas évident : il est possible que deux propositions de solutions pour un problème soit quantitativement proches (par exemple, une seule variable différencie ces deux solutions) alors que qualitativement l'une d'entre-elles est inacceptable car inconsistante et pas l'autre. Un apport sémantique sur ces notions et sur la nature du *saut d'exploration* est une piste que nous creuserons avec notre proposition.

3.2.2 Des CSP aux CSP dynamiques

Les problèmes de résolution de contraintes² sont généralisés et formalisés par un ensemble de variables, l'ensemble des valeurs possibles de ces variables et les contraintes qui restreignent les combinaisons de valeurs des variables [247]. La difficulté réside dans les liens implicites noués entre toutes les variables par le biais de contraintes interposées qui font qu'un nombre très faible de solutions existe parmi un nombre de combinaisons possibles très grand. Il existe de nombreux algorithmes qu'il n'est d'ailleurs pas toujours facile de comparer. Nous nous baserons sur la taxonomie proposée par [90] pour résumer ceux-ci. La résolution de CSP repose sur trois mécanismes : la propagation, la mémorisation et le déplacement.

La propagation consiste en une étape d'analyse des contraintes, de manière à restreindre les domaines de recherche et à modifier le CSP avant la scrutation d'un graphe ou avant de poursuivre cette scrutation si elle est en cours. Elle prend forme au travers du filtrage par arc-consistance (*MAC* [288], *Decision-repair* [230]) ou la consistance de bornes (*Dynamic Domain Splitting* [229]). Elle peut également être associée à

¹Ceci est tout à fait compréhensible puisque le connexionnisme pari sur l'émergence de représentations liées au parallélisme [178]. Les représentations sont donc *noyées* dans les connexions.

²ou CSP pour Constraint Solving Problem.

un mécanisme de gestion des conflits rencontrés pour accélérer la recherche (*Conflict-directed Backjumping*, [275]).

La mémorisation consiste à enregistrer des impasses rencontrées sur une branche de l'arbre de recherche et d'utiliser cette mémoire pour éviter des scrutations inutiles d'autres branches, les nuances entre les algorithmes concernent principalement le nombre et la durée des mémorisations envisagées (*Dynamic Backtracking* [65], *Recherche Taboue* [214], *Decision-repair*[230]).

Enfin, **le déplacement** consiste à guider la direction de scrutation de l'arbre ou à faire des sauts complets de branches en branches grâce aux informations issues de la propagation ou de la mémorisation (*Dynamic Backtracking*, *Dynamic Domain Splitting*, *Recherche Taboue*, *Decision-repair*). Ces sauts nous rappellent le mécanisme du recuit simulé. Mais ici, ils ne sont pas purement aléatoires. Les critères utilisés sont quantitatifs, ils concernent par exemple le nombre de variables impliquées dans une contrainte ou la taille des domaines à réduire. Ils ne sont pas porteurs d'une sémantique plus abstraite liée à la nature du problème lui-même.

Notons également que les recherches sur les CSP s'intéressent à la complétude des solutions : s'il existe une solution, ils la trouveront, du moins d'un point de vue théorique. Cependant, les difficultés pratiques combinatoires amènent à aborder des heuristiques incomplètes comme la *Recherche Taboue*, *GSAT* [293] ou *Decision Repair*.

Pour mettre en place des mécanismes proches de l'ouverture, la notion de CSP dynamiques a été introduite dans [196] et [256]. Nous renvoyons le lecteur intéressé à l'article de synthèse de GÉRARD VERFAILLIE et JUSSIEN NAREDA [157]. Il y a différentes variantes de cette notion. Il faut distinguer les approches qui considèrent l'ajout de contraintes par le système de résolution lui-même en fonction de ses besoins. Ce sont les *Problèmes de satisfaction de contraintes conditionnelles*³ [287]. Ceux-ci ne répondent en rien à l'ouverture d'une résolution de contraintes. A l'inverse, les approches dites de *Problèmes de satisfaction de contraintes ouvertes*⁴ [244, 204] s'intéressent à traiter l'ajout ou la suppression de contraintes durant la résolution. Deux voies sont explorées : l'une consiste à réaffecter les valeurs aux variables en prenant la solution précédemment trouvée comme base et en pariant sur le fait que la nouvelle contrainte ne va pas modifier énormément celle-ci [207, 221, 254, 218, 305, 302] ; l'autre se base plutôt sur les contraintes qui ont changées pour choisir l'ordre de réaffectation des variables [259, 209, 203]. Encore une fois ces techniques ne font aucune hypothèse sémantique sur les variables. Connaissant la nature du problème, on pourrait par exemple imaginer des ensembles de variables prioritaires en cas de modification de contraintes d'un certain type. Enfin, il est difficile de savoir si ces méthodes sont capables de s'adapter, alors qu'une solution complète n'est pas déjà trouvée, à une modification du problème.

La compréhension globale de la résolution n'est pas abordée directement par ces techniques même si certaines d'entre-elles s'en approchent. C'est le cas des méthodes basées sur l'explication [89]. Elles permettent de répondre à des questions telles que

³ou CCSP pour Conditional Constraint Satisfaction Problem.

⁴ou OCSP pour Open Constraint Satisfaction Problem.

Pourquoi le problème n'a-t-il pas de solution ? Pourquoi la variable v ne peut-elle prendre la valeur x ? ou encore Que se passerait-il si je réintroduisais la valeur x ? Ces explications permettent alors de corriger un problème donné. La nuance avec ce que nous appelons la compréhension est dans le niveau d'abstraction de celle-ci : ce n'est pas parce que l'on sait *que le professeur P1 ne peut faire cours à 8H00 car le professeur P2 utilise déjà ce créneau* que l'on sait s'il vaut mieux *modifier l'horaire de P1 plutôt que de P2, voire de changer l'affectation des classes à ces professeurs.*

Enfin, concernant la résolution collaborative, il faut noter que ces dernières années, de nombreux chercheurs se sont donnés pour objectif de distribuer les algorithmes classiques de CSP [162]. Ces travaux ont donné lieu à des algorithmes tels que le *Distributed Consistency Algorithm*, le *Distributed Breakout* ou l' *Asynchronous Weak-Commitment*. Mixés aux approches mentionnées précédemment, ils constituent une base pour la résolution collaborative et nous ont servi à des fins de comparaison avec notre proposition (section 3.4).

3.2.3 Résolution de problème par SMA

Les approches à base d'agents portent une attention particulière sur les interactions ou les critères décisionnels. Un agent voit son comportement guidé par des buts qui peuvent être personnels ou concerner toute la communauté. L'apport sémantique et les métaphores sont alors au cœur des propositions pour simuler différents problèmes. Parmi elles, on peut citer les routines de négociation de type *Contract Net Protocol* [296], la *vente aux enchères* [215], [112], [249], le recuit simulé distribué [64], [210], sa combinaison avec les recherches taboues [255], l'auto-organisation par coopération via la théorie des AMAS⁵ [213], [66], ou encore l'*éco-résolution* [59] et le modèle *satisfaction-altruisme* [246], [147].

Le *Contract Net Protocol* est, comme son nom l'indique, plutôt un protocole de négociation entre agent qu'une technique de résolution de problèmes. Il est utilisé dans le cadre d'affectation de ressources dynamiques mais ne décrit pas un moyen complet d'aboutir à une solution possible à partir de contraintes collectives globales. La *vente aux enchères* est un support utilisé pour évaluer des stratégies individuelles d'optimisation de gains dans des simulations de différents types d'enchères. Il n'y a pas de contraintes très complexes puisqu'elles se résument souvent au fait qu'un objet ne peut être acquis que par un seul agent. Le recuit simulé distribué et sa combinaison avec les recherches taboues sont une parallélisation de ces méthodes d'optimisation : le recuit simulé est lancé en parallèle sur différentes variables ou pour différentes contraintes, tandis que la liste des tabous contient les espaces déjà explorés. La théorie des AMAS s'intéresse aux conditions d'émergence de fonctions par auto-organisation, conditions liées à la notion de coopération entre agents, évaluées à l'aide d'une méthodologie [179], [126]. Malgré leur intérêt, nous ne nous sommes pas concentrés sur les aspects émergentistes ou méthodologiques de conception de systèmes multi-agent pour la résolution de problèmes. L'*éco-résolution* et le modèle *satisfaction-altruisme* se concentrent d'avantage sur l'élaboration d'une prise de décision au ni-

⁵Adaptive Multi-Agent Systems, <http://www.irit.fr/SMAC>.

veau local, contrôlée cependant par une vision globale du problème, à l’aide de deux métaphores opposées : l’*éco-résolution* est basée sur l’agression d’agents par leurs voisins tandis que le modèle *satisfaction-altruisme* s’appuie sur la requête faite d’agents à agents, capables d’accepter de modifier leurs buts temporairement. Même si elles sont destinées à la résolution de déplacements d’agents situés et non à la résolution de problèmes combinatoires, ces approches se positionnent dans la même famille que la proposition que nous allons présenter.

3.3 Les agents stressés

Notre proposition présente les caractéristiques originales suivantes :

- Elle est basée sur une métaphore comportementale émotionnelle. Celle-ci s’appuie sur le constat qu’un groupe d’humains est capable de résoudre certains problèmes de façon pragmatique mais non triviale ou systématique grâce aux émotions [142, 51] et que les émotions sont le moteur de la raison [39]. Il ne s’agit pas ici de tenter de reconstituer le plus complètement possible les différents facteurs identifiés par des psychologues comme c’est le but de certaines architectures cognitives [67] ou dans les applications du “calcul affectif”⁶ [270]. Nous avons simplement introduit la notion de charge cognitive (ou stress), de susceptibilité personnelle et collective ainsi que celle de colère. L’algorithme de résolution intègre un mécanisme de remise en question partielle comparable au retour-arrière local mais son déclenchement est issu de la dynamique liée à la métaphore. On retrouve dans cet algorithme des mécanismes similaires à ceux proposés en planification dynamique par PATTIES MAËS [110] (voir section 2.2.1.B). La notion de gêneur de l’*éco-résolution* y est également présente mais, ici, ce sont les agents eux-mêmes qui se perçoivent comme étant gêneurs, de plus ils ne sont pas localisés et ne se connaissent pas nécessairement. Il existe également un rapprochement avec les algorithmes de recuit simulé. Dans ce cas, les paramètres de température, associés à ces algorithmes, voient leur évolution guidée par la métaphore émotionnelle de l’approche.
- Nous proposons une solution dont la mise en œuvre limite les mécanismes d’acquiescement ou de synchronisation. Nous privilégions la diffusion globale et l’absence d’acquiescement. En effet, la complexité des algorithmes de négociation est souvent liée à la nécessité d’acquiescements qui provoquent une synchronisation de la résolution, une mémorisation, une connaissance mutuelle de l’état des différents agents et parfois une centralisation de l’information par un agent particulier. Sans acquiescement, les algorithmes locaux des agents sont simplifiés, la parallélisation est améliorée (symétrie de comportement) et le système est plus robuste et adaptatif. En contrepartie, il faut mettre en place un mécanisme de régulation des émissions des requêtes. Ici, ce mécanisme est propre à chaque agent et calculé en fonction de critères émotionnels individuels.

⁶L’*affectif computing* concerne l’amélioration des interactions entre l’homme et la machine en y intégrant des facteurs émotionnels.

3.3.1 Principe de résolution

La *charge cognitive* d'un de nos agent reflète son stress. Elle dépend de sa perception et de ses décisions. Ici, la perception correspond à la réception de requêtes ou de messages de détresse et les décisions débouchent sur des affectations de variable ou l'émission de propositions, de requêtes ou de messages de détresse. Les agents possèdent des buts (ou *problèmes*) personnels et des *compétences* relatives à ces buts. Ils peuvent envoyer et recevoir des requêtes relatives à ces buts. Lorsqu'un agent perçoit une requête concernant un but dont il a la compétence, cette requête devient pour lui un *but requis*. S'il peut l'atteindre, il diffusera une proposition. Les contraintes correspondent à des conflits possibles entre les *buts personnels* et les *buts requis*. Il est tout à fait possible qu'aucune réponse ne soit faite à une requête. En fait ceci permet d'éviter le mécanisme d'acquiescement et d'implémenter l'a-synchronisation de notre système. C'est la dynamique de la *charge cognitive* qui permet à un agent "insatisfait" de rediffuser une requête régulièrement, ou plutôt lorsque cela semble nécessaire. Si la *charge cognitive* d'un agent dépasse le *seuil de tolérance*, celui-ci provoque une *colère*. Elle correspond à une remise en cause des engagements pris par l'agent. Pour ce faire, l'agent diffuse des messages d'annulation de tous ses engagements.

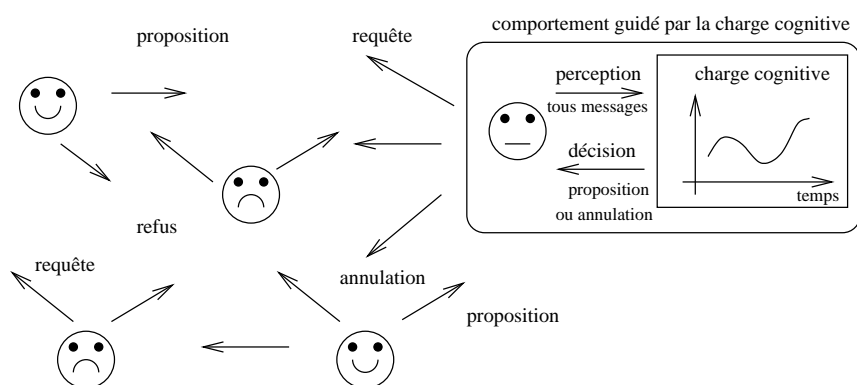


FIG. 3.1 – Agents émotionnels : charge cognitive, diffusion et perception des messages.

La colère, induite par la métaphore, correspond à un retour-arrière qui sera associé à l'agent le plus *gêneur* et seulement à lui. Pour favoriser la recherche de solutions dans le cas où plusieurs agents seraient gêneurs, voire où la situation relative de chacun d'eux provoquerait un (ou des) inter-blocage(s), deux facteurs importants sont intégrés dans le mécanisme de colère :

- *la perception du stress global (i.e : collectif)* : les messages émis par les agents sont diffusés et perçus par l'ensemble des autres agents. La perception d'un message de requête ou de refus augmente le stress, cette charge est d'autant plus accrue que l'agent est concerné par le message et qu'il ne peut y répondre.
- *la relaxation du stress local (i.e : individuel)* : lors d'une colère, le stress de l'agent concerné est annulé. Ceci laisse la possibilité, en cas de blocage fort, que d'autres agents passent leur propre seuil de tolérance et entrent en colère à leur tour. Cette relaxation introduit une *hiérarchie dynamique des gêneurs* orientant le retour-arrière de la recherche (voir figure 3.3).

Une solution est une affectation de valeurs aux différentes variables du problème. Définissons la notion de proximité d'une solution comme une fonction décroissante du nombre des affectations réussies (respectant les différentes contraintes). Le mécanisme utilisé introduit une forte corrélation entre proximité et charge cognitive globale du système multi-agents : lorsqu'une solution existe et qu'elle est trouvée, les charges cognitives des différents agents atteignent leur minimum. Lorsqu'il n'existe pas de solution, un résultat partiel est tout de même obtenu et correspond à la recherche d'une diminution du stress global. Lorsqu'un agent ou de nouveaux buts sont introduits, les *charges cognitives* évoluent en conséquence et la résolution s'y adapte dynamiquement, y compris quand une solution a déjà été trouvée.

3.3.2 Réalisation

Nous avons défini formellement la dynamique de la charge cognitive des agents associée à une sémantique des messages échangés. Il existe ainsi des messages de requête de proposition et de refus, mais également des messages d'abandon consécutifs à la colère d'un agent. La réception de ces messages provoque des modifications de la charge cognitive dépendant de la sémantique et des arguments de ces messages (illustrée en figure 3.1). Ainsi :

1. les informations *positives* diminuent la charge cognitive d'un agent :
 - le *succès personnel* : l'agent a réussi à résoudre un (ou des) but(s), personnel ou requis.
 - la *décharge de responsabilité* : l'agent fait une requête car il ne peut résoudre un but personnel. Dans ce cas, il se repose sur la communauté. Précisons que contrairement à certains protocoles de type *contract net protocol*, l'agent n'opère cette décharge que pour ses buts personnels et non sur des buts requis.
 - le *succès coopératif* : un agent lui a fait une proposition qui permet de résoudre un de ses buts personnels.
 - la *colère* : l'agent annule toutes les solutions qu'il avait auparavant proposées. La colère est un évènement particulier qui va provoquer la remise à zéro de la charge cognitive de l'agent et une remise en question de la solution en cours de recherche. Son comportement n'est pas pour autant "arrêté". Ainsi, s'il reçoit à nouveau des messages, sa charge cognitive va progresser, mais le fait que cette dernière reparte de zéro implique qu'il faudra un "certain temps" avant qu'une nouvelle colère puisse avoir lieu.
2. les informations *negatives* augmentent la charge cognitive d'un agent :
 - les *requêtes* : toute requête est un signe que "quelque chose n'est pas résolu au sein du système multi-agents" et va augmenter la charge cognitive. Si l'agent peut répondre à cette requête, le *succès personnel* consécutif (voir les informations positives) diminue la charge cognitive. S'il n'est pas compétent pour répondre à cette requête, il ne fait rien. S'il est compétent mais qu'il ne peut résoudre le problème lié à la requête, il en résulte un *échec personnel*.

- les *échecs personnels* : l'agent est incapable de résoudre un problème, qu'il lui soit propre ou posé par un autre agent.
- les *refus* : l'agent perçoit les refus diffusés par les autres agents. Il distingue les refus le concernant directement (annulant une proposition qu'il a faite) et qui accroissent davantage sa charge cognitive que les refus ne le concernant pas. Cependant le fait qu'elle croisse dans les deux cas reflète la perception de la *mauvaise ambiance générale* au sein du système (ou de la communauté d'agents). Cette proposition trouve un écho dans des études telles que [53] qui constate que la communication indirecte est un mécanisme fondamental lors de la résolution de problèmes chez les hommes.

Une formalisation complète de l'algorithme est proposée dans [46]. Il est distribué au sein de chaque agent sous la forme d'une boucle perception-décision-action reprenant les principes précédemment cités.

La figure 3.2 représente un exemple d'évolution de la charge cognitive d'un agent stressé durant la résolution d'un problème. On peut voir au temps 300 qu'une colère est déclenchée. Deux autres pics dépassant le seuil de colère apparaissent sans qu'il n'y ait de colère. Ceci est simplement dû à l'asynchronisme existant entre le calcul de la charge cognitive (consécutif à la perception de message) et celui du comportement.

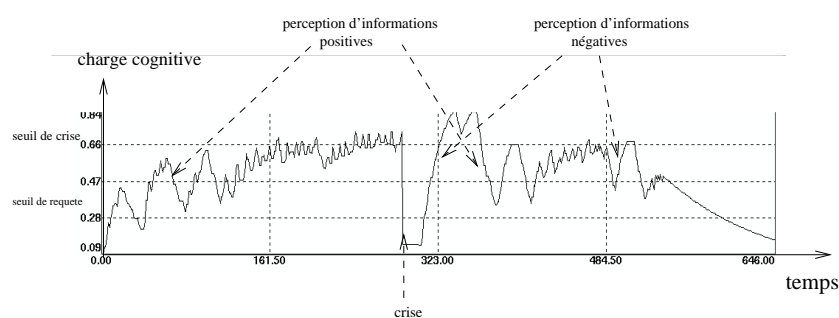


FIG. 3.2 – Exemple d'évolution du stress d'un agent.

3.4 Résultats

Nous avons procédé à une implémentation des agents émotionnels grâce à la plateforme *oRis* [75] et avons instancié cette implémentation au problème du calcul d'emplois du temps. Ce problème a été proposé par le groupe de travail ASA⁷ du GDR I3 auquel je participe. *oRis*⁸ est un langage interprété développé au LISYC intégrant un simulateur et permettant la spécification rapide d'objets actifs communicants. Grâce à lui, il a été simple d'introduire la possibilité de modification *en-ligne* de contraintes. Il est alors possible de constater une adaptation du problème résolu à un instant donné en une nouvelle solution consécutive à une nouvelle contrainte, sans que l'ensemble du problème ne soit reconsidéré.

⁷Approches par Sociétés d'Agents

⁸voir <http://www.enib.fr/~harrouet>.

Nous avons testé l'algorithme pour différents cas reflétant des *niveaux* de difficultés particuliers. En fait, la définition de la complexité d'un tel problème n'est pas triviale. Elle dépend certes du nombre de variables (cours à faire, nombre de professeurs ...), mais essentiellement du rapport entre la taille de l'espace de recherche et le nombre de solutions acceptables dans cet espace. En d'autres termes, le nombre de cours ou le nombre d'élèves accroissent la difficulté du problème, mais le nombre de professeurs la décroît et surtout leur disponibilité commune (créneaux horaires disponibles commun à chaque professeurs) l'accroît. De même, si la résolution du problème implique que tous les créneaux disponibles de tous les professeurs sont pris, le problème est plus difficile que s'ils leur restent un nombre de créneaux disponibles à la fin de la résolution.

La figure 3.3 montre l'évolution des charges cognitives de trois agents professeurs à la fin de la résolution d'un de ces problèmes : placement de 80 cours, concernant 3 groupes d'élèves et 3 professeurs. Les temps indiqués en abscisses sont des temps logiques (nombre de cycle de vie de chaque agent), sur un ordinateur de performance moyenne, cette résolution prend entre 30 secondes et 2 minutes. On peut observer le phénomène de hiérarchisation des gèneurs qui provoque des *colères en cascade* : à partir de l'instant 1000 l'agent A1 *pique* des colères a priori sans effet (les créneaux horaires dont il dispose sont apparemment systématiquement rejetés) et les agents A2 et A3 n'ont pas leurs *charges cognitives* qui décroissent significativement. L'agent A2 entre alors en colère au temps 1250 (si l'on utilise la métaphore, il remet en question ses engagements car il perçoit que les colères de l'agent A1 sont inutiles). Un phénomène similaire a lieu pour l'agent A3 relativement à A1 et A2 au temps 1570. Enfin, vers le temps 2000, toutes les *charges cognitives* diminuent : le problème est résolu (un emploi du temps est trouvé pour tous les agents professeurs et élèves). L'algorithme ne s'arrête pas pour autant et permet l'introduction dynamique d'autres contraintes (nouveaux cours à faire, nouveaux élèves ...) qui ne remettront en cause la solution trouvée que partiellement et si nécessaire.

Nous avons comparé notre algorithme à l'algorithme *Asynchronous Weak Commitment*⁹[162]. Cette comparaison montre des performances comparables en moyenne et meilleures pour certains problèmes difficiles. Nous expliquons ce résultat par le fait que l'AWC est un algorithme de recherche systématique, optimisé à l'aide de critères purement quantitatifs n'apportant aucune sémantique particulière aux contraintes et aux agents du problème. Cette expérience montre la pertinence de la métaphore utilisée. Les principaux avantages de notre approche sont plus particulièrement liés à la modélisation naturelle du problème et appropriée à une résolution dynamique. Au contraire, dans une approche de type AWC, la recherche des variables et des contraintes est une étape complexe : le problème est d'abord vu globalement avant d'être distribué, ce qui implique qu'une modification dynamique nécessite souvent une redéfinition du problème global. Cependant, la notion de difficulté n'est pas la même pour chacun des algorithmes. Par exemple, dans le cas d'un problème où l'on préserve une part de créneaux de travail non commune à tous les professeurs, que l'on augmente le nombre de cours, d'élèves et de professeurs, l'AWC augmente le nombre de variables et de messages échangés et ses performances s'écroulent. Par contre, si c'est le nombre de créneaux horaires disponibles communs aux professeurs qui augmente pour un problème

⁹désormais noté AWC.

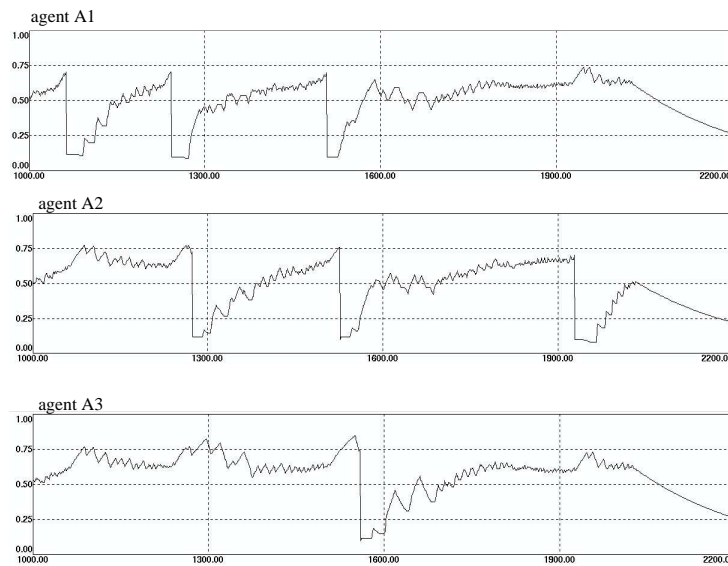


FIG. 3.3 – Visualisation du phénomène de “colères en cascades”

donné, l’incomplétude de l’algorithme des agents stressés induit un ralentissement de la recherche.

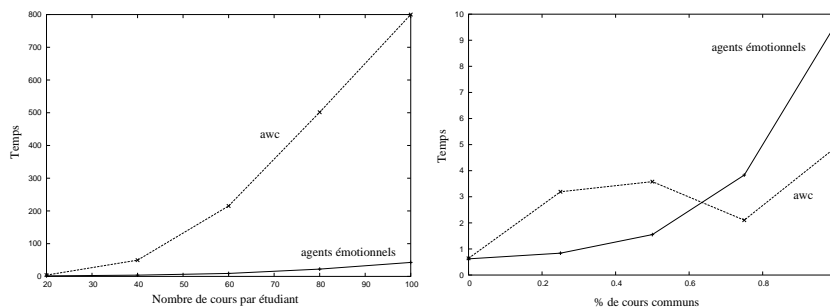


FIG. 3.4 – Comparaison de performances entre l’AWC et les Agents stressés

3.5 Conclusion

Nous venons de présenter une métaphore pour l’autonomisation d’agents impliqués dans une résolution collaborative de problèmes. L’objectif n’était pas tant lié aux performances en tant que telles qu’aux notions d’ouverture, de compréhension et de substitution. Concernant l’ouverture, la résolution n’étant pas basée sur une recherche systématique et étant *agentifiée*, rien n’empêche la modification *en-ligne* du problème, que ce soit en terme de contraintes ou de participants à cette résolution. Pour ce qui est de la compréhension, la métaphore émotionnelle permet d’exhiber de façon condensée les difficultés liées à la résolution. Par exemple l’observation des charges cognitives permet de détecter les points bloquants : un agent fort stressé, entrant régulièrement en colère, gêne la résolution et c’est sur lui qu’il faut agir. A l’inverse, celui qui possède une

charge cognitive faible possède sans doute des marges de manœuvre sur ses contraintes. L'altruisme fait ensuite le reste du travail et la notion de colère permet de détecter les inter-blocages plus ou moins profonds. La substitution est également facilitée : rien n'empêche un utilisateur de prendre le contrôle de l'agent le représentant pour faire ses propres propositions et envoyer ses propres requêtes. Si le calcul de la charge cognitive continue durant la substitution, l'agent pourra reprendre la main dans un contexte connu à tout moment.

Dans ce travail, l'autonomie est moins mise en avant : en effet, malgré le fait que nos agents soient pro-actifs et gèrent des buts, leurs décisions ne sont que des propositions ou des affectations de valeurs et font peu référence à la notion d'action même si elles ont un impact sur *l'avenir* du problème et donc les futures perceptions des agents. Nous avons par ailleurs étendu ce travail, dans le cadre du DEA de QUENTIN RICHEL, aux agents situés [137]. Malgré des premiers résultats encourageants, le travail n'a pas été assez poussé pour faire l'objet d'un développement ici. Pour améliorer la vitesse de convergence, un algorithme d'apprentissage artificiel a été implémenté et a fait l'objet de l'encadrement du DEA de CYRIL SEPTSEAULT [145] qui a utilisé les systèmes de classeurs que nous aborderons au chapitre prochain.

Comme nous le mentionnons en introduction, ces travaux ont été initiés par ma participation au groupe ASA du GDR I3 et sont inclus dans le document de synthèse du groupe [44]¹⁰ qui présente de nombreuses autres propositions de résolution distribuée d'emploi du temps. Ils ont également été publiés et présentés dans [46] et [45]. Ils sont à l'origine du logiciel de calcul des emplois du temps de l'Enib¹¹ et de la création d'une start-up sur cette problématique.

¹⁰Rapport disponible sur http://www.lifl.fr/~mathieu/rapport_edt.pdf.

¹¹Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest.

Un apprentissage : le tuteur adaptatif

Résumé

Ce chapitre présente la réalisation d'un tuteur intelligent pour un environnement virtuel de formation. Après une description globale de l'approche et des travaux menés dans ce domaine (section 4.1), nous proposons un rappel sur les systèmes de classeurs en section 4.1.3, qui constituent la base du comportement adaptatif du tuteur intelligent. La section 4.2 explicite l'architecture et son fonctionnement, avant une présentation de la réalisation finale en section 4.3

4.1 Apprentissage en environnement virtuel de formation

Dans le cadre de la thèse de CÉDRIC BUCHE, nous nous sommes intéressés à l'autonomisation d'un tuteur intelligent pour les environnements virtuels de formation (ou EVF¹). Ces environnements constituent une thématique importante de l'équipe SPI [129, 130]. La réalité virtuelle implique activement l'élève (l'apprenant) par le biais de multiples interactions. Ces environnements s'inscrivent donc dans le courant psychologique du constructivisme qui place l'activité au cœur des mécanismes de l'apprentissage [269]. Historiquement, ils résultent d'une association entre la réalité virtuelle et les travaux sur les **Environnements Informatiques** (ou interactifs) pour l'**Apprentissage Humain** (ou EIAH².) [175, 299]. Ils permettent d'accéder à un apprentissage de compétences associant savoir et savoir-faire. Dans le domaine des EIAH, est apparue la notion de tuteur intelligent (ou ITS³) [167]. L'ITS propose des exercices, modifie ceux-ci en fonction des progrès de l'apprenant, pose des questions à celui-ci et peut faire un bilan à l'attention du formateur. La figure 4.1 résume la notion d'EVF : un environnement virtuel associé à un ITS.

Le travail présenté dans ce chapitre consiste à doter l'EVF développé dans le cadre du projet MASCARET d'un ITS générique et adaptatif. Les premières versions de cet EVF ont été développées durant la thèse de RONAN QUERREC [130]. Elles portaient sur l'apprentissage de la prise de décision chez les sapeurs-pompiers. L'EVF est donc dédié

¹VET en anglais pour **V**irtual **E**nvironment for **T**raining.

²Eux-mêmes issus des travaux en EAO, l'Enseignement Assisté par Ordinateur.

³pour Intelligent Tutoring System.

à l'apprentissage d'un travail procédural et collaboratif. Un des objectifs de l'équipe est de le rendre générique pour qu'il puisse facilement s'appliquer à d'autres domaines d'apprentissage. Un autre objectif est de lui permettre de traiter de l'apprentissage non procédural [8, 7].

Un ITS est un système d'intelligence artificielle complexe, devant manipuler à la fois des connaissances sur le domaine enseigné, les compétences de l'apprenant, des aspects didactiques et pédagogiques tout en générant des interactions avec l'apprenant. Les apports pédagogiques de tels systèmes sont présentés dans [19]. La possibilité même de sa construction et surtout de sa généricité est sujette à débat chez les didacticiens, qui imaginent mal des principes généraux d'apprentissage, transférables d'un domaine à un autre. Cependant, même si certains environnements virtuels de formation n'en possèdent pas [245], de nombreux autres sont réputés pour l'assistance pédagogique apportée par des ITS plus ou moins complexes [279], [107, 130].

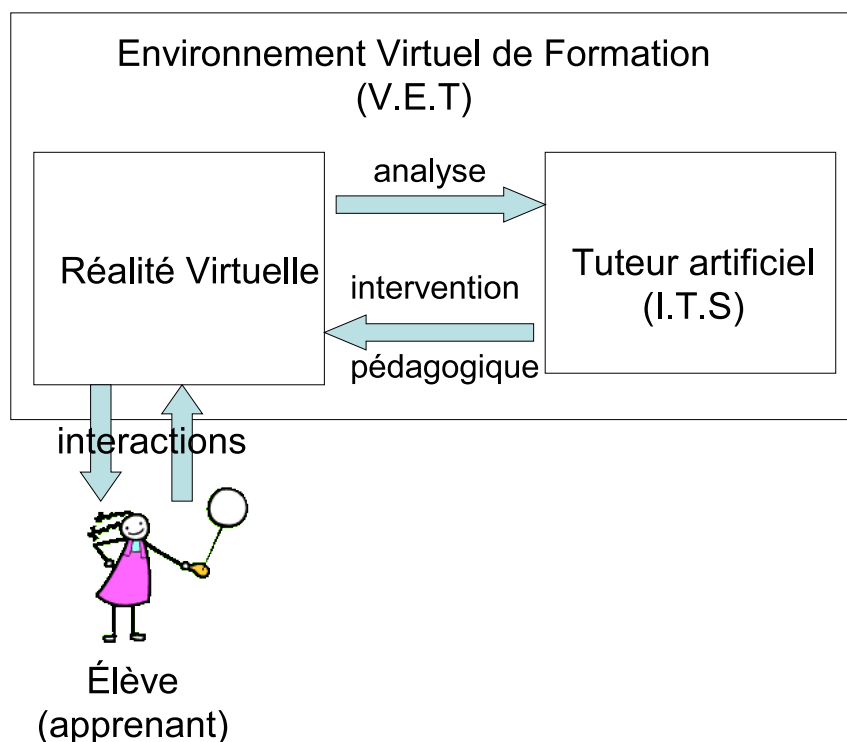


FIG. 4.1 – Les environnements virtuels de formation.

Afin de pallier aux difficultés de la construction d'un ITS générique, nous proposons une *co-construction* de celui-ci par le couple formateur-apprenant à l'aide d'un apprentissage artificiel. La figure 4.2 résume ce principe : l'ITS observe l'apprenant et utilise de nombreux modèles (voir section 4.1.2.A) pour faire des propositions pédagogiques. Ces propositions sont validées ou corrigées par le formateur et un algorithme d'apprentissage modifie le modèle pédagogique qui est le cœur de l'ITS.

4.1.1 Aspects participatifs

Les environnements virtuels sont des exemples typiques de simulation participative. Celui que nous proposons l'est d'avantage puisque le formateur y est *cré-acteur*. Les notions d'ouverture de compréhension et de substitution proposées en section 1.1 concernent à la fois l'apprenant et le formateur.

- **Ouverture** : Pour l'apprenant, l'ouverture d'un VET résulte dans la possibilité de laisser celui-ci faire des erreurs. Un VET idéal devrait être capable de suivre ce que fait l'apprenant et le laisser aller le plus loin possible en cas d'erreur pour, par exemple, lui faire prendre conscience des conséquences de celle-ci. Toutefois, il devrait être capable de récupérer ou signaler l'erreur à temps pour permettre à l'apprenant de la corriger avant qu'elle ne soit rédhibitoire. Il est clair que ce cas idéal est loin d'être atteint. Pour le formateur l'ouverture consiste à lui permettre de créer et de modifier ses exercices, voir d'intervenir sur ceux-ci pendant leur exécution, sans que cela ne perturbe l'ITS qui travaille et s'adapte en parallèle. Là encore, cette problématique reste un défi qui laisse une large place à des travaux futurs.
- **Compréhension** : Pour l'apprenant, la réalité virtuelle lui permet, encore une fois, de *voir ce qu'il fait*, l'assistance pédagogique peut lui simplifier cette perception, en mettant certains objets en surbrillance ou en dégradant certaines scènes. Il s'agit alors de virtualité augmentée.
- **Substitution** : La substitution est un outil pédagogique intéressant. Il permet à l'apprenant de *voir ce qu'il doit faire*, de laisser faire certaines tâches, qu'il maîtrise mal, par son avatar, pour reprendre ensuite le contrôle et poursuivre l'exercice. Pour le formateur, la substitution est également une aide : Il peut déléguer la prise en charge d'intervention pédagogique à son avatar pour les apprenants qu'il considère moins en difficulté et pour lequel l'avatar n'aura pas de grandes difficultés à mener à bien une assistance. A cet égard, il faut préciser que la notion d'avatar du formateur n'est pas nécessairement en conformité avec celle d'avatar en général. Il peut s'agir du rôle joué par celui-ci tout comme d'une représentation explicite de celui-ci, auquel cas on parlera d'agent pédagogique situé, pouvant aider ou perturber un apprenant.

4.1.2 Aspect adaptatif

Nous voulons doter l'ITS d'un apprentissage artificiel qui permette une adaptation de ses propositions en fonction des choix, des habitudes, ou de la relation qu'entretient le formateur à l'apprenant. Or, comme nous le mentionnions au chapitre 1, un apprentissage artificiel repose sur des abstractions et une métaphore. Dans notre cas, les abstractions doivent également permettre de proposer des assistances pédagogiques de façon automatique. Elles sont donc imposées par des considérations pédagogiques et synthétisées par la notion de *situation pédagogique*, générée par les différents modèles associés à l'ITS (voir figure 4.2)⁴.

⁴Dans ce contexte, l'ITS peut être vu comme un agent autonome, sa crédibilité comportementale étant liée à des critères pédagogiques et les abstractions résultantes sont la situation pédagogique.

A Modèles de l'ITS

Les modèles générant la situation pédagogique sont les suivants :

- **Le modèle du domaine** renseigne l'ITS sur les règles du domaine d'application qui conditionnent la réussite des exercices. Par exemple, si le domaine d'application est le sauvetage d'accidentés de la route, une règle possible consiste à ne pas déplacer un blessé et de mettre en place une signalisation pour le mettre en sécurité. Des règles d'ordre organisationnelle et de description de procédures sont largement exploitées dans MASCARET. Ces règles se répartissent entre des règles métiers, spécifiques à un domaine ou un exercice et des règles générales, réutilisables d'un domaine à l'autre ou d'un exercice à l'autre.
- **Le modèle des erreurs** répertorie les erreurs possibles et fournit des indications des causes de ces erreurs. Par exemple une erreur de procédure typique consiste à inverser l'enchaînement de deux actions. Le modèle détecte ce type d'erreur. Dans le cas présent, un exemple d'indice contribuant à la prise de conscience de l'erreur est la connaissance des conséquences attendues de l'action omise nécessaires à certaines actions futures de la procédure. Si cette conséquence concerne certains éléments de la scène, ceux-ci peuvent alors être mis en surbrillance pour attirer l'attention de l'élève. Dans l'exemple du sauvetage d'accidentés de la route, si la pose du triangle de signalisation est omise, la zone de sécurité, nécessaire à la suite des interventions n'est pas mise en place. La prise de conscience de l'erreur sera favorisée par la mise en évidence de cette zone ou du triangle.
- **Le modèle de l'interface** donne des indications sur ce que fait l'apprenant et offre en retour les moyens de mettre en œuvre les aides pédagogiques. Dans l'exemple précédent, même si le modèle de l'erreur indique qu'il faut mettre un triangle de signalisation en place, seul le modèle de l'interface sait où se trouve ce triangle et comment le mettre en surbrillance. Le modèle de l'interface peut également renseigner l'ITS sur les éléments qui sont dans le champ de vision de l'apprenant, afin de mieux choisir les aides pédagogiques contextuelles.
- **Le modèle de l'apprenant** répertorie le cursus de celui-ci, les compétences acquises ainsi que les types d'exercices manqués et réussis. Il est fondamental pour mettre en place une pédagogie différenciée adaptée à chaque apprenant.

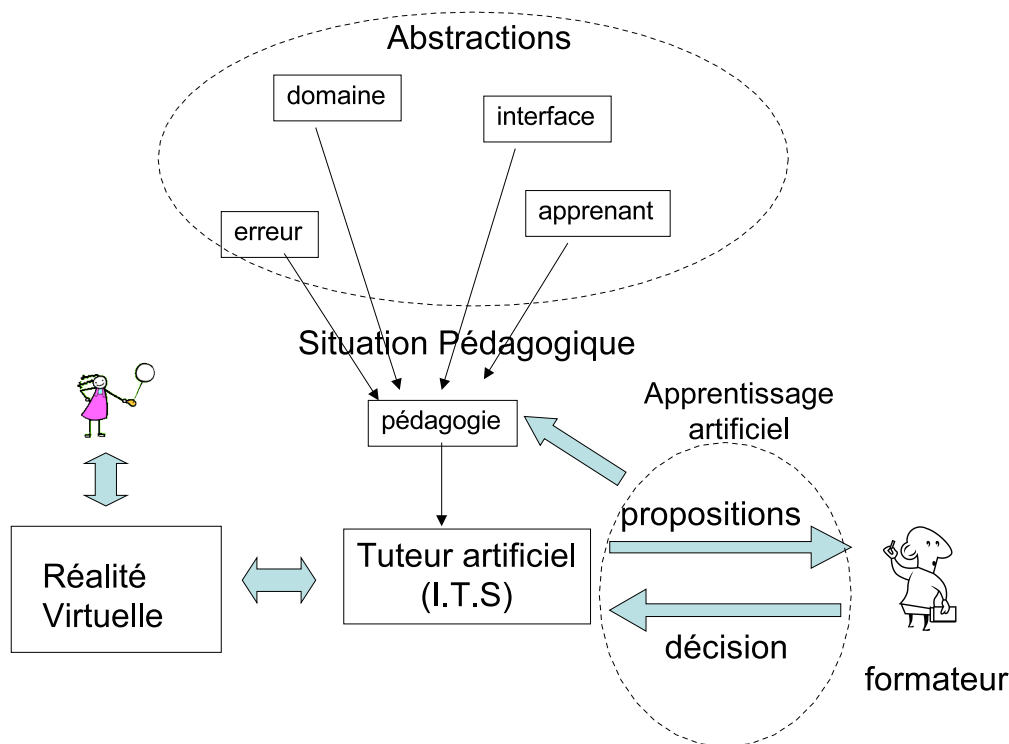


FIG. 4.2 – Système tutoriel intelligent.

B Environnement informé

L'obtention de ces abstractions a nécessité un travail important de réification des connaissances de l'environnement. L'équipe SPI développe pour cela le modèle VEHA (pour **V**irtual **E**nvironnement supporting **H**uman **A**ctivity) qui définit les composantes des entités dans un monde virtuel et précise comment on peut leur donner un comportement⁵. Ce modèle s'inspire du méta-modèle UML [286]. Il permet par exemple, de renseigner l'ITS sur ce que peut faire un agent de la scène, ou sur quel type d'objet il peut interagir. Il permet également de préciser et de connaître les conditions et les conséquences des actions des agents. Par exemple, l'action "réanimation" possède une condition d'exécution qui est "posséder un masque à oxygène" elle-même associée à une entité de la classe "masque à oxygène". Ainsi, si un apprenant se dirige vers un blessé et veut exécuter cette action, sans posséder le masque, l'ITS et les modèles associés permettront de mettre en évidence les objets de type "masque à oxygène", visibles par l'apprenant. La réification de ces informations permet alors d'adapter très rapidement l'ITS à tout autre environnement et domaine décrits à l'aide de VEHA. Un méta-modèle organisationnel a également été développé et permet de connaître le rôle d'un agent au sein d'une équipe. Il permet également de décrire une procédure à l'aide de diagrammes d'activités. Une procédure étant ici un enchaînement dans le temps d'actions effectuées par des rôles précis sur des objets de l'environnement virtuel. Ces méta-modèles sont exploités par l'ITS, en particulier au travers des modèles du

⁵Bien que concerné par ces développements, ma participation n'y est pas prépondérante, c'est la raison pour laquelle je préfère renvoyer le lecteur intéressé aux travaux de PIERRE CHEVALLIER et RONAN QUERREC et à [273].

domaine et de celui des erreurs.

C Choix des systèmes de classeurs

L'apprentissage artificiel est une discipline riche et variée : elle développe des algorithmes basés sur de nombreux principes tels que l'optimisation numérique, les inductions logiques, probabilistes ou floues, l'usage de métaphores cognitivistes, connexionnistes, comportementalistes ou évolutionnistes [114, 38]. Cependant, si l'on scinde schématiquement les algorithmes d'apprentissage selon deux axes : *procédure d'apprentissage* (supervisée, non supervisée ou par renforcement) et *modèle des informations portant l'apprentissage* (symboles, équations, nombres, règles, etc ...), le choix des systèmes de classeurs se révèle très pertinent comme modèle adaptatif de sélection d'intervention pédagogique. En effet, la *situation pédagogique* est un ensemble de valeurs symboliques fournit par les modèles résumés précédemment et synthétisant l'état de l'exercice et l'histoire de l'apprenant. Une intervention pédagogique consiste alors en une action (ou non action) à effectuer dans l'environnement virtuel à partir de cette situation. La façon la plus simple d'exprimer le lien entre les deux est l'usage de règles logiques. Mais surtout, l'apprentissage n'est pas supervisé, les choix du formateur sont fournis à l'ITS au fur et à mesure de l'avancée de l'exercice. L'apprentissage est *en ligne* et s'effectue grâce à une information du type "Le formateur a choisi (ou n'a pas choisi) l'intervention proposée". Ceci suggère un apprentissage par renforcement, technique dédiée à l'apprentissage d'interactions non supervisé. Les systèmes de classeurs sont justement adaptés à l'apprentissage de règles par renforcement.

4.1.3 Les systèmes de classeurs

Les systèmes de classeurs ont été proposés par J. H. HOLLAND [225] pour apprendre en ligne (ou par expérimentation) l'association de conditions et d'actions. Utilisés pour de nombreux domaines tels que la classification ou l'économie, ils s'avèrent très bien adaptés à l'autonomisation d'entités artificielles dans les environnements virtuels [141, 140, 138], [212].

La structure des systèmes de classeurs s'articule autour d'une association d'algorithmes générateurs et adaptationnistes (souvent des algorithmes génétiques [222] mais également des heuristiques [72]), et d'apprentissage par renforcement [149]. Ceci permet de limiter le nombre d'associations condition-action grâce à un mécanisme de généralisation en localisant les plus pertinentes et en modifiant celles-ci perpétuellement, au gré des expériences. Le principe général des systèmes de classeurs est illustré figure 4.3.

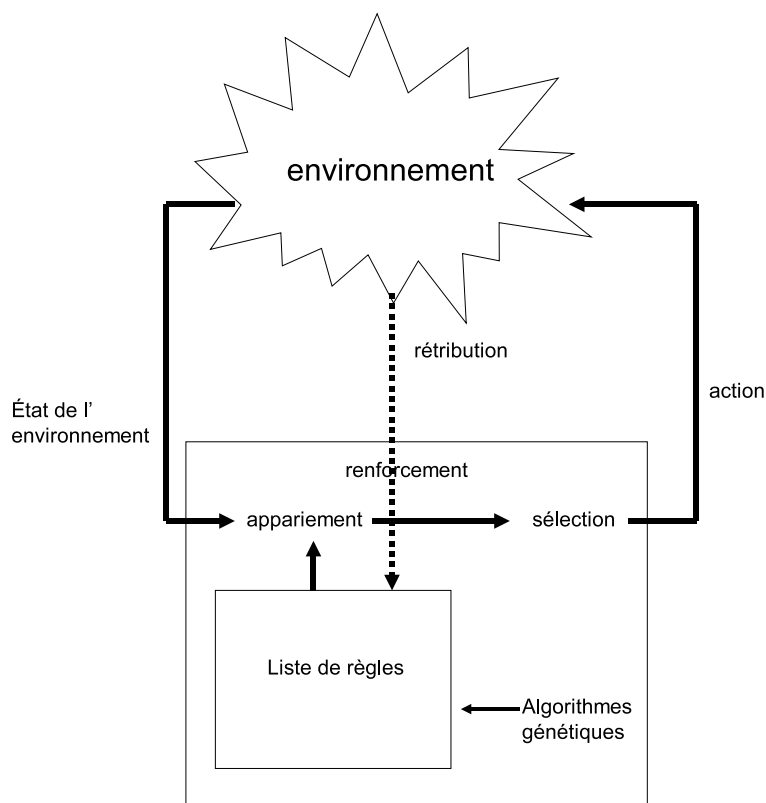


FIG. 4.3 – Principe des systèmes de classeurs.

Les classeurs sont les règles, stockées dans une liste. Deux entrées fournissent respectivement l'état de l'environnement (une abstraction) et une rétribution éventuelle, fournie en cas de succès du système (principe du renforcement). Un mécanisme d'appariement permet de sélectionner les règles compatibles avec l'état de l'environnement. Le choix d'une règle est ensuite effectué par le biais d'une force associée à chacune d'elle. Cette force est mise à jour par le biais des rétributions de l'environnement. Le principe de cette mise à jour consiste à augmenter la force des règles qui ont contribué à obtenir une rétribution et à diminuer la force des autres. Pour cela, l'algorithme le plus usité est le "*Bucket Brigade*" [223, 224], basé sur une métaphore économique et dont l'équivalence avec le *Q-learning* de l'apprentissage par renforcement a été montré dans [200]. Parallèlement, l'algorithme évolutionniste a pour rôle d'éliminer les *mauvaises* règles et de procéder à des mutations et croisements des meilleures règles pour améliorer le nombre de rétributions. Les règles sont souvent généralisantes, c'est à dire qu'elles ne testent pas toutes les entrées de l'environnement. Dans la plupart des implémentations, elles sont codées à l'aide de 0 de 1 et de # (valeur indifférente) pour s'adapter facilement à la mise en place des algorithmes génétiques.

Il existe de nombreuses variantes des systèmes de classeur liées à leur nature pragmatique et aux applications au sein desquelles ils sont utilisés. Nous renvoyons le lecteur intéressé à la synthèse que nous avons proposée dans [26] et ne passons en revue ici que les versions les plus caractéristiques. Ainsi, la version initiale (CS1⁶) possède une file

⁶Cognitive System Level 1.

de règles dont le chaînage génère une action. Cet aspect, cohérent avec des notions de psychologie cognitive (mémoire à court terme), est source de difficulté et a été supprimé dans les ZCS⁷ [307]. La possibilité de mémoire intermédiaire entre la perception et l'action est alors rendue par le biais d'informations supplémentaires dans les règles et les conditions (c'est le ZCSM [193]). Ces deux types de système se distinguent également par la façon d'appliquer les algorithmes génétiques⁸. Une autre variation concerne la gestion de la force des règles. Elle distingue le ZCS des XCS [160]. Cette fois il s'agit de préserver les règles peu souvent sélectionnées mais cependant importantes car adaptées à des états de l'environnement qui ne surviennent que rarement. La force d'une règle est alors proportionnelle non pas aux rétributions qu'elle a permis d'obtenir, mais à la précision de la prévision de cette rétribution. Il existe également des systèmes de classeurs anticipatifs, qui apprennent de façon latente, sans attendre les rétributions, en générant un modèle possible de l'environnement [297], [72].

Cependant, l'aspect le plus intéressant dans le cadre de nos travaux, est l'introduction d'aspects sémantiques et hiérarchiques [176]. En effet, malgré les différents succès rencontrés, l'usage montre que le choix des entrées/sorties et l'abstraction de celles-ci sont fondamentaux pour améliorer les performances⁹. Ainsi, ALECSYS¹⁰ [49] est une structure hiérarchique dans laquelle un système de classeurs joue le rôle d'arbitre dans le choix de l'activation d'autres systèmes de classeurs. Le MHICS¹¹ [281] est une architecture qui assemble des modules distribués sur plusieurs niveaux. Le premier niveau contrôle les motivations de l'entité (agressivité, faim ...). Il permet d'activer des règles du niveau inférieur qui vont apprendre des actions plus réactives (déplacement de cible, tir, ...etc).

Notre proposition est inspirée de ce type d'approche.

4.2 Tuteur adaptatif

Le tuteur adaptatif que nous avons développé repose sur un système de classeurs hiérarchique apportant une sémantique relative à des critères pédagogiques. Il possède également la particularité de ne pas contenir d'algorithmes génétiques car l'apprentissage ne concerne que les poids des règles et non les règles elles-mêmes. En effet, nous sommes confrontés à un problème de vitesse d'apprentissage et d'apport sémantique si important que la génération aléatoire de règles semble rédhitoire¹². En l'occurrence, le formateur, spécialiste du domaine d'apprentissage, est apte à définir, modifier ou enrichir les règles de façon pertinente. Un pédagogue sera nécessaire pour établir la structure d'accueil de ces règles qui correspond à celle de notre système de classeurs. Concrètement, elle a été élaborée avec la collaboration des psychologues de l'équipe

⁷Zeroth level Classifier System.

⁸La méthode MICHIGAN applique l'algorithme génétique sur l'ensemble des classeurs d'un coup alors que la méthode PITTSBURG regroupe les règles en ensembles sur lesquels sont appliqués des algorithmes génétiques distincts.

⁹A titre anecdotique, nous avons testé les systèmes de classeurs pour optimiser l'algorithme des agents stressés (chapitre 3) avec de nombreuses difficultés malgré un travail conséquent [145].

¹⁰A LEarning Classifier SYStem.

¹¹Modular HIerarchical Classifier Systems.

¹²Les algorithmes génétiques ont également été abandonné par de nombreux types de systèmes de classeurs tels que les systèmes de classeurs par anticipation [72].

ASAP¹³.

4.2.1 Structure du système de classeurs

Le système de classeurs que nous avons proposé repose sur une structure hiérarchique verticale en trois *niveaux de décision pédagogique* et un regroupement horizontale de règles en ensembles d'*orientation pédagogiques* (voir la figure 4.4).

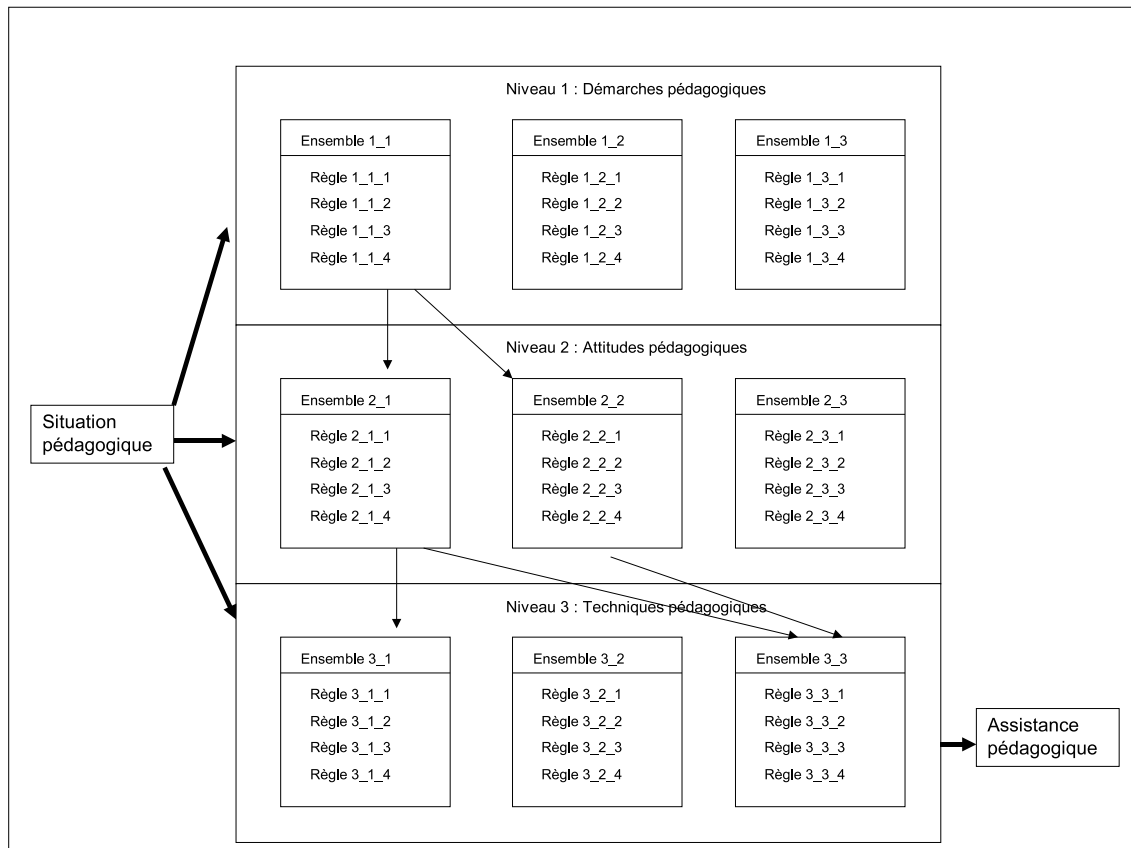


FIG. 4.4 – Structure du tuteur adaptatif.

A Hiérarchie

La hiérarchie des règles s'appuie sur la proposition de [107] et [186] que nous interprétons librement comme une distinction entre *démarches*, *attitudes* et *techniques* pédagogiques.

- Les démarches sont des postures pédagogiques générales valorisées différemment par les enseignants selon des critères personnels et en fonction de l'apprenant. Des exemples sont fournis dans le tableau 4.1.
- Les attitudes permettent de raffiner les postures générales sans proposer la réalisation concrète d'une intervention pédagogique. Leur appréhension est facilitée par les exemples du tableau 4.2

¹³Apprentissages Stratégies Attitudes Performances, équipe du LISYC.

Démarches pédagogiques	Description
Active / Constructiviste	Les démarches actives sont centrées sur l'apprenant, considérant qu'il est acteur principal de son apprentissage. Elles lui proposent des techniques à travers desquelles il est amené à produire, à créer, à chercher. Le savoir est dans l'environnement.
Expositive / Affirmative	C'est la démarche la plus traditionnelle qui utilise la technique de l'exposé. Elle repose sur une démarche de transmission de contenus. Le savoir est externe.
Interrogative	Elle préconise de diriger l'apprenant vers les solutions recherchées. L'apprenant peut avoir l'impression de découvrir quelque chose, mais c'est toujours le formateur qui conduit la réflexion. Le savoir est interne.

TAB. 4.1 – Exemples de définition des ensembles pour le niveau d'abstraction “Démarches pédagogiques”, en se basant sur [107] et [186].

Attitudes pédagogiques	Description
Réaliser	Réaliser à la place des formés. Cette stratégie permet au formateur de montrer, par exemple, le bon geste ou la bonne technique.
Perturber	Certains formateurs <i>taquins</i> perturbent les élèves, en donnant de mauvaises informations ou des solutions potentiellement fausses, afin de tester la confiance des formés dans leur raisonnement.
Suggérer	Montrer où les élèves peuvent trouver les connaissances théoriques ou bien, où trouver les connaissances sur le terrain. Ces attitudes permettent au formateur de montrer aux élèves qu'ils peuvent trouver les connaissances par eux-mêmes, et donc, traiter la situation calmement.
Expliquer	Les explications et les informations ont aussi pour but de permettre tout simplement, d'expliquer le fonctionnement de certains appareils, les règles de raisonnement, les règles de sécurité, etc.
Encourager	Féliciter les élèves lorsqu'ils réalisent correctement la tâche et les rassurer lorsqu'ils échouent.
Laisser faire	Elle propose au formateur de ne pas intervenir, mais plutôt de rester en tâche de fond, en tant qu'observateur.

TAB. 4.2 – Exemples de définition des ensembles pour le niveau d'abstraction “Attitudes pédagogiques”, en se basant sur [107].

- Les techniques pédagogiques sont des interventions concrètes manipulant les objets de l’environnement virtuel et mettant en place la virtualité augmentée. Le tableau 4.3 illustre de telles techniques.

Techniques pédagogiques	Description
Enrichissement	Ajout de symboles visuels, sonores ou de films d’animation.
Dégradation	Détérioration du réalisme (repères effacés, <i>feed-back</i> proprioceptifs dégradés, couleurs atténuées, flous à l’arrière-plan et/ou sur les côtés, réduction d’objets, icônisation, etc.).
Rehaussement	Exagération de la réalité (représentation d’objets à plus grande échelle, objets surréalistes, plus lumineux, plus brillants, etc.).
Simplification	Allègement de la scène virtuelle (une foule peut être représentée par des personnes aux mouvements simplifiés, objets simplifiés, systèmes kinesthésiques simplifiés, représentation en fil de fer, etc.), représentation schématique de certains appareils.
Restriction	Limitation de certains déplacements ou manipulations (limitations du périmètre dans lequel l’utilisateur peut se déplacer, etc.)
Animation	Séquence animée (positionnement automatique, clef qui tourne automatiquement une fois mise en place, etc.).
Décentrage	Changement du point de vue habituellement attaché à l’œil du formé immergé (vue de derrière, au-dessus, etc.).
Modification	Modification d’aspect, de texture (changement de couleurs, clignotement d’objets, etc.).
Modélisation	Représentation de concepts abstraits, de phénomènes physiques invisibles à l’œil nu, de type de pannes, etc.
Visualisation	Mécanismes cachés (intérieur d’un moteur, engrenages, etc.).

TAB. 4.3 – Exemples de définition des ensembles pour le niveau d’abstraction “Techniques pédagogiques”, en se basant sur [107].

B Ensembles

Les règles de chaque niveau hiérarchique sont regroupées en ensembles *d’orientation pédagogique* reflétant respectivement des démarches, attitudes et techniques différentes. Il faut garder à l’esprit que de nombreuses règles correspondent à un seul de ces éléments. Par exemple, une attitude pédagogique consistant à réaliser à la place de l’apprenant peut être souhaitable si l’apprenant est un débutant (information provenant du modèle de l’apprenant), mais également si les objets à manipuler ne sont pas visibles par celui-ci (information provenant du modèle de l’interface) ou qu’il a oublié de le faire (information provenant du modèle des erreurs). Par conséquent, plutôt que de considérer que ce sont les règles qui sont en compétition, il est plus judicieux de

mettre les ensembles de règles en compétition. Celle-ci est mise en place par le biais de poids associés aux ensembles. Il ne s’agit pas d’une architecture “gagnant prend tout”¹⁴ qui préserverait un ensemble par niveau hiérarchique mais d’une architecture à “libre flux”¹⁵, laissant active toutes les règles qui s’apparient avec la situation pédagogique, tout en leur donnant le poids de l’ensemble auquel elles appartiennent.

C Sélection d’assistance pédagogique

La figure 4.5 illustre l’usage du système de classeurs de l’ITS pour la sélection d’une technique pédagogique. Le poids initial des ensembles du niveau le plus élevé (démarches) est arbitrairement de 1. Chaque règle d’un niveau définit l’activation d’un ensemble du niveau inférieur. Si la condition d’une règle s’apparie avec la situation pédagogique, le poids de la règle est diffusé sur l’ensemble qu’elle active. Le poids de ce niveau est donc la somme des poids des règles qui l’activent (le poids d’une règle est celui de son ensemble). Une diffusion similaire des poids est faite de niveau en niveau. Au dernier niveau, les techniques pédagogiques sont en concurrence. Là encore, il faut garder à l’esprit qu’une technique pédagogique particulière peut être sollicitée par plusieurs règles d’ensembles différents (cas de **rendre transparent y** sur la figure 4.5). Chaque technique pédagogique se voit attribué un poids qui est la somme des poids des règles qui l’active. La comparaison de ces poids définit l’ordre des propositions de techniques pédagogiques qui sont faites au formateur.

¹⁴ou WTA pour Winner-Takes-All [300].

¹⁵ou FFH pour Free-Flow Hierarchy [285].

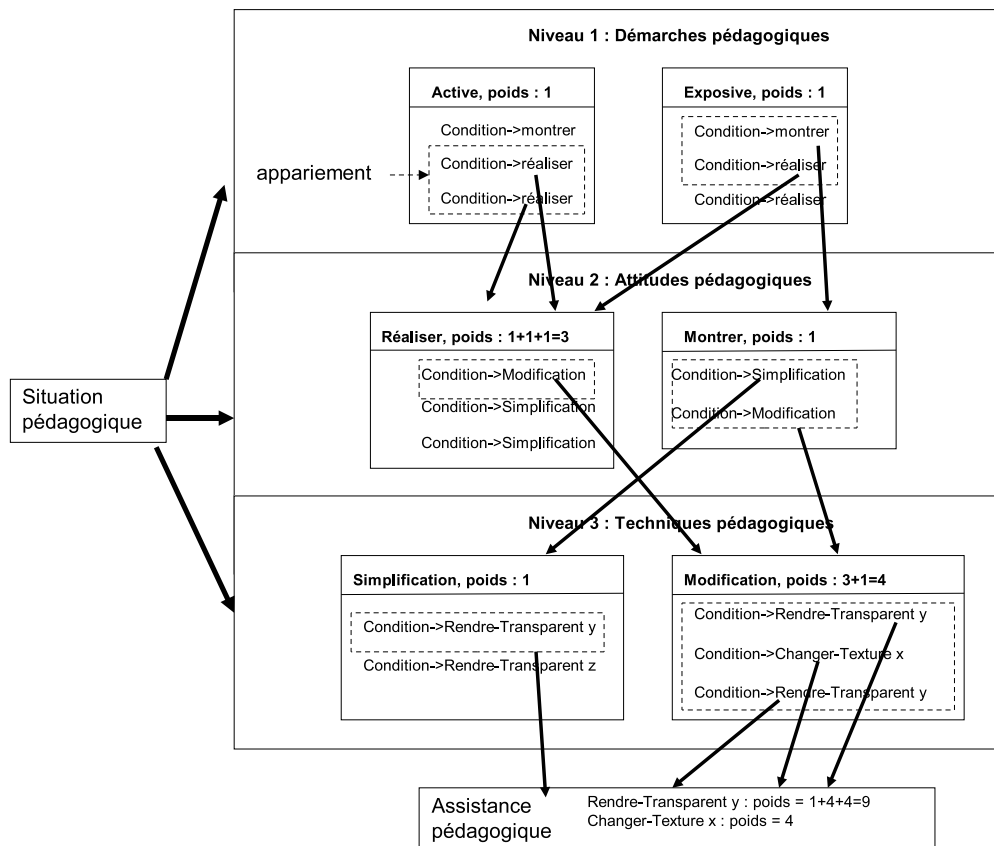


FIG. 4.5 – Principe de sélection d’une assistance pédagogique, sans apprentissage.

4.2.2 Apprentissage

L’apprentissage va permettre de raffiner les poids des règles pour s’adapter aux habitudes du formateur et imiter ainsi son expertise. Le poids d’une règle ne sera donc plus simplement celui de l’ensemble auquel elle appartient mais une combinaison d’un paramètre propre à cette règle et de la force de son ensemble.

Le paramètre propre à la règle reflète à la fois sa spécificité et son efficacité. La spécificité d’une règle est caractérisée par le nombre de tests effectués sur la *situation pédagogique* pour évaluer sa condition. En effet, une règle très générale du type “si l’apprenant est un débutant alors ...” sera plus souvent activable qu’une règle de type “si l’apprenant est un expert et que l’ambulance est loin et que le blessé est conscient alors ...”. Or, la deuxième règle étant plus précise, elle est certainement mieux adaptée à la *situation pédagogique* que la première tout en étant moins souvent activable. L’équation définissant la force de la règle compense ce déséquilibre.

L’algorithme d’apprentissage est inspiré du *Bucket Bridage* mentionné précédemment. Ce dernier distribue les rétributions aux règles qui ont permis de les obtenir. Il est initialement adapté aux systèmes de classeurs possédant une file de règles dont

l'enchaînement produit une action (CS1 par exemple). Dans notre cas, l'enchaînement correspond au passage entre les niveaux hiérarchiques. La rétribution est simplement reflétée par le choix du formateur : la technique pédagogique qu'il sélectionne définit les règles du niveau trois qui vont être rétribuées. Par chaînage arrière, les règles du niveaux 2 et 1 sont également rétribuées. Les règles qui s'apparient avec la *situation pédagogique* mais qui participent à l'activation d'une autre technique pédagogique que celle choisie par le formateur voient leur poids diminuer. L'algorithme effectue en fait un partage de la rétribution, incluant une taxe permettant de ne pas désavantager les règles rarement apparées et pénalisant plus fortement les règles fortes pour préserver l'adaptativité du système. La figure 4.6 illustre cette modification en reprenant le cas de la figure 4.5, sans donner de valeurs numériques car elles dépendent de la spécificité de chaque règle et que, par souci de synthèse, nous n'avons pas jugé utile de préciser ici. Le lecteur intéressé trouvera la formalisation complète de l'algorithme dans [22].

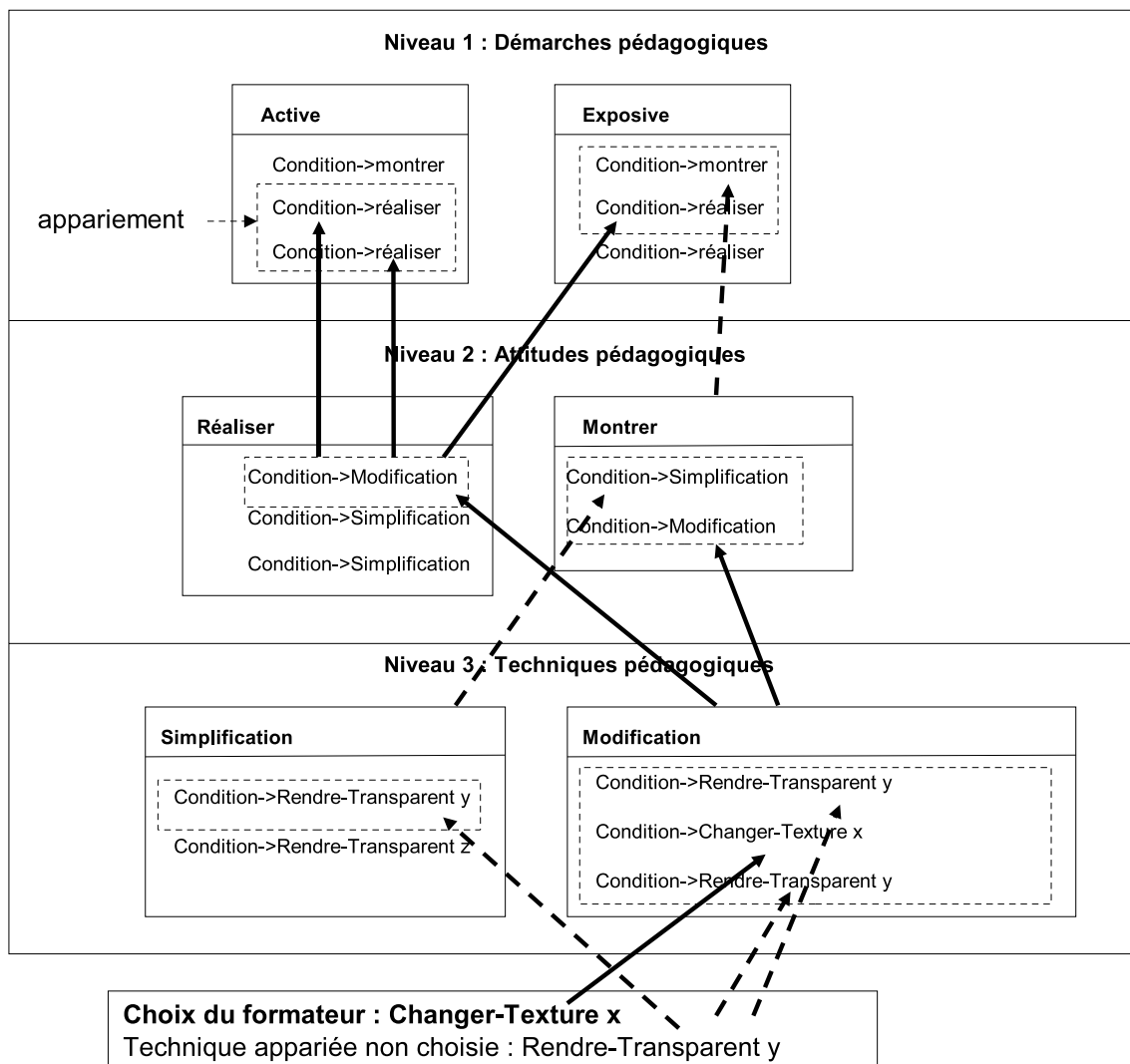


FIG. 4.6 – Apprentissage : chaque flèche continue pointe vers des règles dont le poids aura tendance à être augmenté, les flèches pointillées pointent vers les règles dont le poids aura tendance à être diminué.

4.3 Réalisation

L'ensemble de ce travail a été intégré au projet MASCARET dont le support est la plate-forme ARÉVI¹⁶. La construction de l'environnement virtuel et la spécification de son comportement sont facilités par le méta-modèle organisationnel de MASCARET et par VEHA (voir section 4.1.2.B). Concrètement, un modelleur UML intégrant ces méta-modèles permet facilement, par dérivation, de spécifier l'ensemble de l'organisation et de l'environnement qui seront, par le biais de fichiers XMI, transformés en ARÉVI. Rappelons que tous les éléments de VEHA et du modèle organisationnel sont réifiés et sont donc utilisables par l'ITS. Ce dernier est doté de nombreuses interfaces dont nous donnons deux exemples sur les figures 4.7 et 4.8 tirées de [22].

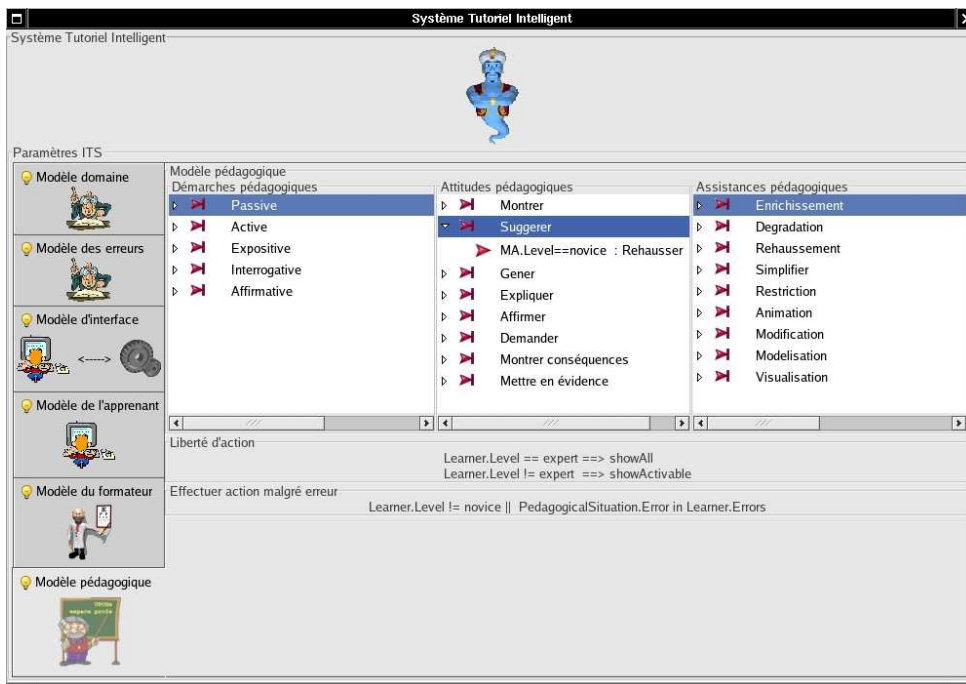


FIG. 4.7 – Interface du modèle pédagogique de l'ITS.

La généricité de l'ITS a été montré par l'application de celui-ci à deux gros exemples. Le premier relatif à la formation des sapeurs pompiers et le deuxième à l'apprentissage de manoeuvres d'appontage sur un porte-avions. Cette généricité peut être illustrée de la façon suivante : la description du modèle pédagogique de la figure 4.7 ne fait pas référence à un porte-avions ni à une équipe de pompier. C'est au niveau des instances de VEHA, portées par la *situation pédagogique*, issue des autres modèles (domaines, apprenant, erreurs, interface) que se trouvent les attributs correspondant aux modifications de l'environnement virtuel.

¹⁶voir section 2.3.4, page 27

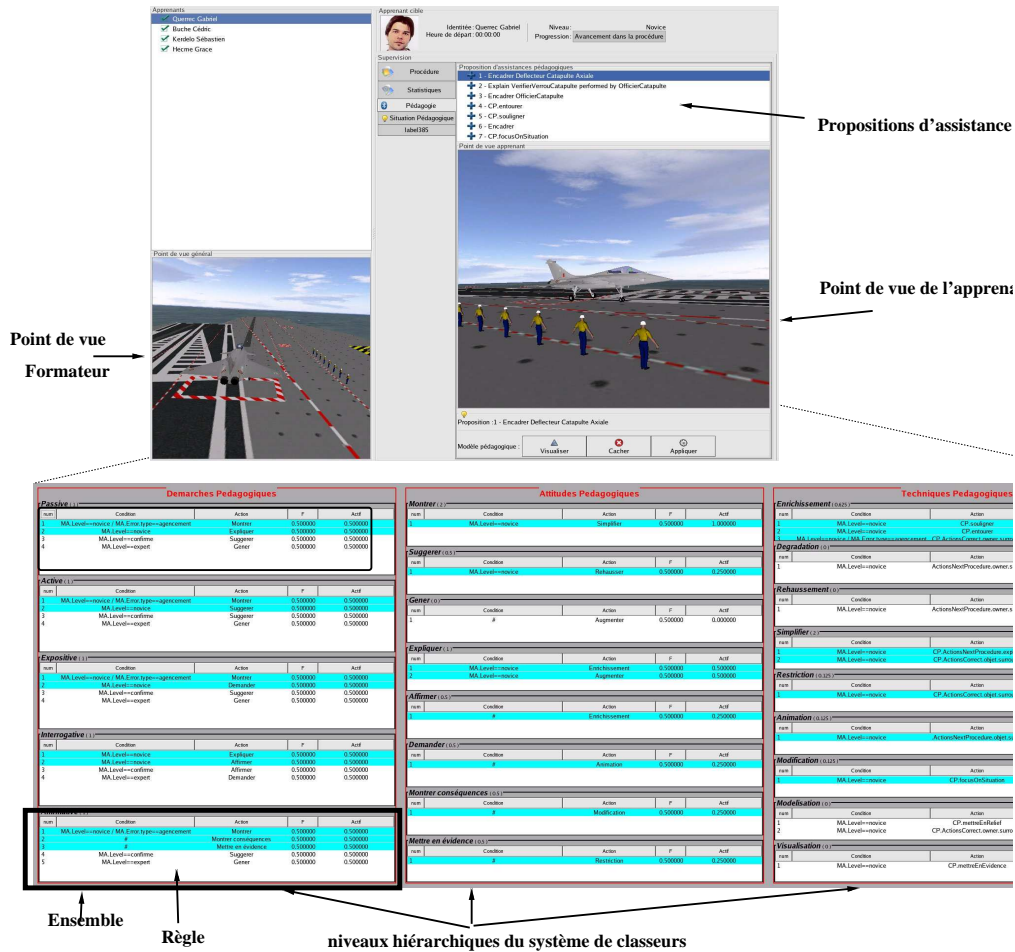


FIG. 4.8 – Suivi pédagogique grâce à l'EVF du projet MASCARET.

La figure 4.8 illustre à la fois certaines vues de l'environnement virtuel ainsi que le système de classeurs en action. Grâce aux fonctionnalités d'ARÉVI, l'application est distribuée, le formateur peut avoir une vue personnelle de la scène et une autre correspondant à celle de l'apprenant. Plusieurs apprenants peuvent suivre la formation en parallèle. Dans ce cas, il y a un système de classeurs dédié à chaque apprenant.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté un apprentissage pour l'autonomisation d'un modèle : un tuteur adaptatif. Plus que toutes les autres, la taille de cette application montre qu'il s'agit d'un travail d'équipe qui fait appel à de nombreuses compétences du laboratoire. En particulier, la recherche de généricité s'appuie sur des méthodes et outils de génie logiciel qui n'ont pas été détaillés ici car ma participation à ces aspects n'a pas été prépondérante. Initialement, mon intérêt se portait sur l'apprentissage d'agents pédagogiques compagnons d'un apprenant, capables de le gêner pour tester ses connaissances ou de l'aider en cas de difficulté. Il s'est avéré que l'étude des aspects pédagogiques et génériques ont largement dépassés (en travail et en temps) ce que j'imaginai. Cette expérience permet de montrer à nouveau la part prépondérante dans la définition du niveau d'abstraction pertinent pour une application donnée. L'élaboration

de la *situation pédagogique*, entrée du système de classeurs a été un travail conséquent. Il a été réalisé avec l'aide de nos collègues de l'équipe ASAP, spécialistes de l'apprentissage humain.

Nous avons tout de même réussi à obtenir un modèle autonome de tuteur adaptatif grâce à une approche d'apprentissage artificiel dont l'utilisation en réalité virtuelle et pour l'autonomisation des modèles en général se développe. Notre ITS permet en principe de s'adapter à un couple apprenant-formateur par imitation de ce dernier. Cependant, sans minimiser le travail effectué, il est par contre dommage que l'évaluation de cet apprentissage n'ait pas pu être effectuée. Nous rencontrons ici les limites de travaux pluridisciplinaires menés sur des laps de temps contraints. Ceci reste une perspective qu'il faudra mener avec des psychologues. De telles expérimentations sont lourdes à mettre en œuvre (recherche et sélection de candidats, définition de groupes tests, évaluation statistiques de la validité des résultats, temps des simulations, etc...) et amènent à réfléchir sur l'articulation à trouver entre les disciplines concernées.

Ce travail est l'objet de la thèse de CÉDRIC BUCHE [22] et des publications [21, 19, 20, 23, 26, 24, 25].

Une synthèse : la simulation participative d'interactions

Résumé

Ce chapitre présente nos travaux sur l'évaluation des systèmes interactifs multimodaux mobiles. Ceux-ci synthétisent à la fois la simulation participative et l'autonomisation par abstraction, métaphore et apprentissage. La proposition s'appuie sur une architecture en trois modèles (section 5.2). Nous nous arrêterons plus particulièrement sur celui d'un utilisateur virtuel (section 5.2.3), basé sur un mixage des métaphores cognitiviste et connexionniste réalisé à l'aide d'une abstraction s'appuyant sur la notion de contexte personnel.

5.1 Evaluation prédictive des systèmes interactifs multimodaux

Avec ce travail, nous avons abordé le domaine des interfaces homme-machine. Les systèmes interactifs multimodaux se développent à grande vitesse. Ils proposent d'améliorer le dialogue entre l'homme et la machine en dotant ces dernières de perceptions et de moyens de communication complexes et multiples (reconnaissance de la parole, mesure du stress de l'utilisateur, combinaison son/image ... etc). En fait, cette multitude d'interactions est source de confusion et de difficulté pour les utilisateurs [265]. Il faut distinguer les fonctionnalités de l'utilisabilité qui rend compte de la facilité d'utilisation [261]. Cette dimension est difficile à évaluer car fortement liée au comportement de l'homme, sujet à débats et à de nombreuses variations interindividuelles [173, 199, 216].

Pour répondre à cette difficulté, les ergonomes recourent des évaluations empiriques, basées sur des questionnaires automatisés [236], [217], ou sur des traces d'utilisation [248], [263], [133], [294], [220], [2], [303], [195] et des approches analytiques basées sur des modèles prédictifs [125], [228], [250], [311]. Une dernière famille utilise des simulations [235, 234, 192, 301] s'appuyant sur des architectures cognitives qui sont un modèle exécutable d'utilisateur.

Notre contribution se situe dans le cadre de ces simulations pour obtenir une évaluation participative et écologique¹ des systèmes interactifs multimodaux. Nous

¹Le terme d'écologique en psychologie, reflète l'étude du comportement humain en présence de son

pouvons préciser les concepts d’ouverture, de compréhension et de substitution relativement à l’évaluation participative d’usage (voir section 1.1).

- **L’ouverture** : L’ouverture se caractérise par la possibilité de modifier à la fois l’environnement et les événements qui s’y produisent, le système interactif, son état et son fonctionnement, ainsi que le modèle comportemental de l’utilisateur.
- **La compréhension** : Comme pour les agents situés (chapitre 2), la compréhension sera favorisée par l’usage de la réalité virtuelle. La représentation visuelle explicite des comportements de l’utilisateur aide à saisir ce qui se passe. Cependant, des outils de synthèse, résumant des variables d’états telles que l’agacement ou la sensation de gêne apporteront des moyens supplémentaires de compréhension.
- **La substitution** : La substitution peut être relative à des éléments de l’environnement mais surtout à celle de l’usager. Elle permet d’essayer à la place de celui-ci, d’exécuter un exercice particulier dans l’environnement pour évaluer les conditions de cet exercice.

5.1.1 Principales approches d’évaluation par simulation

La majorité des approches d’évaluation par simulation héritent de l’évaluation analytique basée sur la méthode GOMS² qui s’inspire des modèles cognitivistes du “processeur humain” [188]. Une analyse faite avec GOMS part d’une description de la connaissance procédurale que doit posséder un utilisateur et d’une description des séquences d’actions qui doivent être exécutées pour accomplir une tâche particulière. A partir de ces modèles comportementaux, un mécanisme de chaînage élabore les plans d’actions permettant d’atteindre un but particulier et évalue des critères de performance de cette exécution. GOMS est une base solide qui fait référence mais qui est souvent enrichie pour améliorer la compréhension de la description et la précision comportementale de l’utilisateur avec respectivement NGOMSL [91], GOMSL [92] et CPM-GOMS [86]. Ces enrichissements comportementaux reflètent les compétences de l’utilisateur, la possibilité d’erreur, l’apprentissage de l’interface ou le parallélisme.

La difficulté s’accroît lorsqu’on cherche à traiter le cas des interactions multimodales car il devient nécessaire d’intégrer le modèle de l’utilisateur à celui de l’environnement d’interaction, intégration qui rend difficile l’explicitation des *tous* les comportements. En effet, si on peut décrire en GOMS le temps que met un opérateur pour reconnaître un objet, le modèle analytique n’est pas capable d’exécuter cette reconnaissance lors de l’apparition de l’objet et de tester des scénarios où il y aurait plusieurs objets apparents à différents instants par exemple. Nous retrouvons ici la séparation analytique/phénoménologique présentée au chapitre 1. Pour cela, il existe de nombreuses architectures qui tentent de simuler un comportement humain, certaines sont dédiées

environnement.

²GOMS signifie : Goal Operator Method Selection. Elle permet de découvrir les méthodes (séquences d’opérateurs) à partir des **buts** que peut atteindre l’utilisateur, d’**opérateurs** représentant ce que peut exécuter l’interface et de **règles d’utilisation**.

	SOAR	EPIC/SOAR	EPIC	GLEAN	ACT-R	ACTR/PM	INFO SCENT
Théorie cognitive	MPH ¹	MPH et CCT	MPH	MPH et CCT	ACT	ACT	Info scent
Modélisation de l'apprentissage	oui	oui	non	non	oui	oui	non
Modélisation du contrôle moteur	non	oui	oui	non	non	oui	oui
Modèle du système interactif	non	oui	oui	oui	non	oui	oui
Traitement de la multimodalité	non	oui	oui	oui	non	oui	non
Intégration de l'environnement	non	non	non	non	non	non	non

¹MPH : Modèle du Processeur Humain [188], CCT : Théorie de la Complexité Cognitive [272] et ACT : [168].

TAB. 5.1 – Comparaison d’approches de simulation de l’utilisateur pour l’évaluation à l’étude d’IHM. C’est le cas par exemple de CAPS [231] de LICAI/CoLIDES [238] et de l’INFO SCENT SIMULATOR [35]. D’autres sont plus générales, et basées sur des systèmes à base de règles comme SOAR³ [117] et ACT-R [168], elles sont adaptées et intégrées dans des outils supportant des modules sensori-moteurs comme GLEAN [235], ACTR-PM [28] et EPIC [234] qui s’intéresse plus précisément à l’évaluation d’interfaces multimodales. Nous proposons une comparaison de ces architectures dans [42] résumée par le tableau 5.1.1 et renvoyons également le lecteur intéressé à la synthèse effectuée par [27] pour les architectures cognitives et dans [85] pour les méthodes d’évaluation d’usage en général.

Même s’il est ancien et critiqué sur ses hypothèses cognitives, SOAR est le projet le plus abouti. Il en existe de nombreuses applications dans divers domaines et dans celui de l’interaction homme machine [280]. Les travaux de [165] sont un exemple d’utilisation de SOAR pour simuler un programmeur découvrant un gros programme informatique. Ce modèle permet entre autre d’analyser la conséquence du désordre sur l’activité cognitive. Mais c’est EPIC qui est la première tentative de modélisation d’activités multitâches grandement nécessaire pour évaluer les interfaces mobiles. EPIC a été utilisé pour rendre compte de tests psychologiques perceptifs (appuyer sur une lettre dès qu’une couleur apparaît) ou l’énumération articulatoire (retenir un texte oralement). EPIC est assez souple pour intégrer des modélisations à la GOMS et des stratégies psychologiques différentes comme cela est illustré dans [95]. Enfin, notons l’intégration de notions d’apprentissage avec EPIC-SOAR [36]. Comme nous l’avons présenté en

³Initié par NEWELL pour mettre en œuvre sa Théorie Unifiée de la Cognition, ce modèle est basé sur le principe P9 (Problem Space Principle) du Modèle du Processeur Humain

introduction, l’intérêt de ces approches réside dans le gain quand à la maîtrise de la prévisibilité des interactions possibles. Elles sont alors intégrables durant la phase de conception pourvu que celle-ci autorise des allers et retours comme c’est le cas dans les cycles de développement en spirale ou en étoile [97].

Cependant, ceci n’évite pas de nombreuses difficultés. Parmi celles-ci, l’impossibilité ou l’illusion de simuler un comportement exact, la difficulté de procéder à une validation par expérimentation et la difficulté de trouver les éléments pertinents à modéliser.

Les approches basées sur des règles (SOAR, ACT, EPIC, GLEAN) sont issues de théories cognitivistes qui ont des difficultés à rendre compte de l’ambiguïté du choix et des aspects parallèles de la perception durant l’action, tandis que les autres (CAPS, LICAI, INFO SCENT) rendent mieux compte de ces aspects perceptifs dans la simulation, intégrant la notion d’abandon de la tâche, même si elles ne traitent pas de multimodalité en s’intéressant plus à des activités de navigation hors contexte. Sur ces deux points : l’intégration de la multimodalité en contexte et la modélisation de la notion de motivation pour la prise de décision, notre travail apporte une contribution.

5.2 L’approche SIHMM

L’approche SIHMM⁴ propose de simuler, grâce à la réalité virtuelle, un modèle comportemental d’utilisateur en interaction avec son environnement. Ce travail ne prétend évidemment pas répondre à l’ensemble des problèmes mentionnés précédemment. Le sens du modèle et sa crédibilité ne résident pas dans une exactitude comportementale de “bas niveau” : nous nous concentrons sur l’impact de l’environnement en terme de prise de décision et non sur la simulation du système sensori-moteur. En effet, il est possible de rendre compte du contexte d’usage perçu par l’utilisateur au travers d’abstractions symboliques et qualitatives beaucoup plus faciles à manipuler par un simulateur environnemental. SIHMM a donné lieu à un outil du même nom, qui se distingue des autres par les caractéristiques suivantes :

- La modélisation du contexte environnemental et de sa dynamique (qui peut être spécifiée à l’aide de scénarios).
- La possibilité d’un prototypage interactif, favorisant les tests d’hypothèses à la fois sur le moteur décisionnel de l’utilisateur virtuel, sur les fonctionnalités du système interactif et sur l’environnement lui-même.
- Une modélisation des systèmes interactifs multimodaux orientée tâche facilitant la simulation et l’analyse. Cette modélisation met en évidence les modalités d’interaction ainsi que la multimodalité.
- Un modèle d’utilisateur couplant un modèle qualitatif parallèle de la perception basé sur la notion de gêne et de motivation à la tâche, proche des modèles connexionnistes, avec un modèle cognitif à base de règles pour la prise de décision intégrant les concepts associés au modèle de la “faillible machine” de J. REASON

⁴Acronyme de Simulation d’Interaction Homme Machine Multimodale.

[278]. Il mixe ainsi les deux métaphores cognitivistes et connexionnistes par le biais d'une abstraction particulière nommée le *contexte personnel* de l'utilisateur. Moins sophistiqué que certaines architectures cognitives, il est par contre ouvert et basé sur des concepts originaux qui le distinguent de celles-ci.

Dans le cadre de ce mémoire, c'est sur le modèle de l'utilisateur que nous allons plus particulièrement nous arrêter. Cependant, étant donné qu'il s'intègre dans une approche globale, il ne peut être correctement appréhendé que si les principales caractéristiques de celle-ci sont présentées.

La décomposition de SHIMM en trois modèles en interaction est présentée figure 5.1. Ceux-ci font l'objet des trois sections suivantes, les scénarios ne constituent pas un modèle à part entière mais plutôt un module de contrôle pouvant interagir avec chacun des modèles.

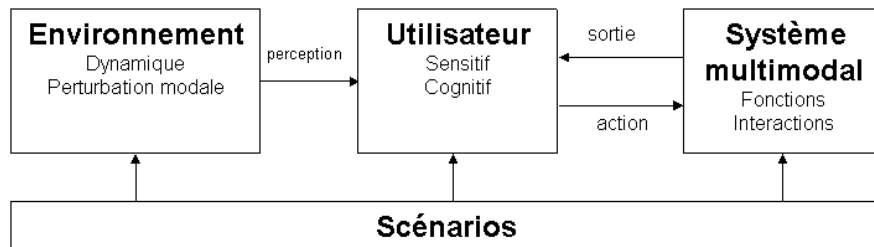


FIG. 5.1 – Les trois modèles de SHIMM

5.2.1 Modélisation de l'environnement d'interaction

L'environnement virtuel d'interaction permet de simuler des scènes complexes correspondant aux lieux d'usage des systèmes interactifs tels qu'un hall de gare ou un centre commercial. Il est donc peuplé d'entités en interaction, ayant une influence sur l'usage du système par le biais de perturbations physiques ou sociales. Le modèle d'agent situé intentionnel présenté au chapitre 2 pourrait être un support à leur définition. En réalité, pour des raisons chronologiques, il n'a pas été exploité⁵. Cet environnement est modélisé à l'aide de la plateforme d'agents situés ORIS, (voir section 3.4 page 41).

⁵même si SHIMM repose sur des fonctionnalités issues de versions préliminaires à l'implémentation de SMAIN.

Interférence-gêne	Description
Auditive	Interférence auditive, bruit, source sonore. Ex : bruit de véhicule.
Vocale	Interfère sur la boucle phonologique de l'utilisateur et le perturbe particulièrement en cas de communication orale avec le système interactif. Ex : une foule de badauds.
Lumineuse	Perturbation lumineuse. Ex : un réverbère dans une rue sombre.
Extéroceptive	Perturbation gestuelle. Ex : un espace restreint.
Olfactive	Interférence olfactive, peut diminuer par exemple la motivation de l'usager. Ex : échappement d'un véhicule.
Kinesthésique	Interfère avec les capacités sensorielles de l'utilisateur, au niveau kinesthésique (vibrations, tactile). Ex : un escalator.
Affective	Interférence d'ordre sociologique. Ex : un restaurant, une foule stressante.

TAB. 5.2 – Interférences et sens perceptif

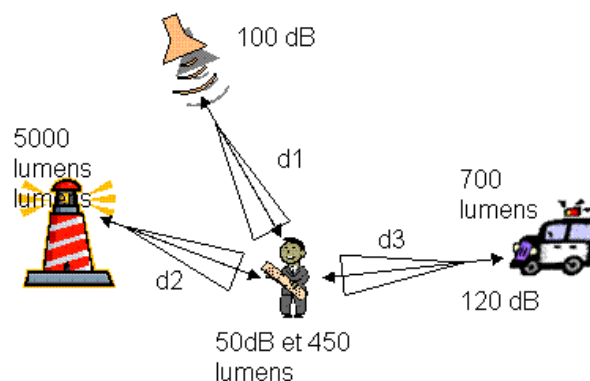


FIG. 5.2 – Le modèle de l'environnement quantifie l'ensemble des perturbations sur l'utilisateur

Les agents de l'environnement ainsi modélisé possèdent des attributs de perturbations modales associés aux sens de l'homme. Le simulateur s'occupe de transmettre ces perturbations à l'utilisateur virtuel. La figure 5.2 illustre, pour le cas de la lumière et du son, le principe des mécanismes que nous avons implémentés. Ceux-ci permettent, une fois que les agents perturbateurs sont configurés, de rendre compte quantitativement des valeurs des perturbations perçues par un agent placé à une certaine distance des sources. Actuellement, les interférences possibles sont celles données dans le tableau 5.2.

L'ergonome utilise des bibliothèques de comportements qu'il aligne sur des grilles de

scénarios. La figure 5.3⁶ illustre une telle grille pour un petit scénario. Il est également possible de provoquer explicitement durant la simulation, des rencontres entre l'utilisateur virtuel et les éléments de l'environnement.

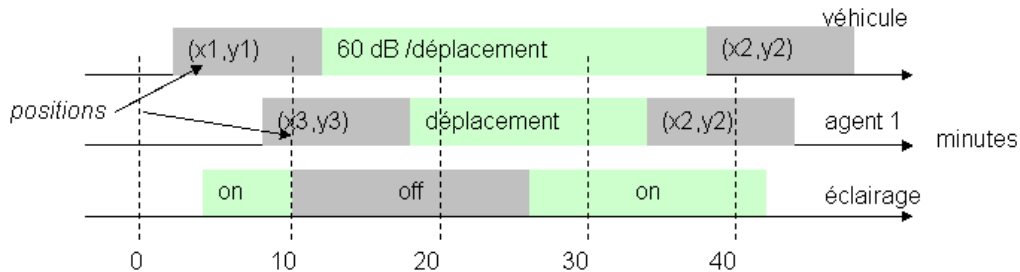


FIG. 5.3 – Exemple simple de scénario d'une simulation

5.2.2 Modélisation du système interactif multimodal

La modélisation du système interactif simulable pose le problème du rapport entre l'expressivité, la simplicité et l'exécution de celui-ci. Il existe des modèles proches des ergonomes, orientés sur les besoins tels que MAD [289], HTA [189] ou CTT [266] mais ceux-ci ne sont pas adaptés aux systèmes multimodaux et rarement simulables. Une autre famille de modèles s'intéresse à la description fonctionnelle destinée à la conception et sont simulables. Un exemple est l'utilisation de réseaux de PETRI [150], [128] ou [116]. Cependant ces modèles ne traitent pas des modalités. Par conséquent nous avons été amenés à en proposer un différent, inspiré des précédents et des statecharts, en y intégrant les interactions multimodales ainsi qu'une sémantique opérationnelle. Ce modèle, UMAR⁷ tente d'apporter les trois points suivants :

1. Une modélisation des modalités d'interaction.
2. Une expressivité et une lisibilité apportée par le support du parallélisme, de l'abstraction et par la granularité de représentation orientée "modalité d'interaction".
3. La prise en compte de possibilités d'interaction évoluées, comme les propriétés CARE (Complémentarité, Assignation, Redondance, Equivalence) de la multimodalité explicitées par [194].

Nous n'entrerons pas ici dans les détails de UMAR et renvoyons pour cela le lecteur à [104]. En résumé, vu de l'utilisateur virtuel, il reçoit en entrée des modalités d'actions et renvoie des modalités de sorties (voir figure 5.4). UMAR constitue également une base de connaissances pour l'utilisateur (qui pourra être différente pour montrer les problèmes d'usages liés à une méconnaissance d'une interface). Pour cela, une modalité de contrôle de la modalité d'action peut être spécifiée. Prenons l'exemple de la saisie de nombres par

⁶La première ligne de cette figure décrit un déplacement d'un véhicule d'un point d'ordonnée x_1 et d'abscisse y_1 à un point d'ordonnée x_2 et d'abscisse y_2 en un temps précis, le tout en émettant un bruit de 60 décibels.

⁷pour User Modalities Artefact Representation.

pression sur des touches. Une pression correspond à la modalité d’action. La modalité de contrôle correspond au retour proprioceptif du clavier, quant à la modalité de sortie, elle peut être mise en œuvre à travers l’émission d’un signal sonore ou visuel. La qualité d’une interaction dépendra de la possibilité d’utiliser ces trois modalités. Si par exemple, l’utilisateur se trouve sur une zone vibrante, le contrôle proprioceptif des touches est difficile. La figure 5.4 illustre ces trois modalités pour une interaction multimodale vocale/visuelle.

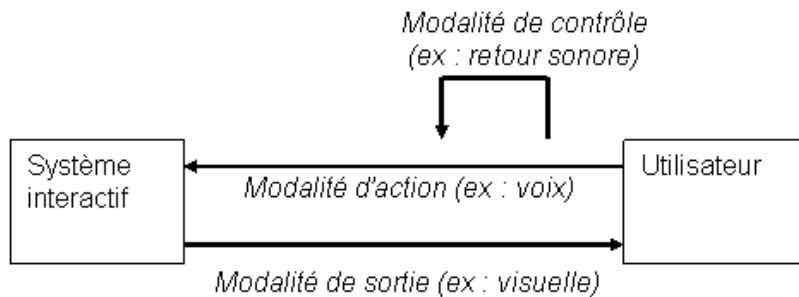


FIG. 5.4 – Illustration des modalités d’action/contrôle et sortie à la base d’UMAR.

La granularité d’UMAR s’articule autour de la notion d’états, assimilables à des fonctions offertes à l’usager. La fonction peut être affinée selon les choix de l’ergonome mais nous avons fait l’hypothèse qu’une granularité pertinente correspond à un changement d’état quand il y a un changement de la modalité de sortie. Ceci est lié à l’objectif des simulations, axées sur la prise de décision de l’utilisateur, dépendant du contexte lié en partie à la perception du système interactif, lui-même défini principalement par les modalités de sorties.

5.2.3 L’utilisateur virtuel

Ce modèle est celui qui nous intéresse particulièrement ici. Par conséquent il sera plus détaillé que les deux précédents. Sa crédibilité est relative à l’impact de l’environnement en terme de prise de décision et non sur la simulation physiologique du système sensori-moteur de l’utilisateur. L’utilisateur virtuel doit exhiber des tendances décisionnelles influencées par des perturbations sensorielles multiples. Nous nous sommes donc concentrés sur l’identification de critères de crédibilité grâce à des remarques et observations d’ergonomes et de spécialistes du comportement. Il faut que les réactions de l’utilisateur virtuel reflètent des notions telles que la motivation, l’agacement, l’erreur ou l’abandon de tâche suite à l’impossibilité d’usage d’une modalité d’action ou de contrôle. Elle doit rendre compte également d’erreurs liées à l’impossibilité de percevoir une modalité de sortie. Le modèle qui en suit est pragmatique, il évalue les interférences perceptives et leur impact sur la prise de décision ; c’est pourquoi nous l’avons nommé SCU (Sensitive and Cognitive User). Ce modèle est synthétisé figure 5.5. Il est composé d’un modèle sensitif qui détermine l’inhibition de modalités en fonction de la perception des perturbations, à l’aide de critères psychologiques qualitatifs. Il renvoie également une abstraction de l’environnement et de l’état mental de l’utilisateur que nous synthétisons sous le terme de *contexte personnel*.

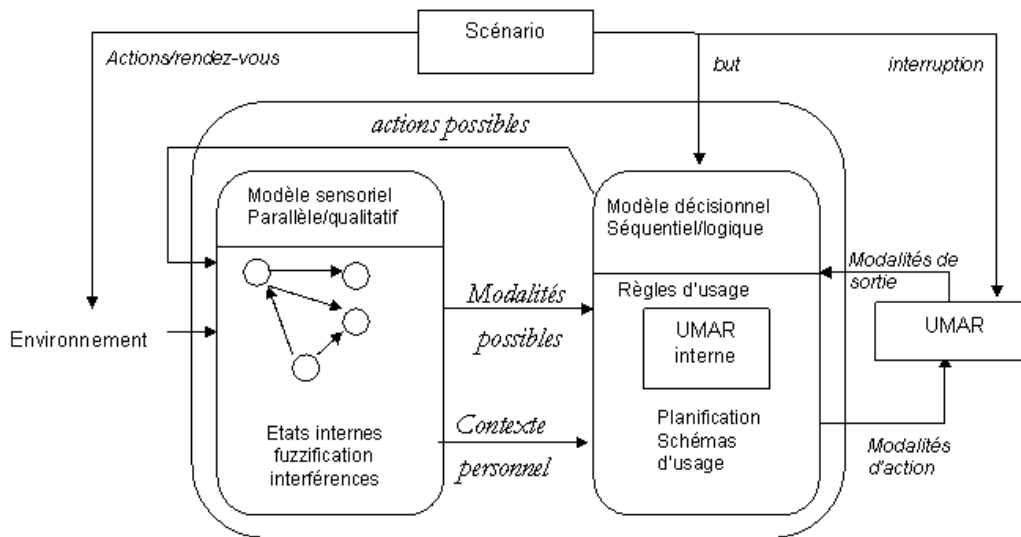


FIG. 5.5 – Modèle de décision SCU

Le modèle décisionnel utilise ces informations pour rechercher et planifier des séquences d’actions pertinentes. Pour cela, il analyse les buts imposés à l’utilisateur par le scénario, recoupe ceux-ci avec sa connaissance du système qui est une description plus ou moins partielle du modèle UMAR du système interactif, appelée “UMAR interne” et le *contexte personnel* qui fera l’objet de la section B. Il en déduit le choix d’une action à un instant donné destinée au système interactif multimodal. Cette action est synthétisée par l’émission d’une modalité d’action vers UMAR.

A Modèle sensoriel

Ce modèle est basé sur l’utilisation de différentes cartes cognitives floues [240], ou FCM (Fuzzy Cognitive Map) en anglais. Les FCMs sont des graphes d’influence entre des concepts nommés possédant un degré d’activation continu. Les arcs orientés entre concepts représentent des liens d’excitation (lien +) ou d’inhibition (lien -, voir un exemple, figure 5.6). Comme a pu le montrer [164], les cartes cognitives floues, qui devraient aussi légitimement se nommer cartes connexionnistes floues, constituent un véritable langage de prototypage de comportement. Elles ont d’ailleurs été utilisées dans différents domaines : en économie, où elles sont le support d’un modèle issu de la théorie de la décision dans [172], pour la modélisation d’un univers virtuel dans [198] ou pour celui du comportement d’un barreur virtuel dans [123]. Pour la simulation comportementale, les FCMs possèdent des concepts d’entrée issus de l’environnement ou du scénario, des concepts de sortie qui dans notre cas seront utilisés par le modèle décisionnel et des concepts internes propres à rendre compte des mécanismes perceptifs et sensoriels.

Nous avons représenté, en figures 5.6 et 5.7 et à titre d’exemple, des extraits de la carte cognitive correspondant à un modèle possible d’utilisateur. La carte finale correspondante, possède 27 concepts et 35 arcs [101]. Il faut garder à l’esprit que l’ergonome peut modifier celle-ci à souhait et que les hypothèses que nous relatons ici, même si elles sont le résultat de collaboration avec des psychologues, peuvent tout à fait être

discutées.

Le premier extrait de la carte (figure 5.6) montre des concepts liés à la notion d’abandon d’une tâche. Il y a quatre concepts d’entrée : deux sont issus du scénario au sein duquel l’ergonome peut spécifier l’importance d’un but (sur une échelle de 0 : peu important à 1 : très important) ainsi que la pression temporelle associée à la scène qui reflète la nature stressante du scénario. Les deux autres concepts d’entrée sont également liés au scénario mais de façon indirecte : il s’agit de la mobilité et de la notion de double tâche. La mobilité rend compte du fait que l’utilisateur virtuel est en déplacement, tandis que la double tâche indique qu’il est déjà en train d’effectuer une autre tâche. Ces deux concepts dépendent de la situation de l’utilisateur à chaque instant et des décisions prises précédemment. Les deux concepts internes sont la motivation et les ressources cognitives. Leurs rôles sont complémentaires : la motivation empêche l’abandon tandis que la surcharge cognitive l’entraîne. Les différents arcs reflètent les postulats suivants : l’importance du but augmente la motivation. Celle-ci à un effet stimulant, c’est pourquoi un arc rebouclant a été ajouté. Informellement, il signifie que plus on est motivé, plus on se motive. Notons que pour éviter des valeurs infiniment croissantes, l’algorithme de simulation des cartes cognitives est défini de sorte que les valeurs d’activation tendent asymptotiquement vers des minima ou des maxima déterminés. La mobilité, l’activité double et la pression temporelle augmentent la quantité de ressources cognitives utilisées, tandis que la motivation diminue celle-ci. En fait nous pourrions plutôt dire qu’elle rend l’utilisateur plus tolérant à la charge cognitive donc qu’elle diminue celle-ci indirectement. Enfin, le concept “abandon” est augmenté par la charge cognitive et diminué par la motivation. Concrètement un seuil est fixé pour définir si l’abandon est effectif ou non.

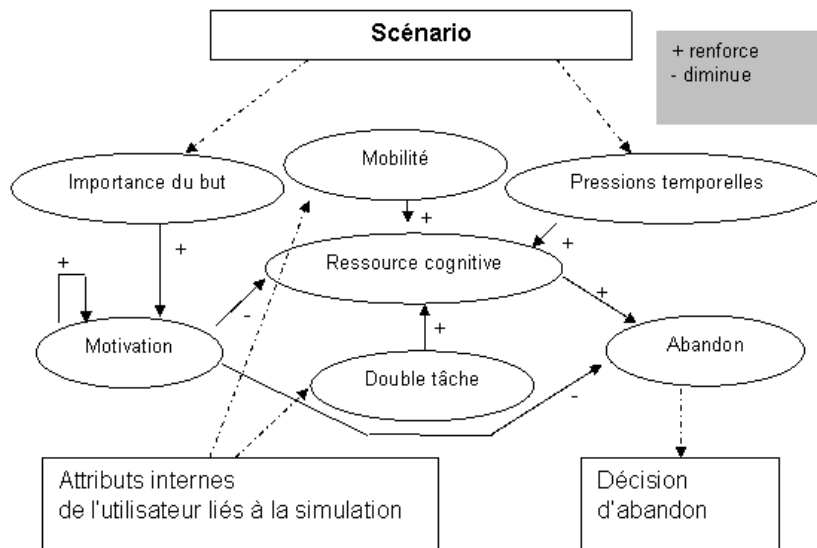


FIG. 5.6 – Les influences sur la décision d’abandon

Le deuxième extrait de carte (figure 5.7) “calcule” les interférences de l’environnement et leur impact sur l’élection des modalités de sortie vocale et tactile. Les concepts d’entrées liés à l’environnement sont la perception de bruit, de voix de foule ou de

vibration. Les valeurs de ces perceptions, fournies par l'environnement virtuel, peuvent être réinterprétées pour définir le degré d'activation des concepts par le biais d'une fonction de transformation floue. Ces fonctions ont été définies pour les modalités du tableau 5.2 mais peuvent être redéfinies à souhait par l'ergonome, au travers d'un fichier de configuration. Notons sur cette carte des concepts d'entrée liés aux connaissances ou habitudes de l'utilisateur, relatés par des schémas d'usage typiques⁸ (tactiles ou vocaux) qui sont présents dans la base de connaissance du modèle décisionnel présenté au paragraphe suivant.

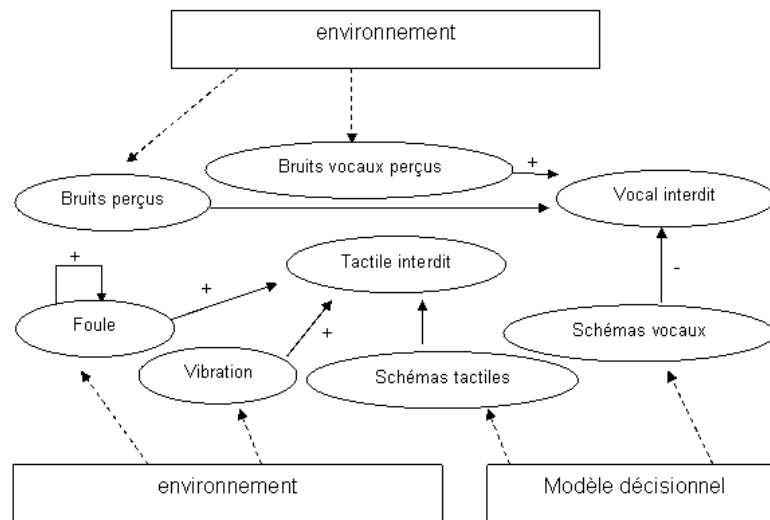


FIG. 5.7 – Modélisation de quelques interférences environnementales

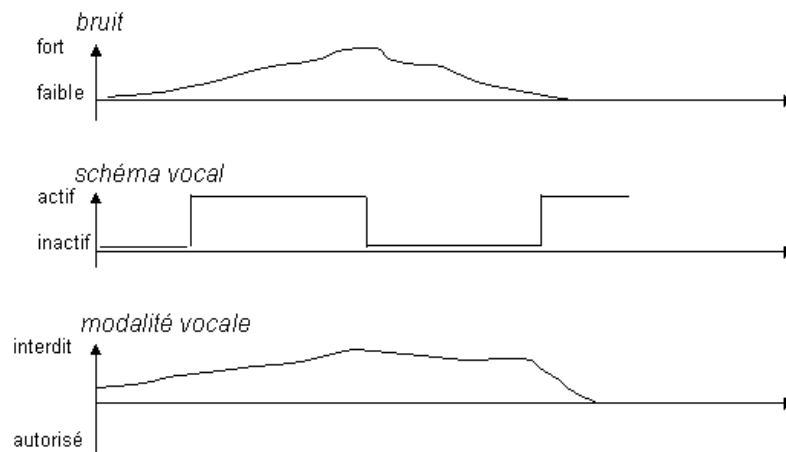


FIG. 5.8 – Exemple de l'influence de deux concepts d'entrée sur l'usage d'une modalité

La figure 5.8 illustre l'aspect dynamique du modèle : elle montre une évolution

⁸Un schéma typique peut représenter une habitude : si je connais bien la modalité gestuelle, j'aurai tendance à l'utiliser souvent. A l'inverse, si je ne connais pas la modalité vocale, en cas d'équivalence, j'aurai tendance à ne pas la sélectionner.

Concept	Signification	Valeurs possibles
L	La luminosité ambiante	faible, moyenne, forte
B	Bruit ambiant	nul, faible, moyen, fort
V	Voix interférentes	absent, présent
A	Contexte affectif	seul, accompagne, surveillé
T	Pression temporelle	faible, forte
Bu	Importance du but	faible, moyen, fort
M	Mobilité	oui, non
D	Activité double	oui, non
C	Ressource cognitive	faible, moyenne, forte

TAB. 5.3 – Signification des variables de modélisation du contexte

possible de la valeur d’activation du concept vocal interdit en fonction de la perception d’un bruit et de l’activation d’un schéma typique utilisant la modalité vocale. Pour plus de détails sur les spécifications de la dynamique des cartes cognitives, nous renvoyons le lecteur à [240].

B Le contexte personnel

Le *contexte personnel* est une abstraction permettant d’articuler le lien entre le modèle sensitif et le modèle décisionnel. La notion de contexte abondamment traitée en psychologie, fait également l’objet de recherches en intelligence artificielle [14]. Synthétiquement, nous pouvons la définir comme l’ensemble des éléments pris en compte à un instant donné pour prendre une décision. La “bonne” abstraction consiste à synthétiser, en une extériorité, ces éléments à l’aide d’un nombre fini de symboles (voir chapitre 2, section 2.3.1.B). Ici, nous proposons d’utiliser neuf des concepts du modèle sensitif qui synthétisent l’état mental et perceptif de l’utilisateur. A chacun de ces concepts sont associées des valeurs floues. Ainsi, le *contexte interne*, base d’entrée du modèle décisionnel est le 9-uplet : $\{L, B, V, A, T, Bu, M, D, C\}$ dont les valeurs et la signification sont référencées dans le tableau 5.3.

C Modèle décisionnel

Le modèle décisionnel est un système à base de règles. Sa version actuelle contient environ 500 règles. Sans entrer dans le détail de sa description⁹, la figure 5.9 illustre des règles caractéristiques, écrites en PROLOG. Elles sont bien sûr dépendantes de l’application cible et se scindent en trois ensembles distincts :

1. Les actions possibles associées au système interactif, décrivant les modalités d’entrées et de sortie, ainsi que les arcs définissant le fonctionnement connu par l’utilisateur du système interactif. Il peut donc s’agir du diagramme UMAR lui-même ou d’une version simplifiée de celui-ci, correspondant à l’”UMAR interne” de la figure 5.5 page 71, que l’utilisateur virtuel peut découvrir grâce à un apprentissage. Notons que la description des arcs contient un niveau de connaissance (voir figure 5.9). Il s’agit d’une variable numérique reflétant le fait que l’utilisateur ne connaît pas (0) ou connaît très bien (5) la fonctionnalité associée à l’arc.

⁹Pour cela, le lecteur intéressé pourra consulter [42] et [101]

Cette base de faits est générée automatiquement par l'éditeur de UMAR.

2. Les schémas typiques (ou prototypiques) [290] reflètent les habitudes et tendances d'utilisation généralement reliées au contexte d'utilisation. Un schéma typique dépend du contexte interne. Y sont associés les états de départ et d'arrivée du système interactif connu par l'utilisateur, ainsi que la ou les modalités d'usage associées et favorites. Enfin, le succès ou l'échec récent de l'utilisation de ce schéma peut être référencé et utilisé par la base de règles. Le modèle sensitif est influencé par les schémas issus de cette base de faits (voir section 5.2.3.A).
3. Les routines [166], très proches des schémas typiques, reflètent également une habitude d'usage. Cependant, alors qu'un schéma typique va influencer le choix d'une modalité d'action, une routine va être exécutée de façon instinctive sans aucune réflexion, surtout en cas de pression temporelle forte. Celles-ci sont interprétées et peuvent être générées par le système de règles, par apprentissage.

```
% modalité d'entrée : <Physique, Représentation, Controle, Durée>
action(stylet, scrollhb, [graphique, pk],2).
action(clic, selection_active, [graphique, pk],1).

%modalité de sortie : <Physique, Représentation, Durée>
sortie(graphique, selectionListe, inf).

% arc UMAR : <départ, arrivée, connaissance, multimodalité CARE>
% dans cet exemple, la propriété CARE est une équivalence entre
% deux modalités
arc(etatA, etatB, 3, modalité(action(parole, inserer, [sonore],2),
    action(clic, icone, [graphique, pk], 1), equivalence).

% Schema typique : <contexte, etatDépart, étatArrivée, [modalités
% d'usages], reussite>
schema(l=faible/b=fort/v=absent/a=seul/t=forte/bu=faible/m=oui/d=non/
c=faible, etatA, etatC, [tactile, vocale], succes).
```

FIG. 5.9 – Exemple de faits PROLOG du modèle de décision

La base de règles implémente les mécanismes de sélection et de traitement de l'information inspirés des études de sur l'interaction homme-machine [278]. Pour lui, les connaissances sont sélectionnées suivants trois protocoles :

- Le mécanisme d'erreur qui provoque la sélection d'actions inopportunes en fonction d'activateurs fréquentiels, de récence et de primauté. Nous avons adapté cette notion en intégrant la notion de distance contextuelle. Nous avons introduit des opérateurs permettant de comparer les neufs concepts constituant le contexte. Cette comparaison est empirique : ainsi, si 8 concepts sont identiques pour deux contextes C1 et C2, ceux-ci seront moins distants que deux contextes C3 et C4 pour lesquels seuls 7 concepts ont la même valeur. Si un schéma typique ou une

routine ne sont pas trop éloignés du contexte courant, alors ils seront sélectionnés pour influencer la prise de décision.

- La sélection par similarité : elle est appliquée quand une connaissance coïncide parfaitement avec le but à réaliser, les informations perçues de l’environnement et l’état interne de l’utilisateur virtuel. Il s’agit typiquement de l’utilisation de connaissances de type routine. Notons que le système prend en compte les niveaux de connaissance, introduit précédemment pour trancher entre deux actions possibles. Si toutefois celles-ci possèdent le même niveau de connaissance, alors un tirage aléatoire est effectué.
- Le mécanisme de recherche systématique propose un calcul du meilleur chemin en fonction de disponibilité de ressources cognitives. Ici, c’est le modèle du système interactif connu par l’utilisateur qui est la base de la recherche. Celle-ci demande néanmoins des ressources cognitives importantes. Ce mécanisme peut être utilisé pour simuler un débutant. Le système va générer, au fur et à mesure des simulations, des routines qui constitueront la connaissance apprise au fur et à mesure des expériences. L’apprentissage est donc un mécanisme de “chunking”, tel que celui que l’on trouve dans SOAR.

5.2.4 Résultats

L’évaluation d’une telle approche est un problème délicat car elle nécessite d’étudier des scénarios d’usages réels complexes car se réalisant dans des environnements riches et dynamiques. Nous devons reconnaître qu’en l’état, nous ne pouvons montrer formellement des comparaisons statistiques corrélant les choix d’un utilisateur virtuel avec ceux d’un utilisateur réel. De plus, les différences inter-individuelles sont telles qu’une étude statistique est périlleuse et demanderait une classification de comportements typiques et un échantillonnage des testeurs selon cette classification, travail de longue haleine que nous n’avons pas pu effectuer. DAVID E. KIERAS relate les problèmes similaires qu’il a rencontré et en déduit d’ailleurs que : *plutôt que de valider un modèle théorique à partir de données expérimentales (difficilement accessibles), il vaut mieux l’exécuter et le donner à observer aux spécialistes qui vont trouver les ‘lacunes’ de celui-ci de façon évidente* [93].

Pour notre part, nous avons entrepris une démarche complémentaire en développant SIHMM en partenariat avec des ergonomes de FRANCE-TÉLÉCOM, de l’IRIT¹⁰ qui ont effectué des expérimentations en grandeur réelle au Parc de La Vilette, et des psychologues du LISYC. Ainsi psychologues et ergonomes nous ont fait profiter de leur expérience et de leurs réflexions pour étayer nos modèles. Par exemple, ils sont à l’origine de la prise en compte des temps de réaction du système interactif (que nous n’avons pas détaillés ici) et de l’introduction du concept de motivation au sein du modèle perceptif. Des corrections ont donc été régulièrement apportées et nous permettent d’affirmer que notre approche répond à certains besoins pour relater l’usage d’interfaces multimodales. Elle permet en tout cas de mieux cerner les axes problématiques de la validation écologique de ces dernières.

¹⁰Institut de Recherche en Informatique de Toulouse.

La figure 5.10 montre une copie de quelques vues de SIHMM. On y voit l'environnement virtuel d'interaction, une représentation du système interactif multimodal (ici un PDA) et une représentation 3D du modèle UMAR lui correspondant. La figure 5.11 montre l'interface de configuration de l'utilisateur virtuel.

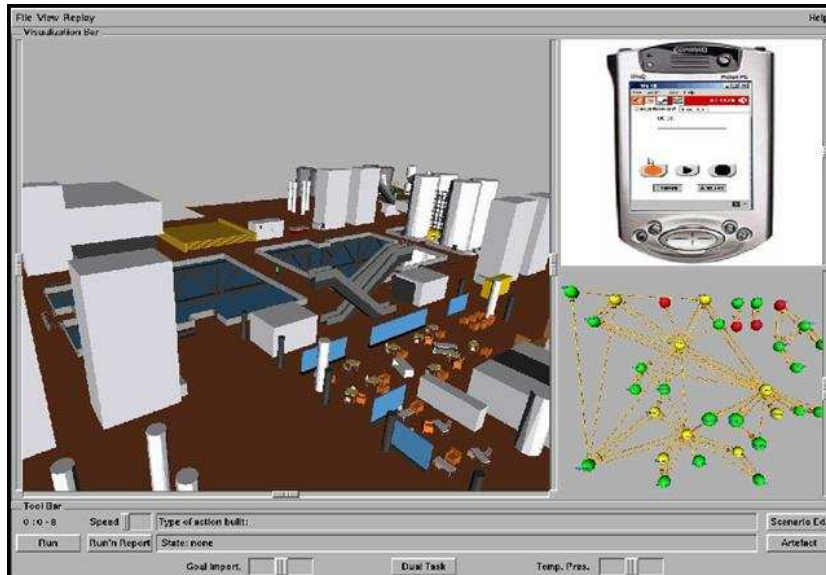


FIG. 5.10 – Quelques vues offertes par le logiciel SIHMM.

Concepts	Sensor and effector	Mode			
genesono	[[0.01,0],[100,1]]	sono	[[[-1,-1],[1,1]]	sonoContexte	App
genetoucher	[[0.01,0],[100,1]]	toucher			App
genebruitvocale	[[0.01,0],[100,1]]	vocalenoise	[[[-1,-1],[1,1]]	vocalNoiseContexte	App
geneodorat	[[0.01,0],[100,1]]	odorat			App
genelight	[[0,1],[30,1],[50,0],[70,1],[100,1]]	light	[[[-1,-1],[1,1]]	lightContexte	App
genegest	[[0.01,0],[100,1]]	genegest			App
affectiveContext	[[0.01,0],[100,1]]	affective_context	[[[-1,-1],[1,1]]	affectiveContextDefuzzi	App
goal	[[0.01,0],[1,1]]	goal			App
paroleGoal	[[0.01,0],[1,1]]	parolegoal			App
tactileGoal	[[0.01,0],[1,1]]	tactilegoal			App
geste2DGoal	[[0.01,0],[1,1]]	geste2dgoal			App
tangibleGoal	[[0.01,0],[1,1]]	tangiblegoal			App
		parole	[[[-2,-1],[2,1]]	parole	App
		tactile	[[[-2,-1],[2,1]]	tactile	App
		tangible	[[[-2,-1],[2,1]]	tangible	App
		geste2d	[[[-2,-1],[2,1]]	geste2D	App
		sonore	[[[-2,-1],[2,1]]	sonore	App
		graphique	[[[-2,-1],[2,1]]	graphique	App
		pk	[[[-2,-1],[2,1]]	pk	App

FIG. 5.11 – Configuration du modèle sensitif (gauche) et décisionnel (droite).

Pour l'analyse durant la simulation, SIHMM fournit une vision en 3D des déplacements, des interactions, associés à un affichage graphique du contexte interne de l'utilisateur et de ses décisions en terme d'interaction avec le système interactif. Pour l'ana-

lyse statistique des résultats, les fichiers XML correspondant contiennent une description datée des actions entreprises par l'utilisateur ainsi que la représentation du contexte au moment de chaque prise de décision.

5.3 Conclusion

Ce chapitre a proposé l'usage d'abstractions, de métaphores et d'un apprentissage pour l'autonomisation d'un modèle. Il illustre assez bien la notion de simulation participative car, avec SHIMM, l'ergonome construit sa simulation, peut modifier la carte cognitive de l'utilisateur, supprimer une modalité et constater les résultats *en-ligne*. La combinaison des métaphores cognitives et connexionnistes est envisagée très conceptuellement par certains chercheurs en intelligence artificielle et en science cognitive pour investir le problème de l'ancrage des symboles [113, 73]. Ici, pragmatiquement, elle a été réalisée au travers de l'usage conjoint d'un système à base de règles et de cartes cognitives. Le *contexte personnel* est une abstraction mettant en place une extériorité en limitant le nombre de symboles reflétant l'état de l'agent. On retrouve ici les notions développées au chapitre 2. Enfin, le mécanisme de *Chunking* permettant la construction de routines comportementales "à force d'usage" illustre une autonomisation par apprentissage.

Ce travail amène de nombreuses réflexions sur l'évaluation par simulation et les simulations participatives : les tests effectués semblent moyennement pertinents. De façon caricaturale, la question peut se poser de savoir s'il est bien utile de modéliser tout ce système si cela permet de constater que lorsqu'il y a du bruit, il n'est pas possible d'entendre son téléphone ! D'où vient le problème ? Certainement de la faible complexité rencontrée dans les exemples traités. En fait, l'évaluation d'usage est confrontée à la complexité : complexité des interactions parallèles multimodales, complexité des situations. Les ergonomes travaillent à partir de scénarios d'usage pour imaginer des situations typiques, singulières. Par conséquent, il nous faut rendre compte de cette complexité et de cette singularité pour montrer l'intérêt de l'usage des simulations, exhiber des comportements non triviaux et trouver des failles dans les mécanismes d'interaction. Il nous semble alors moyennement intéressant de faire des statistiques d'usage sur de nombreuses simulations, sauf s'il s'agit de mesurer une difficulté moyenne pour un utilisateur moyen. A l'inverse, nous cherchons à multiplier les simulations pour trouver un cas particulier d'usage impossible ou difficile. Ces cas sont particuliers car non envisagés trivialement par l'ergonome ou le développeur de système interactif. Ils ne seront pas rendus explicitement par une validation formelle qui implique souvent une simplification.

De façon plus générale et pour recentrer le propos sur les simulations participatives, la figure 5.12 illustre les possibilités de la simulation des modèles : les comportements possibles sont représentés par le cercle A, tandis que les différents cercles C correspondent à ce que peut exhiber un modèle. Un modèle complexe et souple (Cn) permet de recouvrir une plus grande surface du cercle A (zone B) mais peut en sortir, un modèle plus précis, ne couvrira qu'une partie de A très fine (C1) tandis qu'un modèle réductionniste qui simplifie selon un point de vue particulier, en couvrira une partie

plus large mais moins complexe (C3). Notre approche consiste à agrandir C au risque de sortir de A. Pour atteindre cet objectif dans le cadre de SHIMM, nous devons complexifier les scénarios, les interactions et les capacités de l'utilisateur virtuel.

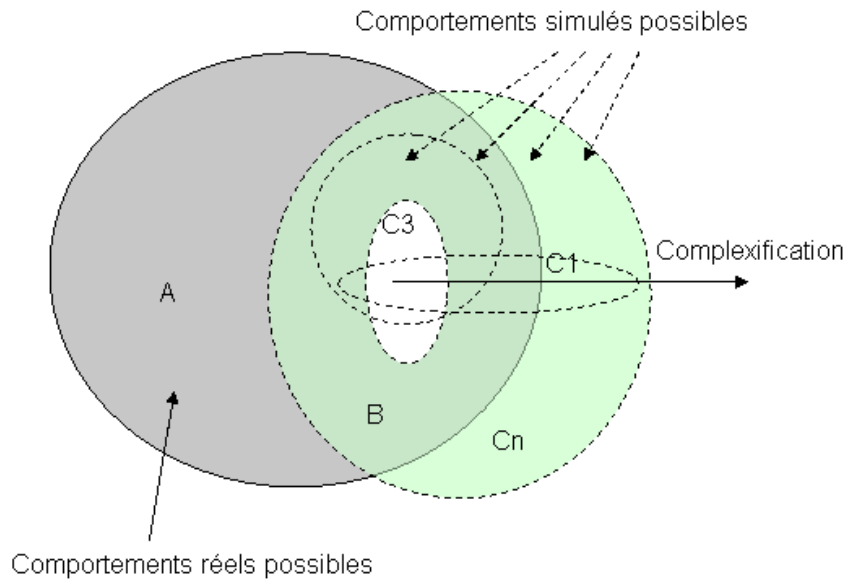


FIG. 5.12 – Complexité simulées versus complexité réelle

Pour l'utilisateur, il faut pouvoir lui fixer plusieurs buts à atteindre en parallèle, pas forcément en rapport avec le système interactif. Il faut augmenter son autonomie, lui permettre d'agir sur d'autres éléments que ce système pour résoudre un problème d'interaction. Une partie de ces perspectives est actuellement traitée dans le cadre de la thèse de ROMAIN BÉNARD qui propose une modélisation beaucoup plus riche du contexte pour la prise de décision en situation dynamique collaborative.

Cet outil a été utilisé et développé en partenariat avec des ergonomes de France-Telecom et de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse. Il a été réalisé dans le cadre de la thèse de LAURENT LE BODIC [101], présenté lors des réunions du groupe de travail MFI [1] et a fait l'objet des publications [105, 103, 106, 102, 104, 42].

Chapitre 6

Perspectives

6.1 Réflexions

J'ai proposé tout au long de ce mémoire un point de vue particulier sur les travaux effectués, relativement à l'usage d'abstractions, de métaphores et d'apprentissages pour l'autonomisation des modèles. En d'autres termes, sur la nécessité et la difficulté du choix des représentations pour l'élaboration de simulations participatives. Cet exercice est délicat car les travaux décrits portent sur des domaines et des applications dont la diversité est consécutive aux aléas de la vie d'un laboratoire. Certains ont été développés dans le cadre de collaborations scientifiques, avec des participations à des groupes de travail ¹, d'autres s'intègrent au sein de projets industriels. éloigné.. L'autre écueil est d'être terriblement général et de n'évoquer qu'un problème de modélisation classique, si ce n'est banal (le choix des représentations) souvent mis à l'écart par les aspects formels ou techniques des réalisations, alors qu'il est un point clé, constituant la base des résultats. Toutefois, le cadre des simulations participatives focalise la modélisation sur le fait que chacun des modèles doit être qualifiable d'autonome pour établir des propriétés d'ouverture, de compréhension et de substitution. Comme nous le précisons au chapitre 1, cette autonomie dépend du sens que l'utilisateur veut apporter au comportement du modèle. Pour cela, métaphores et abstractions permettent d'établir un compromis entre une description précise mais complexe et une formulation simpliste mais non crédible.

Arrivé à ce stade, il faudrait franchir l'étape suivante qui consiste à généraliser ces modèles. Cependant, ceci semble contradictoire avec l'instabilité de la notion d'autonomie. En fait, j'identifie 2 axes paradigmatiques distincts : la représentation externe la plus riche possible de l'environnement pour *écrire* une autonomie et la construction la plus interne possible d'une extériorité pour permettre de *construire* une autonomie. Ainsi, au chapitre 4, nous étions obligés de représenter avec la sémantique la plus précise possible, les caractéristiques de l'environnement et du domaine d'application pour analyser les erreurs de l'élève et pour l'aider. Les environnements virtuels informés sont alors une possibilité pour aborder cette problématique. A l'inverse, lors du chapitre 2, nous avons mentionné l'importance de l'extériorité d'un modèle pour réaliser son autonomie. Cette extériorité a été construite à l'aide de symboles internes au modèle, reflétant de façon indirecte l'environnement. L'autonomie sera d'autant plus importante que ces symboles référencent d'autant moins l'environnement. Ces deux points de vue constituent deux orientations différentes qui ne sont pas sans lien avec les deux

¹en particulier les groupes ASA et MFI du GDR I3

définitions du terme “représentation” illustrées classiquement par les métaphores diplomatique et théâtrale [242], [151, 77]. Pour la première, la représentation est un dédoublement le plus fidèle possible d’un référent prédonné, *l’élue représente le peuple*. Pour la deuxième, ce n’est plus une réplique plus ou moins exacte, mais une activité qui rend présent, la *(re)-présentation de l’acteur*. La majorité des travaux développés dans notre équipe sont proches du premier point de vue, indispensable pour mener à terme des applications concrètes de la réalité virtuelle. En effet, seule une représentation explicite de l’environnement débouche rapidement sur des comportements riches et complexes qui faute de pouvoir être spécifiés, peuvent être appris. Cependant, l’autonomie écrite n’est plus source d’étonnement, donc de crédibilité (voir chapitre 1). De façon complémentaire, je vois les agents stressés (chapitre 3) et l’utilisateur virtuel d’un système interactif (chapitre 5) comme des compromis entre les deux axes qui viennent d’être mentionnés². Ceci est illustré par la figure 6.1 par un positionnement de ces approches sur un plan qu’il faudrait pouvoir *tordre* en rendant un peu d’autonomie aux comportements complexes et un peu de richesse comportementale aux comportements sans représentation explicite de l’environnement. Sur cette figure, trois axes ont été définis : celui de l’autonomie (abscisse) qui dépend de l’usage explicite ou non de la représentation de l’environnement, celui de l’usage d’un apprentissage artificiel (profondeur) et enfin celui de la richesse comportementale résultante (ordonnée). On retrouve les agents intentionnels à une position indiquant qu’ils ne possèdent qu’une faible représentation explicite de leur environnement et que leur comportement est plutôt réactif. A l’opposé, le tuteur adaptatif possède un modèle explicite de l’environnement et est doté d’un apprentissage lui permettant d’exhiber des comportements plus complexes et considérés plus cognitifs.

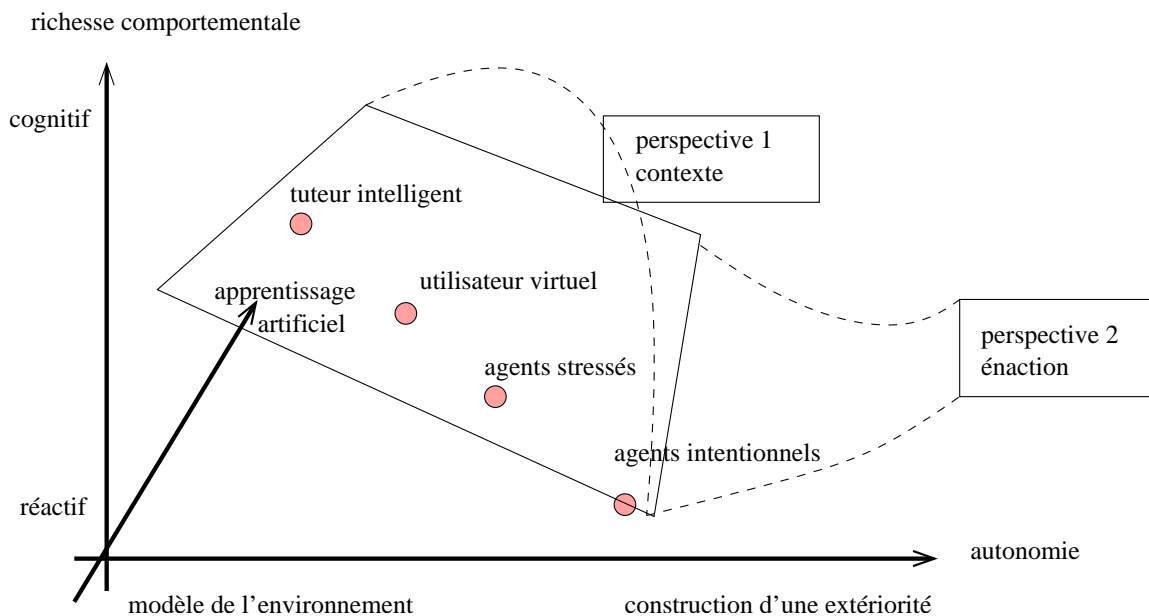


FIG. 6.1 – Regard sur les approches abordées

²L’extériorité des agents stressés est reflétée par leur charge cognitive; la dynamique de celle-ci peut-être vue comme une mémoire donc un apprentissage minimal. L’extériorité de l’utilisateur virtuel est intégrée dans le *contexte personnel*.

Nous proposons donc deux pistes : la première consiste à paufiner l'équilibre entre représentation de l'environnement et usage de variables internes. Pour cela, il faut des applications complexes et nous nous intéressons désormais à des simulations immersives mettant en avant les aspects collectifs et perceptifs de la crédibilité comportementale. L'objectif est donc de tirer le plan de la figure 6.1 vers le haut. Ces travaux proposent d'investir la notion de contexte, déjà implicitement présente dans la métaphore des agents stressés ou l'utilisateur virtuel, sans avoir été approfondie, pour créer une extériorité plus élaborée. Ils font l'objet de la thèse en cours de ROMAIN BÉNARD. Nous résumerons les concepts clés qui y sont associés dans la section 6.2.

La deuxième piste est plus exploratoire : elle s'engage sur la voie des *non représentations* de l'environnement qui pourrait être davantage explorée dans l'équipe, car, il me semble qu'à son tour, elle peut permettre de *tordre* le plan de la figure 6.1 cette fois-ci en le tirant vers *l'autonomie construite*. En fait, j'apprécie les changements de point de vue³, source d'enrichissement et de créativité. Ainsi, durant ces dernières années, je me suis intéressé aux sciences cognitives⁴ qui n'ont pu être investies dans le cadre de nos travaux pour des raisons pragmatiques. Il est pourtant naturel, lorsque l'on travaille sur l'autonomie de modèles de s'intéresser à la construction de la connaissance en général et à celle de l'homme en particulier. n'est toujours évident dans le cadre de projets liés à des applications d'échelle industriel, mais il me semble qu'assez naturellement, mon parcours et mes affinités scientifiques m'y mènent. JACQUES TISSEAU m'a fait découvrir la théorie de l'énaction proposée par FRANCISCO J. VARELA. Celle-ci remet en question la notion de représentation, pré-requis de nos modèles au sein des simulations participatives et de l'intelligence artificielle classique. Cette proposition est l'objet de travaux récents et la source de nouveaux thèmes de recherches comme peuvent le montrer la création d'une école thématique du CNRS sur l'énaction⁵ ou, dans le domaine des interactions homme-machine, le réseau *Enactive Network*⁶. Au CERV, la thèse de MARC PARENTHOËN [124] utilise les concepts de l'énaction pour mettre en place une simulation phénoménologique de la mer. Au regard des expériences passées, de mon intérêt pour ces thématiques, de l'élan qui leur est donné aujourd'hui, je souhaite développer des recherches sur ces aspects en les intégrant à l'autonomisation des modèles des simulations participatives. Je développerais les concepts et les lignes directrices associées à cette thématique dans la section 6.3.

³Pour certains, c'est un mauvais penchant !

⁴J'ai eu la chance de partager mon bureau avec JEAN-YVES GUINARD, féru de sciences cognitives qui m'a à cet égard, beaucoup aidé.

⁵<http://liris.cnrs.fr/enaction/index.html>

⁶<http://dev.enactivenetwork.org/>

6.2 Le contexte pour l’abord des situations dynamiques collaboratives

Il existe de nombreuses définitions de la notion de contexte⁷. La définition courante qui se rapproche de notre perspective est : *l’ensemble de circonstances liées où un phénomène apparaît*⁸. Ainsi, le contexte est un point clé des simulations phénoménologiques. Nous souhaitons l’explorer dans le prolongement des travaux sur la résolution distribuée de problèmes (chapitre 3) et sur l’apport d’une aide pédagogique dans les environnements virtuels de formation (chapitre 4). Pour cela, nous nous intéressons à la simulation et à l’apprentissage des situations dynamiques collaboratives. Celles-ci se rencontrent dans des domaines tels que le travail en équipe sous pression temporelle (sport collectif, équipe de sécurité, ...) [282, 171]. Elles peuvent être vues comme une résolution distribuée de problème mais se distinguent de nos travaux précédents selon les aspects suivants :

- La description des décisions : le scénario des actions et interactions ne peut être décrit à l’avance comme c’est le cas avec un travail procédural. L’autonomie des protagonistes y est bien plus souple. La sélection des actions est opportuniste et il est difficile de prévoir à l’avance les éléments à considérer pour une prise de décision [190].
- L’aspect temporel : la prise de décision des entités est effectuée sous pression temporelle. Ceci implique des modèles réactifs capables de prendre des décisions en l’absence d’informations.

A cela, il faut ajouter les contraintes pédagogiques. L’exemple support de ce travail est tiré du cadre des sports collectifs qui impose d’introduire des critères psychologiques et une forme d’aide pédagogique spécifique. Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés à la notion de raisonnement à base de contexte telle qu’elle est vue en intelligence artificielle [69]. Des chercheurs tels que ROY M. TURNER ont étayé l’idée selon laquelle l’appréhension de la sensibilité au contexte lors d’un raisonnement, doit faire l’objet d’attention approfondie en intelligence artificielle [153]. Dans ce domaine, le contexte est alors pragmatiquement identifié comme *l’ensemble des conditions significatives et des influences environnantes qui font qu’une situation est unique et compréhensible*. [127], ou encore *l’ensembles des éléments qui contraignent la résolution d’un problème sans y intervenir directement* [185]. Nous proposons donc de définir un modèle de contexte propre à la prise de décision en situation dynamique collaborative, en nous basant sur les travaux de la psychologie [309, 239], pour à la fois autonomiser des agents virtuels et fournir un support pédagogique explicatif. L’étude du contexte permet alors de définir une abstraction autorisant une description réactive des comportements en se basant sur des cas abordant simplement des situations complexes. Ces cas peuvent être adaptés ou appris par expérience. Ainsi, les objectifs à atteindre sont les suivants :

- Proposer un modèle de contexte avec des justifications psychologiques et l’appliquer à un sport particulier (en l’occurrence, le football). Ce travail est effectué en

⁷PATRICK BRÉZILLON en a identifié 165 [16]. Initialement c’est un terme linguistique : *ensemble du texte qui entoure un extrait et qui éclaire son sens*.

⁸C’est une des définitions du dictionnaire *Trésor de la Langue Française*.

collaboration avec des psychologues du sport de l'Université de Bretagne Occidentale. Le contexte doit refléter à la fois des aspects dynamiques d'une situation et son historique, le tout de façon synthétique. Pour cela, la notion de tendance sur les propriétés élaborée au chapitre 2 et la métaphore émotionnelle présentée au chapitre 3 peuvent être source d'inspiration.

- Proposer une architecture de prise de décision s'appuyant sur ce modèle. L'application mettra en œuvre des joueurs virtuels dont la crédibilité comportementale sera évaluée par des spécialistes. Le raisonnement à base de cas offre l'avantage de permettre une correction du modèle par ces mêmes spécialistes à l'aide d'un apprentissage *en-ligne* par démonstration. Cette possibilité a été évaluée lors du stage de master recherche de MATTHIEU AUBRY [6].
- Montrer que le contexte, utilisé pour la prise de décision des entités artificielles, peut également servir de base pour expliquer cette dernière [15]. Il devrait permettre de *suivre* l'avatar d'un joueur réel pour extraire les éléments pertinents qu'il doit ou aurait dû prendre en compte et évaluer ses intentions possibles. En fait, la prise de décision dans ces situations fait apparaître la notion d'affordances qui font parties du contexte et qui sont des données pouvant être exploitées à des fins pédagogiques, grâce à la réalité virtuelle, pour influencer le point de vue de l'apprenant (chapitre 4).

Comme nous le mentionnions précédemment, ce travail est déjà en cours : une première architecture de sélection d'action pour les joueurs virtuels permettant de mettre évidence des comportements collectifs simples mais crédibles a été proposée. Il reste cependant à préciser de nombreux éléments sémantiques du modèle, nécessitant encore des échanges avec les psychologues et à élaborer les aides pédagogiques associées. Le lecteur intéressé par ces premiers travaux pourra consulter les publications [7, 8, 9].

6.3 Autonomisation et éniactiion

L'éniactiion est un principe général que l'on retrouve à différentes échelles. Inspiré de la biologie, on peut le transposer aux sociétés humaines ou animales comme aux modèles informatiques, objectif engagé par certains chercheurs. Evidemment, un tel travail nécessite un important changement de point de vue, tant à cause du paradigme proposé que des objectifs à atteindre. En effet, traitant d'aspects fondamentaux, il nous sera difficile de proposer des applications aussi concrètes que celles décrites dans ce mémoire. C'est en toute connaissance de cause qu'il faut s'y engager. Je propose donc dans un premier temps, de décrire la théorie de l'éniactiion puis de donner les pistes des recherches que je souhaiterais poursuivre dans cette optique.

6.3.1 Définition de l'éniactiion

Pour définir l'éniactiion, je propose de la positionner relativement aux principaux courants des sciences cognitives que sont le cognitivisme et le connexionnisme. Ce positionnement est résumé par le tableau 6.1.

Courant des Sciences Cognitives	Métaphore	Concepts	Modèles
Cognitivism	ordinateur	symboles, inférences	logiques
Connexionnisme	cerveau	émergence, auto-organisation	réseaux de neurones, systèmes multi-Agents
Enactionnisme	vivant	clôture opérationnelle, autopoïèse, couplage structurel	?

TAB. 6.1 – L’énaction en science cognitive, inspiré de [71] et [159].

Hérité de la cybernétique, le cognitivism postule que la cognition est manipulation de symboles représentant le monde sur lequel il faut raisonner [276]. La métaphore du fonctionnement de l’esprit est alors celle de l’ordinateur. Un cercle vertueux entre informatique et cognitivism les a enrichis mutuellement. C’est sur les bases du cognitivism que s’appuient les logiques telles que les BDI (section 2.3). Certains chercheurs en sciences cognitives et en philosophie de l’esprit ont identifié les limites du cognitivism [143] [201, 308]. L’exemple le plus célèbre est celui de la chambre chinoise de JOHN SEARLE qui illustre l’absence de sens pour une machine et son incapacité à *comprendre* ce qu’elle fait. Partant de cette notion de sens, il est difficile, pour les sciences cognitives, d’échapper au problème de la conscience et de son lien à la cognition et à la matière⁹ [144], problème qui s’éloigne de nos préoccupations.

Le connexionnisme trouve également sa source dans la cybernétique [284] mais a été longtemps occulté par le cognitivism puis bénéficié d’un regain d’attention suite au constat des limites de ce dernier pour rendre compte de différentes observations surtout d’ordre neurologique telles que les aspects parallèles et adaptatifs du cerveau. Pour le connexionnisme, la métaphore du fonctionnement de l’esprit est donc le cerveau (voir tableau 6.1). Celui-ci ne possède ni règle, ni dispositif logique central de traitement. Sans nier la notion de représentations, le connexionnisme considère que celles-ci émergent d’interactions et par auto-organisation d’entités simples dont le nombre fait la force. En informatique, les réseaux de neurones artificiels et les systèmes multi-agents sont le support de ces concepts qui sont également repris par MINSKY avec sa métaphore de la société de l’esprit [253]. Récemment, les réseaux de neurones artificiels sont passés d’une vision de type “flux informationnel” allant des entrées vers des sorties à une vision plus complexe ne distinguant plus clairement ces deux notions et axée sur la corrélation et la résonance du réseau en présence de signaux extérieurs qui participent à cette résonance mais sont loin d’en être les seules causes [81, 33]. Ils reprennent des constations issues des neurosciences [54].

⁹Le cognitivism pose alors problème car il sépare la conscience de l’intentionnalité [227].

L'énaction est une approche dynamique de la constitution des connaissances qui trouve son inspiration en biologie. On ne peut la séparer de la notion d'histoire du système ou plutôt d'histoire du lien entre un système et son environnement. Ainsi, la métaphore est celle du vivant, les concepts de base sont le *couplage structurel*, la *clôture opérationnelle* et l'*autopoïèse* que nous allons présenter page 88. Par contre, il n'existe pas à notre connaissance de modèles fermements établis (voir tableau 6.1). Pour illustrer la théorie de l'énaction, prenons un exemple tiré de *l'inscription corporelle de l'esprit* [156]. Cet exemple décrit la co-dépendance entre la couleur de certaines fleurs et la vision des abeilles. L'évolution de celles-ci s'est faite progressivement par spécialisation de certaines de leurs tendances biologiques : la tendance de l'abeille à percevoir l'ultraviolet et celle de la fleur à *émettre* de l'ultraviolet. Ainsi, le système s'est progressivement orienté vers un équilibre possible (polénisation contre nourriture). Cette notion de possibilité est importante, elle distingue l'énaction de la sélection naturelle en préférant la notion de viabilité à celle d'optimisation : le couplage était viable donc il existe. C'est ce que VARELA nomme la *dérive naturelle*. La force de cette métaphore est qu'elle peut s'étendre à la cognition (la propriété de percevoir l'ultraviolet est une forme simple de capacité cognitive). Ainsi, notre connaissance est inscrite dans notre corps qui a évolué par le biais d'interactions avec notre environnement¹⁰. L'environnement nous a façonné tout comme nous l'avons façonné.

De fil en aiguille, cette circularité fait de nous et de notre environnement ce que nous sommes aujourd'hui et il nous serait difficile de revenir en arrière. Il n'est nul besoin de représentations pour connaître ; des notions telles que les couleurs ou les sons sont dénuées d'existence sans nos yeux et nos oreilles, leur co-dépendance crée la vue et l'ouïe. A cet égard, l'énaction se réclame de la phénoménologie¹¹, [77, 88], [268] car elle propose de remettre l'expérience humaine au cœur du débat des sciences cognitives, elle relativise l'objectivisme du monde perçu (les représentations que j'ai du monde correspondent à ce dernier qui est prédonné) sans basculer dans le subjectivisme (tout est imagination).

L'énaction trouve écho en anthropologie car elle propose une vision du corps et des outils qu'il façonne comme un prolongement de l'esprit et la construction d'une culture [77, 83, 84]. Les similitudes avec l'approche constructiviste de la cognition de JEAN PIAGET sont également fortes et certains sociologues ont opéré à leur tour des rapprochements avec leur domaine [202]. L'art est également concerné, particulièrement lorsqu'on aborde le lien entre le corps et l'instrument [29]¹² ou les mouvements du corps et ceux d'objets graphiques virtuels dont la modélisation est sujette aux difficultés des

¹⁰La notion d'inscription corporelle de l'esprit peut être illustrée de façon simpliste par les robots marcheurs passifs [251]. Ceux-ci exhibent des comportements de marche, provoqués par leur structure (poids, frottement, équilibre) sans moteur ni capteur (voir http://www-personal.umich.edu/~artkuo/Passive_Walk/passive_walking.html).

¹¹Même s'il existe *des phénoménologies*, étymologiquement, celle-ci tente d'explicitier ce qui se manifeste dans l'expérience humaine, à la première personne [82].

¹²Pianiste, je suis sensible à la notion d'incorporation de l'instrument à l'instrumentiste, je vois également des corrélations entre l'énaction et les improvisations que nous tentons avec mes amis musiciens.

approches phénoménologiques [109]. Cette relation corps/objets virtuels s'étend à la construction en général des connaissances par le biais d'interactions entre l'homme et la machine et le développement d'interfaces immersives dédiées, investie par le réseau "Enactive network" mentionné précédemment. Le statut de l'interaction, des boucles sensori-motrices et de l'ordinateur y est alors réinvesti [108]. Enfin, dans le contexte de la modélisation, le travail de MARC PARENTHOËN apporte un point de vue *énactif* sur le couplage entre l'homme et la machine [124].

A l'énumération de ces notions et de ces domaines, nous pourrions être pris de vertige si ce n'est de doute. F. VARELA explique d'ailleurs que l'énaction déroute car elle remet en cause la notion de fondement, propre à notre vision occidentale des choses¹³. Cependant, cette posture est issue de travaux conséquents, désormais acceptés, et de l'élaboration de concepts très concrets que sont l'autopoïèse, le couplage structurel et la clôture opérationnelle [155]. Nous allons maintenant expliciter ces dernières en vue de nos perspectives.

A L'autopoïèse

F. VARELA et H. MATURANA ont formulé une conceptualisation du vivant, opérant un changement du point de vue classique (système entrée/sortie, néo-darwinisme) en mettant en avant l'autonomie et l'autoreproduction organisationnelle. Ainsi, un organisme vivant est autonome dans le sens où il reproduit perpétuellement les éléments qui le constituent. Son autonomie est sa capacité à vivre. L'organisme n'est pas l'ensemble de ses éléments (qui apparaissent et disparaissent sans cesse comme nos cellules ou les composants de nos cellules) mais plutôt l'organisation de ceux-ci qui se maintient et permet de définir une frontière entre ce qu'est l'organisme et ce qu'il n'est pas. L'autopoïèse est cette capacité de se produire soi-même.

B Le couplage structurel

Le couplage structurel est le concept reliant l'autopoïèse à l'environnement de l'organisme. L'organisme étant en perpétuelle régénération, celui-ci subit des modifications (ou déformations) de son organisation liée à sa structure propre et à la pression de l'environnement. Ces modifications ont alors un impact possible sur l'organisme et sur l'environnement. Il y a donc une plasticité du système. Si l'ensemble est viable, cela veut dire que les modifications de la structure de l'organisme compensent celles de l'environnement et que l'autopoïèse est préservée. Ainsi, l'histoire continue avec un organisme et un environnement qui ont évolués de façon co-dépendante. La notion d'entrée/sortie n'a plus lieu d'être car les modifications observées sont dues au moins autant au fonctionnement de l'organisme qu'à l'environnement et surtout, il est impossible, au niveau de l'organisme, de différencier les deux cas. Il n'y a donc pas de représentation de l'environnement par l'organisme à utopoiétique élémentaire.

¹³Il préconise de s'intéresser aux traditions philosophiques orientales qui ont investi l'absence de fondement depuis des siècles et expérimentent celle-ci scientifiquement par l'étude de la conscience et de l'absence de soi.

C La clôture opérationnelle

La clôture opérationnelle est la généralisation de l'autopoïèse à d'autres domaines que les mécanismes physico-chimiques ou biologiques. Ainsi, il est possible de parler de systèmes opérationnellement clos dès qu'ils forment une organisation de processus dépendant récursivement les uns des autres pour se régénérer et qu'ils peuvent être identifiés comme une unité reconnaissable dans le domaine des processus¹⁴. La *thèse de la clôture* est que tout système autonome est opérationnellement clos.

6.3.2 Enaction et cognition

L'autopoïèse offre un regard différent sur la notion de boucle sensori-motrice. Dans [13], les auteurs décrivent l'exemple d'une cellule qui de par sa structure, aura tendance à se déplacer vers des zones chargées en sucre et à préserver ainsi son autopoïèse. C'est le début de la cognition qui est ancrée dans la boucle sensori-motrice de l'organisme, inséparable de son environnement, ce qui fait dire à JOHN STEWART dans [87] : "la cognition, c'est la vie". Pour la cellule, cette cognition qui semble minimale, a lieu dans un domaine particulier appelé domaine cognitif qui reflète l'ensemble des déformations que peut subir l'organisme sans perdre son autopoïèse. La généralisation de l'autopoïèse à des organismes composés d'autres organismes autopoïétiques (organismes autopoïétiques d'ordre supérieur) amène à considérer d'autres domaines cognitifs. Ainsi, le système nerveux, dont le cerveau fait partie, est un système autopoïétique en interaction avec l'organisme dont il est lui même un composant ; *il est le lieu de couplage circulaire entre mouvements corporels et modulations sensorielles* [304].

Tout comme les modifications de structures des organismes autopoïétiques simples n'ont pour *rôle* qu'une préservation de l'autopoïèse en présence d'un environnement changeant, l'action n'a pour *rôle* que la préservation du système, l'obtention d'une future perception. Cette boucle est ancrée dans la structure de l'organisme suite à une longue histoire de co-dépendance. L'énaction définit donc la cognition comme *l'histoire du couplage structurel entre un système autopoïétique et son environnement*.

6.3.3 Autopoïèse artificielle

A Posons quelques balises

Au travers de la présentation précédente, j'espère avoir montré les liens entre l'énaction qui est un principe général, l'autopoïèse qui en est la source théorique biologique et la clôture opérationnelle qui en est sa généralisation. La transposition de tous ces concepts aux entités artificielles autonomes est un travail délicat. Une question importante est d'évaluer l'impact du remplacement de l'autopoïèse biologique par un autre principe sur la possibilité d'obtenir un comportement artificiel. Quelle clôture opérationnelle artificielle peut être mise en place et dans quelle mesure cela est-il réalisable ? En effet, il faut se garder de parler d'*enaction artificielle*

¹⁴Une cellule est opérationnellement close dans l'espace matériel et le domaine physico-chimique. Mais ce principe est transposable à des domaines aussi divers que le système immunitaire, le système nerveux (et donc la cognition de haut-niveau) ou les organisations humaines.

qui est un oxymoron¹⁵. F. J. VARELA mentionne la notion de domaine phénoménal qui existe dès qu'une unité (un système) peut subir des transformations. Le domaine physico-chimique est un domaine phénoménal. Les systèmes autopoïétiques opérant dans un domaine phénoménal donné engendrent de nouveaux domaines phénoménaux (par exemple, le domaine physico-chimique engendre le domaine biologique). Le virtuel s'appuie sur un domaine phénoménal numérique et symbolique, pas au sens du cognitivisme mais dans une perspective mécaniste. Il reste à voir s'il peut également engendrer d'autres domaines phénoménaux en rapport avec une application donnée. Dans ce contexte, le statut de l'interaction avec les utilisateurs est également à aborder.

Nous sommes bien conscients de la différence d'échelle de complexité entre un organisme vivant et un système artificiel. Il ne s'agit pas pour nous de simuler point par point les mécanismes biologiques pour mettre en évidence les phénomènes du vivant comme cela est effectué dans [187]¹⁶. Nous ne cherchons pas non plus à franchir d'innombrables étapes qui pourraient mener à l'élaboration d'une conscience artificielle [32]¹⁷.

De façon plus pragmatique, nous cherchons à **utiliser l'autopoïèse comme métaphore conceptuelle**, pour des applications informatiques bien identifiées, un peu à la façon dont les algorithmes génétiques ou les réseaux de neurones artificiels l'ont été. Nous pouvons trouver des analogies à cette proposition dans le travail de SALIMA HASSAS [76] qui s'appuie sur la notion d'autopoïèse pour mettre en place des systèmes informatiques auto-organisant. Rappelons que F.J. VARELA a montré des exemples de clôture opérationnelle sur des cas aussi différents que le système nerveux ou les automates annulaires et il en a conclu des perspectives pour l'intelligence artificielle.

Si nous arrivons à mettre en place des simulations permettant d'élaborer des entités simples capables de préserver une clôture opérationnelle en présence d'un environnement perturbant ou d'un utilisateur, nous pourrions travailler sur la complexification des mécanismes implémentés dans un second temps.

B Approches similaires existantes

Avant d'aborder les problèmes concrets d'une telle mise en place, revenons à l'existant et aux travaux connexes à cette proposition. Parmi eux la *nouvelle intelligence artificielle* issue de la robotique comportementale, représentée par RODNEY BROOKS propose de se passer de représentation pour élaborer des robots autonomes [18]. L'architecture de BROOKS, basée sur des modules en concurrence, est loin d'être un système autopoïétique. Cependant, il est le premier chercheur en robotique à soumettre l'idée que *le monde soit sa propre représentation* et qu'il faille *bricoler* celle-ci en ne gardant que ce qui fonctionne. Il est également à l'origine de l'idée qu'un système artificiel doit

¹⁵Au même titre que l'*intelligence artificielle*.

¹⁶Les préoccupations des auteurs sont relatives à la possibilité d'autres formes de vies possibles dans l'univers.

¹⁷L'énaction entretient des rapports étroits avec la phénoménologie et avec la problématique de la conscience.

se concevoir comme un système entier, se comportant dans un environnement réel. Tous ces principes ramènent à l'énaction. Toujours en robotique, EZEQUIEL A. DI PAOLO s'intéresse plus fondamentalement au lien entre son domaine et l'énaction [122]. Il postule une approche inspirée des organismes (du domaine phénoménal des organismes) et non des phénomènes biologiques pour doter les robots d'une *réelle intentionnalité*. Il propose des architectures de robots qui, comme celle de BROOKS ne possèdent pas de représentation explicite de l'environnement mais se prêtent à la possibilité d'évolution co-dépendante [121].

De même, nous avons mentionné au chapitre 2 l'approche ANIMAT qui suit l'esprit de la robotique comportementale dans le domaine de la simulation. Le comportement animal en est généralement la source d'inspiration et les modèles élaborés s'inscrivent la plupart du temps dans un schéma sensori-moteur de type entrée/sortie, souvent à base de réseaux de neurones ou de systèmes de règles. Certains chercheurs de cette communauté émettent des réserves sur la dérive conceptuelle de ces architectures qui s'éloignent des préceptes initiés par BROOKS [70]. Ils ont proposé de sortir de ce schéma par le biais de l'*approche dynamique de la cognition artificielle* qui met en avant l'histoire du système et reprend les grandes lignes des principes exposés plus haut. Quelques-uns de ces travaux sont présentés dans [71]. Ils sont constitués de propositions concrètes, comme la mise en place d'un modèle dynamique de sélection d'action non définies a priori [146]. D'autres sont plus théoriques et font référence aux systèmes complexes et à la théorie du chaos pour montrer des caractéristiques intéressantes de certaines architectures [40, 10].

L'ensemble de ces travaux constituent le socle sur lequel repose notre perspective d'autonomisation des modèles.

6.3.4 Lignes directrices

Les principales lignes directrices que nous identifions sont les suivantes :

A Complexifier un système autopoïétique minimal

Il est possible de simuler un système artificiel autopoïétique minimal. Dans [13], un tel système est décrit, constitué de symboles transformés par des fonctions¹⁸. L'exercice explicatif est réussi mais il ne met pas en place des mécanismes tels que l'évolution du système en présence d'un environnement le déformant. Pour cela, il faut déjà définir ce qui peut évoluer : est-ce la forme du système (la membrane) ou sont-ce les fonctions de transformation des symboles eux-mêmes ? A priori, les deux options sont possibles. La première correspond au fait que les processus générant le système sont modifiables.

¹⁸Dans cet automate, les processus du système sont différentes fonctions de transformation de symboles situés dans un espace bi-dimensionnel. Certains de ces symboles se lient et forment la frontière du système mais ne peuvent être générés qu'à partir d'une transformation d'autres symboles qui ne peuvent eux-mêmes apparaître qu'à l'intérieur du système (question de densité) et ce à partir des symboles de l'environnement. Or, les symboles constituant la membrane du système se désagrègent. Ils permettent de laisser entrer les symboles de l'environnement pour régénérer la frontière. Ainsi, le système s'auto-produit.

Selon la théorie, s'ils le sont, c'est à cause de la structure du système lui-même. Il faut donc trouver un lien entre la structure et les fonctions de transformation. Cependant, ceci ne règle pas le problème de savoir quelles modifications sont possibles? Peut-on générer de nouveaux symboles, un nombre différent de symboles, doit-on leur donner des caractéristiques dynamiques qui changeraient leur concentration en des points particuliers du système? La deuxième option impliquerait que les fonctions de manipulation de symboles correspondent à des phénomènes immuables tels qu'il en existe dans le domaine physico-chimique. Cette fois, les seules évolutions du système seraient sa forme. Si la forme joue un rôle vis à vis de l'environnement, nous opérons bien un changement de domaine phénoménal. Il nous semble raisonnable de commencer par une expérimentation telle que celle-ci et de montrer l'adaptation de la forme à l'environnement. Il faut alors créer un environnement ayant un pouvoir de pression sur celle-ci. Mais nous serions loin de la notion d'action sur l'environnement. Pour cela, il faut considérablement transposer les principes de l'autopoïèse à d'autres domaines cognitifs et phénoménaux. N'oublions pas non plus les défis techniques qu'implique la complexification d'un système autopiétique. Le développement des environnements virtuels complexes effectués au CERV nous montre régulièrement que ces défis ne sont pas des détails et qu'ils nécessitent une dextérité rare.

B Définir un domaine phénoménal

Dans les systèmes artificiels numériques, le domaine phénoménal correspond à l'espace des symboles manipulés par la machine. Les automates annulaires présentés dans [155] sont des exemples de systèmes autopoïétiques basés sur ce domaine. Les régularités propres à l'activité de ces automates font partie d'un autre domaine phénoménal émergent du premier. Le domaine phénoménal des simulations participatives ou de la réalité virtuelle ne sont pas du même ordre (déplacement, interaction ...) et le domaine phénoménal initial doit sans doute être d'un plus haut niveau que celui des symboles manipulés par la machine. Définir un tel domaine est délicat car il est sujet aux pièges du représentationnalisme : il ne faut pas confondre le domaine de l'application avec celui qui lui a permis d'émerger. L'exemple des créatures de KARL SIMS nous semble pertinent pour illustrer ce propos [148]. Celui-ci a montré des créatures virtuelles capables de marcher, sauter, nager ou voler. Elles sont constituées d'éléments rigides articulés entre-eux à l'aide de différentes liaisons mécaniques. Elles sont également dotées d'un système nerveux qui peut agir sur ces liaisons. L'ensemble est généré à l'aide d'une approche évolutionniste qui évalue les créatures dans un univers virtuel reconstituant les contraintes d'un monde physique. Ici, le comportement n'est pas énéacté mais on peut identifier un domaine phénoménal initial qui est celui de la simulation mécanique et un domaine résultant qui est celui de la marche d'animats.

C Définir un domaine cognitif

Le domaine cognitif est l'ensemble des déformations que peut subir un système sans perte d'autopoïèse (ou de clôture opérationnelle). Comment définir des domaines cognitifs pertinents dans nos simulations? Quels sont les éléments qui doivent être générés par la clôture? Cette *plasticité* structurelle des systèmes est au centre de leur performance cognitive et il faut l'aborder sous l'angle de nos simulations. Il faut, idéalement

qu'elles permettent au domaine cognitif d'évoluer pour énoncer des comportements plus complexes.

D Etablir un couplage et des co-dépendances

L'environnement d'une entité autonome doit perturber et déformer celle-ci. La définition du domaine cognitif peut permettre celle des perturbations possibles et donc celle de l'environnement ou des interactions avec un utilisateur. Ceci ne mettra en place un couplage structurel que si l'environnement, en retour subit des modifications qui auront une influence sur les futures déformations de l'entité. Il faut donc établir des exemples de modèles co-dépendants, comme cela est réalisé dans [99] pour simuler l'évolution d'un éco-système artificiel.

E Proposer un positionnement théorique

Enfin, il est nécessaire d'établir des caractérisations théoriques de nos systèmes. Par exemple, il nous semble que s'il on s'abstrait des notions de reproductions des éléments du système, le concept de clôture opérationnelle est proche de celui de système complexe adaptatif [274]. C'est pourquoi des chercheurs comme PAUL BOURGINE tentent de positionner l'autopoïèse artificielle relativement à ces systèmes [13]. D'autres ont proposés une reformulation de l'informatique théorique en montrant l'inadéquation des machines de Turing aux systèmes interactifs et en proposant une *Machine de Turing Persistante* [68] ou l'établissement d'une *théorie des processus interactifs indéfinis* [118]. Comment l'autopoïèse artificielle peut s'inscrire dans une telle démarche ?

F Collaborer

Brest est loin des centres névralgiques de la recherche française. Ceci demande souvent un effort particulier, comme la difficile articulation de nos contraintes temporelles avec la participation aux groupes de travail ou aux écoles thématiques qui sont des moments rares et privilégiés d'échange. Il est clair que les perspectives annoncées ne peuvent s'établir sans collaborations. Pour les perspectives relatives à la poursuite à court terme des travaux décrits ici, de nombreux liens ont été établis au cours des différentes thèses que j'ai co-encadrées. Par contre, concernant le développement de modèles autonomes autopoïétiques, il est nécessaire d'établir ceux-ci. Ma participation à l'école thématique "énaction et constructivisme" du CNRS constitue un premier pas. Le montage en cours, de projets subventionnés par la région ou l'état en est un deuxième. Enfin, il faut isoler certaines des lignes directrices précédemment citées pour tenter d'établir quelques réponses aux nombreuses questions qu'elles suscitent. C'est l'objet de la thèse de KRISTEN MANAC'H qui débute cette année.

6.4 Pour Conclure

Ce chapitre a montré deux perspectives de natures très différentes. La première, pragmatique, consiste à poursuivre nos efforts d'élaboration de modèles autonomes, en les complexifiant, pour des autonomies plus élaborées. Travail nécessaire pour préserver

le lien entre recherche et applications des simulations participatives. La deuxième, plus fondamentale, propose d'adopter un changement de point de vue, opéré par d'autres, pour tenter de dépasser les limites identifiées de nos précédents travaux. Ces lignes directrices peuvent sembler ambitieuses. Cependant, il faut les prendre pour ce qu'elles sont : des lignes directrices, qui nécessiteront d'être reformulées au fur et à mesure de l'obtention de résultats. On peut voir métaphoriquement un couplage entre résultats et lignes directrices. Cette conception énaactive de la démarche du chercheur doit relativiser nos ambitions car elle les positionne comme une possibilité parmi de nombreuses autres tout aussi viables. Elle nous indique également, parce que l'énaaction s'amorce à partir de mécanismes simples, qu'il faudra commencer nos expérimentations à l'aide d'exemples modestes.

Pour finir, j'ai résisté jusque là à la tentation de l'usage de citations et je préfère relater les déboires d'un certain BOUCHER DE PERTHES à méditer, [50] : tant que l'existence des hommes préhistoriques n'était pas installée dans les esprits, on pouvait passer à côté de fresques préhistoriques *sans les relever*. Ainsi lorsque BOUCHER DE PERTHES construit l'idée, à contre-courant, de leur existence, personne n'y crut. Il faut dire que BOUCHER DE PERTHES n'était pas connu et n'avait pas assez d'envergure. Il ne s'agit pas pour moi de me prendre pour un BOUCHER DE PERTHES, je n'en n'ai pas l'envergure. Cet exemple illustre plutôt la nécessité d'une autonomie pour avancer.

Références consultées

- [1] « Rapport de sythèse 2003-2005 des travaux du groupe MFI (Modèles Formels pour l'Interaction) du GDR I3, coordonné par Christophe Kolski et Philippe Mathieu ». disponible sur <http://mfi.univ-lille1.fr/mfi.html>, 2005.
- [2] G. AL-QAIMARI and D. MCROSTIE. « KALDI : a computer-aided usability engineering tool for supporting testing and analysis of human-computer interaction ». In J. VANDERDONCKT and A. PUERTA, editors, *Proceedings of the Third international Conference on Computer-Aided Design of User interfaces*, pages 337–355. Kluwer Academic, 1999.
- [3] J.M. ALLIOT and T. SCHIEX. *Intelligence artificielle et informatique théorique*. Cépaduès éditions, 1994.
- [4] R.C. ARKIN. *Behavior-Based Robotics*. MIT Press, 1998.
- [5] P. ARNAUD. *Des moutons et des robots*. Collection META. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2000.
- [6] Matthieu AUBRY. « Identification comportementale dans un environnement virtuel de formation ». Master recherche de l'Université de Rennes I, juin 2006, 2006.
- [7] Romain BÉNARD, Matthieu AUBRY and Pierre DE LOOR. « Context : An Information Medium for Dynamic and Collaborative Situations. ». In *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration, IRI - 2006, September 16 - 18, 2006, Waikoloa Village Hilton, Waikoloa, Hawaii, USA*, pages 226–231. IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, 2006.
- [8] Romain BÉNARD, Cyril BOSSARD and Pierre DE LOOR. « Context's modelling for participative simulation ». In *19th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference (FLAIRS-06)*. AAAI, 2006.
- [9] Romain BENARD, Pierre De LOOR and Jacques TISSEAU. « Understanding Dynamic Situations through Context Explanation. ». In *ICALT*, pages 1044–1046, 2006.
- [10] Hugues BERSINI and Pierre SENER. « *Approche dynamique de la cognition artificielle* », Chapitre Le chaos dans les réseaux de neurones, pages 45–58. Hermes, *Traité des sciences cognitives*, 2002.

- [11] C. BLUM and A. ROLI. « Metaheuristics in Combinatorial Optimization : Overview and Conceptual Comparison ». *ACM Computing Surveys*, 35(3) :268–308, 2003.
- [12] J. BLYTHE and W. S. REILLY. « Integrating reactive and deliberative planning for agents ». Technical report, School of Computer Science, Carnegie Mellon University. CMU-CS-93-155, 1993.
- [13] Paul BOURGINE and John STEWART. « Autopoiesis and Cognition ». *Artificial Life*, 10 :327–345, 2004.
- [14] P. BREZILLON. « Context in human-machine problem solving : A survey ». Technical Report 96/29, 1996. Laforia, Université Paris VI, Paris.
- [15] P. BRÉZILLON. « Context Dynamic and Explanation in Contextual Graphs ». In Patrick BLACKBURN, Chiara GHIDINI, Roy M. TURNER and Fausto GIUNCHIGLIA, editors, *Modeling and Using Context : Fourth International and Interdisciplinary Conference, Context 2003*, pages 94–106, Berlin, 2003. Springer-Verlag.
- [16] Patrick BREZILLON. « Vers d’autres contextes. Entretien avec Patrick Brézillon ». *Pratiques*, 129/130 :243–248, 2006.
- [17] Rodney A. BROOKS. « *A robust layered control system for a mobile robot* », pages 2–27. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1990.
- [18] Rodney A. BROOKS. « Intelligence without representation ». *Artificial Intelligence*, 47 :139–159, 1991.
- [19] C. BUCHE, R. QUERREC, P. CHEVAILLIER and G. KERMARREC. « Apports des systèmes tutoriaux intelligents et de la réalité virtuelle à l’apprentissage de compétences ». In *Cognito – Cahiers Romains de Sciences Cognitives (CRSC)*, 2(2) :51–83, 2006. ISSN 1267–8015.
- [20] C. BUCHE, C. SEPTSEAULT and P. DE LOOR. « Proposition d’un modèle générique pour l’implémentation d’une famille de systèmes de classeurs ». *Revue des Sciences et Technologies de l’Information, série Intelligence Artificielle (RSTI-RIA)*, 20(1) :63–88, février 2006.
- [21] Cédric BUCHE, Ronan QUERREC, Pierre DE LOOR and Pierre CHEVAILLIER. « MASCARET : Pedagogical Multi-Agents System for Virtual Environment for Training ». *Journal of Distance Education Technologies*, 2(4) :41–61, 2004.
- [22] Cédric BUCHE. « *Un système tutoriel intelligent et adaptatif pour l’apprentissage de compétences en environnement virtuel de formation* ». PhD thesis, Université de Bretagne occidentale, soutenue le 14 Novembre, 2005.
- [23] Cédric BUCHE, Ronan QUERREC and Pierre DE LOOR. « Système tutoriel intelligent pour l’apprentissage de travail procédural et collaboratif ». In Yves Lespérance et Abdel-Ilah Mouaddib ANDREAS HERZIG, editor, *Troisièmes Journées Francophones Modèle Formels de l’Interaction (MFI 2005)*, pages 205–210, Caen, mai 2005. Cépaduès. ISBN : 2.85428.697.9.

-
- [24] Cédric BUCHE, Ronan QUERREC, Pierre DE LOOR and Pierre CHEVAILLIER. « MASCARET : Pedagogical Multi-Agents System for Virtual Environment for Training ». In Toshiyasu L. KUNII, Seah Hock SOON and Alexei SOURIN, editors, *Proceedings of the International Conference on Cyberworlds*, pages 423–445, Singapore, 3–5 December 2003. IEEE Computer Society. ISBN : 0-7695-1922-9.
- [25] Cédric BUCHE, Ronan QUERREC, Eric MAFFRE, Pierre CHEVAILLIER and Pierre DE LOOR. « MASCARET : multiagent system for virtual environment for training ». In Simon RICHIR, Paul RICHARD and Bernard TARAVEL, editors, *vric03*, pages 159–164, Laval, France, 13–18 May 2003. ISBN : 2-9515730-2-2.
- [26] Cédric BUCHE, Cyril SEPTSEAULT and Pierre DE LOOR. « Les systèmes de classeurs. Une présentation générale ». *Techniques et Sciences Informatiques*, 9, 2006. à paraître.
- [27] M. D. BYRNE. « *the Human-Computer interaction Handbook : Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications* », Chapitre Cognitive architecture, pages 97–117. J. A. Jacko and A. Sears, 2003.
- [28] M. D. BYRNE and J. R. ANDERSON. « *Atomic Components of Thought* », Chapitre Perception and Action, pages 167–200. J. R. Anderson and C. Lebiere, 1998.
- [29] Claude CADOZ. « Retour au réel : le sens du feedback, rétroaction-interaction-énaction ». Le feedback dans la création musicale, rencontres musicales pluridisciplinaires, mars 2006. disponible sur [http ://www.grame.fr/RMPD/RMPD2006/](http://www.grame.fr/RMPD/RMPD2006/).
- [30] Roger CARATINI. *Vent de philo, sur les chemins de la philosophie*. Michel lafond, 1997.
- [31] S.K. CARD, T.P. MORAN and A. NEWEL. *The psychology of human-computer interaction*. Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- [32] Alain CARDON. *Modéliser et concevoir une machine pensante, Approche constructible de la conscience artificielle*. Automate Intelligent Edition, 2003.
- [33] Gail A. CARPENTER and Stephen GROSSBERG. « The ART of Adaptive Pattern Recognition by a Self-Organizing Neural Network ». *Computer*, 21(3) :77–88, 1988.
- [34] P. CHEVAILLIER, F. HARROUET and P. DE LOOR. « Application des réseaux de Petri à la modélisation des systèmes multi-agents de contrôle ». *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 33(4) :413–437, May 1999.
- [35] H. CHI, A. ROSIEN, G. SUPATTANASIRI, A. WILLIAMS, C. ROYER, C. CHOW, E. ROBLES, B. DALAL, J. CHEN and S. COUSINS. « The Bloodhound Project : Automating Discovery of Web, Usability Issues using the InfoScent Simulator ». Rapport interne, disponible sur citeseer.ist.psu.edu/655522.html, 2003.

- [36] R. S. CHONG and J. E. LAIRD. « Identifying dual-task executive process knowledge using EPIC-Soar ». In M. SHAFTO and P. LANGLEY, editors, *Proceedings of the Nineteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pages 107–112. Hillsdale, NJ : Erlbaum, 1997.
- [37] P.R. COHEN and H.J. LEVESQUE. « Intention is choice with commitment ». *Artificial Intelligence*, 42(3) :213–261, 1990.
- [38] A. CORNUÉJOLS and L. MICLET. *Apprentissage artificiel*. Eyrolles, 2002.
- [39] Antonio R. DAMASIO. *Spinoza avait raison*. Odile Jacob, poche, 2003.
- [40] Emmanuel DAUCÉ. « Approche dynamique de la cognition artificielle », Chapitre Systèmes dynamiques pour les sciences cognitives, pages 33–44. Hermes, *Traité des sciences cognitives*, 2002.
- [41] Pierre DE LOOR. « Du TTM/RTTL pour la validation des systèmes commandés par Grafcet ». Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne Ardennes, 1996.
- [42] Pierre DE LOOR, Laurent Le BODIC, Guillaume CALVET and Jacques TISSEAU. « Un simulateur d’usage pour l’évolution des systèmes interactifs multimodaux ». *Revue d’Interaction Homme-Machine*, 2006. à paraître.
- [43] Pierre DE LOOR and Pierre CHEVAILLIER. « Generation of Agent Interactions from Temporal Logic Specifications ». In *Proceedings of 16 th IMACS World congress 2000, on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation*, Lausanne, Switzerland, 2000.
- [44] Pierre DE LOOR and Pierre CHEVAILLIER. « Résolution par une métaphore émotionnelle ». Rapport du groupe ASA : le problème de l’emploi du temps, coordonné par Philippe Mathieu, 2002. pages 45 à 54.
- [45] Pierre DE LOOR and Pierre CHEVAILLIER. « Solving Distributed and Dynamic Constraints Using an Emotional Metaphor : Application to the Timetabling Problem ». In *5th EURO/INFORM international conference, 'new opportunities for operations research'*, page 144, Istanbul, 2003. Invited paper, session : Parallel Algorithms and Implementation.
- [46] Pierre DE LOOR, Cyril SEPTSEAUT and Pierre CHEVAILLIER. « Les émotions : Une métaphore pour la résolution de problèmes dynamiques distribués ». In Jean-Pierre BRIOT and Khaled GHÉDIRA, editors, *Déploiement des systèmes multi-agents, vers un passage à l’échelle, JFSMA’2003, Revue des sciences et technologies de l’information*, volume hors série, pages 331–344. Hermes, November 2003. ISBN : 2-7462-0810-5.
- [47] Stéphane DONIKIAN. « HTPS : a behaviour modelling language for autonomous agents ». In *Fifth International Conference on Autonomous Agents*, Montreal, Canada, 2001.

-
- [48] Stéphane DONIKIAN. *Modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels autonomes évoluant dans des environnements structurés et informés*. Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Rennes 1, 2004.
- [49] M. DORIGO. « Alecsys and the AutoMouse : Learning to Control a Real Robot by Distributed Classifier Systems ». *Machine Learning*, 19 :209–240, 1995.
- [50] Jean-François DORTIER. « Boucher de Perthes, La naissance de la préhistoire ». *Sciences Humaines*, 171 :50–53, 2006.
- [51] J.F. DORTIER. Espoirs et réalités de l'intelligence artificielle. In Sciences HUMAINES, editor, *Le cerveau et la pensée, La révolution des sciences cognitives*, pages 69–77. Lavoisier, 1999.
- [52] Alexis DROGOUL. *Systèmes multi-agents situés*. Dossier d'Habilitation à diriger des recherches de l'Université Pierre et Marie Curie, 2000.
- [53] B. DUGALE, J. Pavard and J.L. SOUBIE. A Pragmatic Development of a Computer Simulation of an Emergency Call Centre. In Rose Dieng et AL., editor, *Designing Cooperative Systems, Frontiers in Artificial Intelligence*. IOS Press, 2000.
- [54] Andreas K. ENGEL, Pascal FRIES and Wolf SINGER. « Dynamic predictions : Oscillations and synchrony in top-down processing ». *Nature*, 2 :704–716, 2001.
- [55] Pierre-Alexandre FAVIER. « *La notion d'intentionnalité dans la spécification de comportements d'agents autonomes situés en environnement virtuel* ». PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, mention Informatique, soutenue le 14 Décembre 2004.
- [56] Pierre-Alexandre FAVIER and Pierre DE LOOR. « Intentionality : a Needed Link Between Decision and Action for Intelligent's Agent Behaviour ». In *Forth International Conference on Virtual Reality and its Application in Industry Proceedings, VRAI'2003*, Tianjin, China, 23–25 October 2003.
- [57] Pierre-Alexandre FAVIER and Pierre DE LOOR. « From decision to action : intentionality, a guide for the specification of intelligent agents' behaviour ». *International Journal of Image and Graphics*, 6(1) :87–99, 2006.
- [58] Pierre-Alexandre FAVIER, Pierre DE LOOR and Jacques TISSEAU. « Programming Agent with Purposes : Application to Autonomous Shooting in Virtual Environment ». *Lecture Notes In Computer Sciences*, 2197 :40–43, 2001.
- [59] J. FERBER. *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*. InterEditions, 1995.
- [60] T. E. FIKES and N. J. NILSSON. « STRIPS : A new approach to the application of theorem proving to problem solving ». *Artificial Intelligence*, 2 :189–208, 1971.
- [61] R. J. FIRBY. « An investigation into reactive planning in complex domains ». In *Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence*, pages 202–206, 1987.

- [62] P. FUCHS, G MOREAU, A. BERTHOZ and J.L. VERCHER, editors. *Le traité de la réalité virtuelle, Volume 1 : L'homme et l'environnement virtuel*. Mines Paris, 2006.
- [63] M. P. GEORGEFF and F. F. INGRAND. « Decision-making in an embedded reasoning system ». In USA. Morgan Kaufmann MI, editor, *Proceedings of the Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 972–978, 1989.
- [64] K. GHEDIRA. « Distributed simulated re-annealing for dynamic constraint satisfaction problem ». In *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, pages 601–607, 1994.
- [65] Matthew L. GINSBERG. « Dynamic backtracking ». *Journal of Artificial Intelligence Research*, pages 25–46, 1993.
- [66] D.M.S GIOVANA, M.P. GLEIZES and A. KARAGEORGOS. « Self-Organisation in Multi-Agent System ». Technical Report, Rapport interne IRIT/2005-18-R, 2005.
- [67] Kevin A. GLUCK and Richard W. PEW, editors. *Modelling Human Behavior With Integrated Cognitive Architectures*. Lawrence Erlbaum Associates, 2005.
- [68] Dina GOLDIN and Peter WEGNER. The Church-Turing thesis : Breaking the myth. In *Lecture Note in Computer Science*, volume 3526, pages 152–168. Springer, 2005.
- [69] Avelino J. GONZALEZ and Robert AHLERS. « Context-based representation of intelligent behavior in training simulations ». *Trans. Soc. Comput. Simul. Int.*, 15(4) :153–166, 1998.
- [70] Agnès GUILLOT. « *Intelligence artificielle située, cerveau, corps et environnement* », Chapitre Pour une approche dynamique des animats, pages 33–58. Alexis Drogoul et Jean-Arcady Meyer, 1999.
- [71] Agnès GUILLOT and Emmanuel DAUCÉ, editors. *Approche dynamique de la cognition artificielle*. Traité des sciences cognitives. Hermes-Lavoisier, 2002.
- [72] P. GÉRARD. « *Systèmes de classeurs : étude de l'apprentissage latent* ». PhD thesis, Université Paris VI, 2002.
- [73] Stevan HARNAD. « Grounding Symbols in the Analog World with Neural Nets ». *NETS.THINK 2*, 2 :1, 1993.
- [74] Fabrice HARROUET, Eric CAZEAUX and Thomas JOURDAN. « *Le traité de la réalité virtuelle, volume 3 : outils et modèles informatiques des environnements virtuels* », Chapitre AREVI, pages 369–392. Mines, Paris, 2006.
- [75] Fabrice HARROUET, Jacques TISSEAU, Patrick REIGNIER and Pierre CHEVAILLIER. « oRis : un environnement de simulation interactive multi-agents ». *Revue des sciences et technologie de l'information, série Technique et science informatiques (RSTI-TSI)*, 21(4) :499–524, 2002.

-
- [76] Salima HASSAS. *Systèmes Complexes à base de Multi-Agents Situés*. Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université Claude Bernard - Lyon 1, 2003.
- [77] Véronique HAVELANGE, Charles LENAY and John STEWART. « Les représentations : mémoire externe et objets techniques ». *Intellectica*, 35 :115–131, 2003.
- [78] Nicholas Andrew HAWES. « *Anytime Deliberation of Computation* ». PhD thesis, University of Birmingham, 2003.
- [79] P.J. HAYES. « *Readings in planning* », Chapitre The frame problem and related problems in artificial intelligence, pages 588–595. Morgan Kaufmann, 1990.
- [80] D. HERVIOU, E. MAISEL and J. TISSEAU. « Traffic road simulator design ». In *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 2006.
- [81] John J. HOPFIELD. « Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities ». In *Proceedings of National Academy of Science, USA*, volume 79, pages 2554–2558, 1982.
- [82] Philippe HUNEMAN and Estelle KULICH. *Introduction à la phénoménologie*. Armand Colin, 1997.
- [83] Edwin HUTCHINS. « *Cultural Cognition* », Chapitre 9 from Cognition in the wild. MIT Press, 1995.
- [84] Edwin HUTCHINS. « Material anchors for conceptual blends ». *journal of pragmatics*, 37 :1555–1577, 2005.
- [85] M.Y. IVORY and M.A. HEARST. « The state of the Art in Automating Usability Evaluation of User Interfaces ». *ACM Computing Surveys*, 33(4) :470–516, 2001.
- [86] B. JOHN, A. VERA, M. MATESSA and R. FREED, M. nd Remington. « Automating CPM-GOMS ». In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems : Changing Our World, Changing Ourselves*, pages 20–25. ACM Press, 2002.
- [87] Stewart JOHN. « Cognition=life : Implication for higher-level cognition ». *Behavioural Process*, 35 :311–326, 1996.
- [88] Isabelle JOLY. « Sartre et la psychologie phénoménologique. Questionnement de la méthode et des concepts fondateurs des théories de l'énaction ». Rapport interne, soumis à publication, 2005.
- [89] Narendra JUSSIEN. « Programmation par contraintes avec explications ». In *Actes JNPC'2001*, pages 147–158, 2001.
- [90] Narendra JUSSIEN and Olivier LHOMME. « Vers une unification des algorithmes de résolution de CSP ». In *8ièmes Journées nationales sur la résolution pratique de problèmes NP-complets (JNPC'02)*, pages 155–168, Nice, France, May 2002.

- [91] D. KIERAS. « GOMS modeling of user interfaces using NGOMSL ». In C. PLAISANT, editor, *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems*, pages 371–372. ACM Press, 1994.
- [92] D. E. KIERAS. « *Handbook of human-computer interaction (2nd ed.)* », Chapitre A guide to GOMS model usability evaluation using NGOMSL. M. Helander, T. Landauer, and P. Prabhu, 1997.
- [93] D. E. KIERAS and T. P. SANTORO. « Computational GOMS modeling of a complex team task : lessons learned ». In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 97–104. ACM Press, 2004.
- [94] D. E. KIERAS, D. SCOTT, WOOD and MEYER. « Predictive Engineering Models Based on the EPIC Architecture for a Multimodal High-Performance Human-Computer Interaction Task ». *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, pages 230–275, 1997.
- [95] D. E. KIERAS, D. E. et Meyer. « *Cognitive task analysis* », Chapitre The role of cognitive task analysis in the application of predictive models of human performance. J. M. C. Schraagen, S. E. Chipman, and V. L. Shalin, 2000.
- [96] D.E. KIERAS, S. D. WOOD, K. ABOTEL and A. HORNOF. « GLEAN : A Computer-Based Tool for rapid GOMS Model Usability Evaluation of User Interface Designs ». In *Proceedings of UIST*, pages 91–100, Pittsburgh, New-York, 1995. ACM.
- [97] C. KOLSKI, Ezzedine H. and Abed M.. « *Analyse et conception d’IHM, Interaction homme-machine pour les SI* », volume 1, Chapitre Développement du logiciel : des cycles classiques aux cycles enrichis sous l’angle des IHM, pages 23–46. Hermes, 2001.
- [98] G. LAKOFF and M. JOHNSON. *Les métaphores dans la vie quotidienne*. Editions de minuit, 1985.
- [99] N. LASSABE, H. LUGA and Y. DUTHEN. « Evolving Creatures in Virtual Ecosystems ». In *Actes des journées du groupe de travail Animation et Simulation*, pages 56–65, 2006.
- [100] Laurent LE BODIC. « Simulation de l’interaction homme machine pour la conception d’interfaces ergonomiques ». DEA de l’Université de Rennes I, Juin, 2002.
- [101] Laurent LE BODIC. « *Approche de l’évaluation des systèmes interactifs multimodaux par simulation comportementale située* ». PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, Ecole doctorale SMIS, spécialité informatique, soutenue le 16 Juin 2005.
- [102] Laurent LE BODIC, Pierre DE LOOR, Guillaume CALVET and Julien KAHN. « SIHMM : Simulateur de l’Interaction Homme Machine Multimodale ». In L. NIGAY, editor, *XVI conférence sur l’interaction Homme Machine, Annexes des actes*, pages 31–34, Namur, September 2004.

-
- [103] Laurent LE BODIC, Pierre DE LOOR and Julien KAHN. « Multimodal interfaces evaluation with virtual reality simulation ». In *Human Computer Interaction, Theory and Practice (Part 1)*, pages 661–665, June 2002.
- [104] Laurent LE BODIC, Pierre DE LOOR and Julien KAHN. « UMAR : A Modeling of Multimodal Artifact ». In *HCI International 2005*, July 2005. Las Vegas.
- [105] Laurent LE BODIC, Pierre DE LOOR, Julien KAHN and Fabrice HARROUET. « Utilisation de la réalité virtuelle pour l'évaluation des interfaces multimodales ». In *Actes du colloque Virtual Concept 2002*, pages 128–131, Biarritz, France, October 2002. ESTIA.
- [106] Laurent LE BODIC, Julien KAHN and Pierre DE LOOR. « Virtual reality for multimodal HCI evaluation. ». In *Proceedings of the 5th Virtual Reality International Conference VRIC 2003*, pages 95–98, May 2003.
- [107] D. LOURDEAUX. « *Réalité virtuelle et formation : conception d'environnement virtuels pédagogiques* ». PhD thesis, Ecole des mines de Paris, 2001.
- [108] Annie LUCIANI. « Interaction as exchanged actions and their role in visual and auditory feedbacks ». Projet interdiscipline, <http://www.interdisciplines.org/enaction/papers/14>, 2004.
- [109] Annie LUCIANI. « Enaction and Visual Arts : Toward Dynamic Instrumental Visual Arts ». In *2nd International Conference on Enactive Interfaces*, Genoa, Italy, 2005.
- [110] P. MAES. « The dynamics of action selection ». In *Proceedings of the international Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI'89*, pages 991–998, 1989.
- [111] Pattie MAES. « Situated Agents can have goals ». *Robotics and Autonomous Systems*, 6 :49–70, 1990.
- [112] P. MATHIEU and M.H. VERRONS. « A Generic Model for Contract Negotiation ». In *Artificial Intelligence in Virtual Market, AISB'2002, Symposium on Adaptive Agents and Multi-Agent Systems*, London, England, 2002.
- [113] J. McCLELLAND and J.F. DORTIER. « *Le cerveau et la pensée* », Chapitre Vers une convergence entre symbolistes et connexionnistes, entretien avec James McClelland, pages 37–38. Editions Sciences Humaines, 1999.
- [114] T. MITCHELL. *Machine Learning*. WCB/McGraw-Hill, 1997.
- [115] Jean-Pierre MULLER. *Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents : Interaction, émergence et systèmes complexes*. Rapport d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Montpellier II, 2002.
- [116] D. NAVARRE, P. PALANQUE and R. BASTIDE. « Model based interactive prototyping of highly interactive applications ». In *CADUI 2002*, pages 205–216, Valenciennes. Kluwer academic publishers.
- [117] A. NEWELL. *Unified theories of cognition*. Harvard University Press, 1990.

- [118] Anne NICOLLE. « Etude préliminaire à une théorie des processus interactifs infinis. Les cahiers du Greyc, n3 », 2003.
- [119] Anne NICOLLE. « Temps et processus ». In *Journées de Rochebrune - Rencontres interdisciplinaires : Le temps dans les systèmes complexes naturels et artificiels*, pages 229–239, Megève, France, 2004.
- [120] C. PACTEAU. « *Le cerveau et la pensée, la révolution des sciences cognitives* », Chapitre Penser, de la logique à l'expérience, pages 335–342. édition Sciences Humaines, 1999.
- [121] Ezequiel A. Di PAOLO. « Organismically-inspired robotics : homeostatic adaptation and teleology beyond the closed sensorimotor loop ». *Dynamical Systems Approach to Embodiment and Sociality*, Advanced Knowledge International, 2003.
- [122] Ezequiel A. Di PAOLO. « Autopoiesis, adaptivity, teleology, agency ». *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 4 :429–452, 2005.
- [123] M. PARENTHOËN, J. TISSEAU and T. MORINEAU. « Believable Decision for Virtual Actors ». In *International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE-SMC'02)*, 2002.
- [124] Marc PARENTHOËN. « *Animation phénoménologique de la Mer* ». PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2004.
- [125] S. J. PAYNE and T.R.G. GREEN. « Task Action Grammar : A Model of the Mental Representation of Task Languages ». *Human Computer Interaction*, 2 :93–133, 1986.
- [126] Gauthier PICARD, Carole BERNON and Marie Pierre GLEIZES. « Cooperative Agent Model within ADELFE Framework : An Application to a Timetabling Problem ». In *AAMAS*, pages 1506–1507, 2004.
- [127] Jean-Charles POMEROL and Patrick BREZILLON. « About Some Relationships between Knowledge and Context ». In Varol AKMAN, Paolo BOUQUET, Richmond THOMASON and Roger A. YOUNG, editors, *Modeling and Using Context : Third International and Interdisciplinary Conference, Context 2001*, pages 461–464, Berlin, 2001. Springer-Verlag.
- [128] F. PONTICO, C. FARENC and M. WINCKLER. « Une architecture de dialogue basée sur un modèle pour les applications Web ». In *XVI conférence sur l'interaction Homme Machine : IHM2004*, pages 251–254. ACM Press, 2004.
- [129] D. M. POPOVICI, J. P. GERVAL, P. CHEVAILLIER, J. TISSEAU, L. D. SERBANATI and P. GUEGUEN. « Educative Distributed Virtual Environments for Children ». *Journal of Distance Education Technologies*, 2(4) :18–40, 2004.
- [130] R. QUERREC. « *Les systèmes Multi-Agents pour les Environnements Virtuels de Formation. Application à la sécurité civile* ». PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2002.

-
- [131] A. S. RAO and M. P. GEORGEFF. « Modeling Rational Agents within a BDI-Architecture ». In James ALLEN, Richard FIKES and Erik SANDEWALL, editors, *Proceedings of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pages 473–484. Morgan Kaufmann publishers Inc. : San Mateo, CA, USA, 1991.
- [132] A. S. RAO and M. P. GEORGEFF. « BDI-agents : from theory to practice ». In *Proceedings of the First Intl. Conference on Multiagent Systems (ICMAS'95)*, pages 312–319, San Francisco, 1995.
- [133] M. RAUTERBERG. « From novice to expert decision behaviour : a qualitative modelling approach with Petri nets ». *Symbiosis of Human and Artifact : Human and Social Aspects of Human-Computer Interaction*, 20(B) :449–454, 1995. Y. Anzai, K. Ogawa and H. Mori (Eds.).
- [134] J. REASON. *Human error*. Cambridge University Press, 1990.
- [135] André RIBES. « Introduction de contraintes temporelles dans le langage oRis ». DEA, Université de Rennes 1, 2000.
- [136] J.F. RICHARD. *Les activités mentales, Comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Armand Colin, 2002.
- [137] Quentin RICHET. « Adaptation de la métaphore émotionnelle pour la planification dynamique en Réalité Virtuelle ». mémoire de DEA de l'Université de Rennes I, 2004.
- [138] G. ROBERT. « *MHiCS, une architecture de sélection de l'action Motivationnelle et Hiérarchique à Systèmes de Classeurs pour Personnages Non Joueurs adaptatifs* ». PhD thesis, LIP6 - AnimatLab, Université Pierre et Marie Curie, 2005.
- [139] Sylvain ROBERT. *Physique qualitative et réalité virtuelle*. Rapport de Master de Recherche Informatique de l'Université de Rennes I/ENIB, 2006.
- [140] S SANCHEZ. « *Mécanismes évolutionnistes pour la simulation comportementale d'acteurs virtuels* ». PhD thesis, Université des Sciences Sociales Toulouse I, Décembre 2004.
- [141] C. SANZA. « *Evolution d'Entités Virtuelles Coopératives par Système de Classifieurs* ». PhD thesis, Université Paul Sabatier, 2001.
- [142] Klaus SCHERER. « Vers les "sciences affectives" ». *Sciences Humaines*, 171 :42–43, 2006.
- [143] J. SEARLE. « Minds, Brains, and Programs ». *Behavioral and Brain Sciences*, pages 417–424, 1980.
- [144] J. SEARLE. *Les mystères de la conscience*. Odile Jacob, 1999.
- [145] Cyril SEPTSEAULT. « Evaluation et optimisation d'une approche métaphorique pour la résolution distribuée et dynamique de problèmes ». DEA de l'Université de Rennes I, 2003.

- [146] Olivier SIGAUD and Fabien FLACHER. « *Approche dynamique de la cognition artificielle* », Chapitre Vers une approche dynamique de la sélection de l'action, pages 163–176. Hermes, Traité des sciences cognitives, 2002.
- [147] O. SIMONIN and J. FERBER. « Un modèle multi-agent de résolution collective de problèmes situés multi-échelles ». In Khaled Ghédira JEAN-PIERRE BRIOT, editor, *Déploiement des systèmes multi-agents, vers un passage à l'échelle, JF-SMA'2003, numéro spécial de Technique et Science Informatiques*, pages 317–329. Hermes, 2003.
- [148] Karl SIMS. « Evolving Virtual Creatures ». In *SIGGRAPH'94 Proceedings*, pages 15–22, 1994.
- [149] R. SUTTON and A. BARTO. *Reinforcement Learning*. Cambridge, MA : MIT Press, 1998.
- [150] D. TABARY and M. ABED. « A software environment task object-oriented design (ETOOD) ». *Journal of Systems and Software*, 60(2) :129–140, 2002.
- [151] J. TISSEAU. *Réalité Virtuelle - autonomie in virtuo*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes I, 2001.
- [152] J.M. TRUONG NGOC. « Les cognitiens existent, mais qui les a rencontrés ? ». texte publié sur <http://www.jean-michel-truong.net>.
- [153] Roy M. TURNER. « Context-Sensitive Reasoning for Autonomous Agents and Cooperative Distributed Problem Solving ». In *Proceedings of the IJCAI Workshop on Using Knowledge in its Context*, Chambéry, France, 1993.
- [154] Francisco J. VARELA. *Invitation aux sciences cognitives*. Editions du seuil, Paris, 1988.
- [155] Francisco J. VARELA. *Autonomie et connaissance*. Seuil, traduction de "Principles of Biological Autonomy" par P. Bourguin et P. Dumouchel, 1989.
- [156] Francisco J. VARELA, Evan THOMPSON and Eleanor ROSCH. *L'inscription corporelle de l'esprit*. Seuil, 1993. Traduit de l'Anglais par Véronique Havelange.
- [157] Gérard VERFAILLIE and Narendra JUSSIEN. « Constraint solving in uncertain and dynamic environments – a survey ». *Constraints*, 10(3) :253–281, 2005.
- [158] Spyros VOSINAKIS and Themis PANAYIOTOPOULOS. « SimHuman : A Platform for Real-Time Virtual Agents with Planning Capabilities ». In A. de ANTONIO, R. AYLETT and D. BALLIN, editors, *IWA 2001, LNAU*, volume 2190, pages 210–223. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
- [159] R. WHITAKER. « Tutorials 1 and 2 on Autopoiesis and Enaction ». <http://www.enolagaia.com>, 2001.
- [160] W. S. WILSON. « Classifier Fitness Based on Accuracy ». *Evolutionary Computation*, 3(2) :149–175, 1995.

-
- [161] M. WOOLDRIDGE. *Reasoning about Rational Agents*. MIT Press, 2000.
- [162] Makoto YOKOO. *Distributed Constraint Satisfaction, Foundations of Cooperation in Multi-agent Systems*. Springer, 2001.

Références citées

- [163] A. ACQUISTI, W.J. CLANCEY, R. VAN HOOF, M. SCOTT and M. SIERHUIS. « BRAHMS Tutorial, Version 1.0 », 2003.
- [164] J. AGUILAR. « A Survey about Fuzzy Cognitive Maps Papers ». *International journal of computational cognition*, 3(2) :27–33, 2005.
- [165] E. M. ALTMANN and B. E. JOHN. « Episodic indexing : A model of memory for attention events ». *Cognitive Science*, 23(2) :117–156, 1999.
- [166] AMALBERTI. « La maîtrise des situations dynamiques ». *Psychologie Française*, 46(2) :107–118, 2001.
- [167] J. R. ANDERSON. « Analysis of student performance with the LISP tutor ». In N. FREDERICKSEN, R. GLASER, A. LESGOLD and M. SHAFFO, editors, *Diagnostic Monitoring of Skill and Knowledge Acquisition*, pages 27–50, Hillsdale, NJ, 1990. Erlbaum.
- [168] J.R. ANDERSON. *Rules of the Mind*. Lawrence Erlbaum Associates, Hilladale, NJ, 1993.
- [169] S. ANDREWS, B. KETTLER, K. EROL and J. HENDLER. « UM Translog : A planning domain for the development and benchmarking of planning systems ». Technical Report CS-TR-3487, University of Maryland, Department of Computer Science, 1995.
- [170] M. A. ARBIB. Schema Theory. In Arbib M., editor, *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, pages 830–834. MIT Press, Cambridge MA, 1995.
- [171] M.T. ARGILAGA and G.K. JONSSON. « Detection of Real-Time Patterns in Sports : Interactions in Soccer. ». *International Journal of Computer Science in Sport*, Volume 2/Edition 2(1) :118–121, 2003.
- [172] R. AXELROD. *Structure of decision*. Princeton University Press, 1976.
- [173] N.M. AYKIN and T. AYKIN. « Individual differences in Human-Computer Interaction ». *Computers and Industrial Engineering*, 20(3) :373–379, 1991.
- [174] R. S. AYLETT, A. J. HORROBIN, J. J. O’HARE, A. A. OSMAN and M. M. T. POLSHAW. « Virtual teletubbies : reapplying a robot architecture to virtual agents. ». *Proceedings of the Third International Conference on Autonomous Agents (Agent’99)*, pages 338–339, 1999.

- [175] N. BALACHEFF. « Eclairage didactique sur les EIAH en mathématiques ». In *Colloque annuel du Groupe de Didactique des Mathématiques du Québec*, pages 11–42, Université de Concordia, Montréal, Canada, 1998.
- [176] A. BARRY. « The Emergence of High Level Structure in Classifier Systems - A Proposal ». *Irish Journal of Psychology*, 14(3) :480–498, 1993.
- [177] L. P. BEAUDOIN. « *Goal Processing In Autonomous Agents* ». PhD thesis, School of Computer Science, The University of Birmingham, 1994.
- [178] William BECHTEL and Adele ABRAHAMSEN. *Le connexionnisme et l'esprit, introduction au traitement parallèle par réseaux*. La découverte, 1993.
- [179] Carole BERNON, Marie-Pierre GLEIZES, Sylvain PEYRUQUEOU and Gauthier PICARD. « ADELPHE : A Methodology for Adaptive Multi-agent Systems Engineering ». In *Lecture Notes in Computer Sciences*, volume 2577/2003, pages 156–169. Springer Berlin/Heidelberg, 2003.
- [180] L. V. BERTALANFFY. *General System Theory*. New York, 1968.
- [181] A. BERTHOZ. *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, 1997.
- [182] Emilio BIZZI and AL.. *Taking Action, Cognitive Neuroscience Perspectives on Intentional Acts*. Scott H. Johnson editor, A Bradford Book, MIT Press, July 2003.
- [183] A. BLUM and M. FURST. « Fast planning through graph analysis ». *Artificial Intelligence*, 90 :281–300, 1997.
- [184] M. E. BRATMAN. *Intention, Plans and Practical Reason*. Harvard University Press, 1987.
- [185] P. BRÉZILLON and J.Ch. POMEROL. « Contextual knowledge sharing and cooperation in intelligent assistant systems ». *Le Travail Humain*, 62(3) :223–246, 1999.
- [186] J. M. BURKHARDT, D. LOURDEAUX and D. MELLET D'HUART. « *Le traité de la réalité virtuelle* », Chapitre La conception des environnements virtuels pour l'apprentissage. Les Presses de l'Ecole des Mines, deuxième édition, 2003.
- [187] Philippe CAPDEPUY and Marc KALTENBACH. « Autonomous systems : computational autopoiesis through artificial chemistries ». In *Workshop on Artificial Chemistry and its Application, European Conference on artificial life*, 2005.
- [188] S.K. CARD, T.P. MORAN and A. NEWEL. *The psychology of human-computer interaction*. Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- [189] M.S. CAREY, R.B. STAMMERS and J.A. ASTLEY. « *Human-Computer Interaction design : the potential and pitfalls of Hierarchical Task Analysis* », Chapitre 2. Dan Diaper, Chapter 2., 1989.

-
- [190] J-M CELLIER and J-M HOC. « La gestion d'environnements dynamiques ». *Psychologie Française*, 46 :103–106, 2001.
- [191] D. CHAPMAN. « Planning for conjunctive goals ». *Artificial Intelligence*, 32 :333–377, 1987.
- [192] E. H. CHI HI, P. PIROLI and J. PITKOW. « The scent of a site : A system for analyzing and predicting information scent, usage, and usability of a web site ». In *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 161–168. NY :ACM Press, 2000.
- [193] Dave CLIFF and Susi ROSS. « Adding Temporary Memory to ZCS ». Technical Report CSRP347, School of Cognitive and Computing Sciences, University of Sussex, 1995.
- [194] J. COUTAZ and L. NIGAY. « Four Easy Pieces for Assessing the Usability of Multimodal Interaction : The CARE properties ». In *INTERACT'95*, pages 115–120, 1995.
- [195] John CUGINI and Jean SCHOLTZ. « VISVIP : 3D Visualization of Paths through Web Sites. ». In *Proceedings of the 10th international Workshop on Database and Expert Systems Applications*, pages 259–263, 1999.
- [196] R. DECHTER and A. DECHTER. « Belief Maintenance in Dynamic Constraint Networks' ». In *Proceedings of the 17th International Conference on Artificial Intelligence*, pages 37–42, 1988.
- [197] Daniel DENNETT. *The intentional stance*. MIT Press, 1987.
- [198] B. DIKERSON, J. et Kosko. « Virtual worlds as fuzzy cognitive maps ». *Presence*, 3 :173–189, 1994.
- [199] C. DILLON, A. et Watson. « User analysis in HCI - the historical lessons from individual differences research ». *International Journal Human-Computer Studies*, 45(6) :619–637, 1996.
- [200] M. DORIGO and H. BERSINI. « A Comparison of Q-Learning and Classifier Systems ». In *From Animals to Animats 3 : Third International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB'94)*, pages 248–255, 1994.
- [201] H.L. DREYFUS. *Intelligence artificielle, mythes et limites*. Flammarion, 1984.
- [202] J.P. DUPUY. *Ordres et Désordres*. Seuil, 1982.
- [203] F. FAGES, J. FOWLER and T. SOLA. « Experiments in Reactive Constraint Logic Programming ». *Journal of Logic Programming*, 37(1-3) :185–212, 1998.
- [204] B. FALTINGS and S. MACHO-GONZALEZ. « Open Constraint Satisfaction ». In *Proc. of the 8th International Conference on Principles and Practices of Constraint Programming (CP-02)*, pages 356–370, New York, USA, 2002.

- [205] I. A. FERGUSSON. « *TourningMachines : An Architecture for Dynamics, Rational, Mobile Agents* ». PhD thesis, University of Cambridge, 1992.
- [206] K.D. FORBUS. « Qualitative Process Theorie ». *Artificial Intelligence*, pages 85–168, 1984.
- [207] B. FREEMAN-BENSON, J. MALONEY and A. BORNING. « An Incremental Cosn-traint Solver ». *Communications of the ACM*, 33(1) :54–63, 1990.
- [208] Alain GAREAU. « *Utilisation des systèmes de particules pour la simulation de phénomènes naturels ; Présentation d'une architecture permettant l'intégration de systèmes animés hétérogènes* ». PhD thesis, Thèse de doctorat de l'université de Lyon I, 1997.
- [209] Y. GEORGET, P. CODOGNET and F. ROSSI. « Constraint Retraction in CLP(FD) : Formal Framework and Performance Results ». *Constraints*, 4(1) :5–42, 1999.
- [210] K. GHEDIRA. « Partial constraint satisfaction by a multi-agent approach combined with simulated annealing process ». In *Proceedings of the 14th IEEE International Acignin workshop*, 1994.
- [211] M. L. GINSBERG. « Universal Planning : An (almost) universally bad idea ». *IA Magazine*, 10(4) :40–44, 1989.
- [212] B. GIRARD, G. ROBERT and A. GUILLOT. « Jeu Vidéo et Intelligence Artificielle Située ». In *Cognito*, 22 :57–72, 2001.
- [213] M.P. GLEIZE, V. CAMPS and P. GLIZE. « A Theory of Emergent Computation Based on Cooperative Self-Organization for Adaptive Artificial Systems ». In *4th European Congress of Systems Science*, 1999.
- [214] F. GLOVER and M. LAGUNA. *Modern heuristic Techniques for Combinatorial Problems, Chapter Tabu Search*. Blackwell Scientific Publishing, 1993.
- [215] R. H. GUTTMAN, A. G. MOUKAS and P. MAES. « Agent-mediated electronic commerce : a survey ». *Knowledge Engineering Review*, 13(2) :143–152, 1998.
- [216] Jacek GWIZDKA and Mark H. CHIGNELL. « Individual differences and task-based user interface evaluation : a case study of pending tasks in email. ». *Interacting with Computers*, 16(4) :769–797, 2004.
- [217] P.D. HARPER and K.L. NORMAN. « Improving user satisfaction : The questionnaire for user interaction satisfaction version 5.5 ». In *1st Annual Mid-Atlantic Human Factors Conference*, pages 224–228, Virginia Beach, 1993.
- [218] W. HARVEY and M. GINSBERG. « Limited Discrepancy Search ». In *Proc. of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'95)*, pages 607–613, 1995.

-
- [219] HAYES-ROTH. « Architectural foundations for real-time performance in intelligent agents ». *Real-Time Systems : The International Journal of Time-Critical Computing*, 2 :99–125, 1990.
- [220] B. HELFRICH and J.A. LANDAY. « QUIP : Quantitative User Interface Profiling ». Disponible à : <http://home.earthlink.net/~bhelfrich/quip/>, 1999.
- [221] P.V. HENTENRICK and T.L. PROVOST. « Incremental Search in Constraint Logic Programming ». *New Generation of Computing*, 9 :257–275, 1991.
- [222] J. H. HOLLAND. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [223] J. H. HOLLAND. « Adaptive algorithms for discovering and using general patterns in growing knowledge bases ». *International Journal of Policy Analysis and Information Systems*, 4(3) :245–268, 1980.
- [224] J. H. HOLLAND. « Properties of the Bucket Brigade Algorithm ». In *International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, pages 1–7, Pittsburgh, PA, 1985.
- [225] J.H. HOLLAND. Adaptation. In R. ROSEN and F. M. SNELL, editors, *Progress in theoretical biology*, pages 263–293. New York : Plenum, 1976.
- [226] John H. HOLLAND. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975. Republished by the MIT press, 1992.
- [227] J. JACKENDOFF. *Consciousness and the Computational Mind*. Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, A Bradford Book, 1987.
- [228] B. E. JOHN and D. E. KIERAS. « The GOMS family of user interface analysis techniques : comparison and contrast ». *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 3(4) :320–351, 1996.
- [229] Narendra JUSSIEN and Olivier LHOMME. « Dynamic domain splitting for numeric CSP ». In *European Conference on Artificial Intelligence*, pages 224–228, Brighton, United Kingdom, August 1998.
- [230] Narendra JUSSIEN and Olivier LHOMME. « Local search with constraint propagation and conflict-based heuristics ». *Artificial Intelligence*, 139(1) :21–45, July 2002.
- [231] M. A. JUST and P.A. CARPENTER. « A capacity theory of comprehension : Individual differences in working memory ». *Psychologie*, 99(1) :122–149, 1992.
- [232] Oussama KHATIB. « Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots ». *International Journal of Robotics Research*, 5(1) :90–98, 1986.
- [233] A. KHOO, G. DUNHAM, N. TRIENENS and S. SOOD. « Efficient, realistic NPC control systems using behaviour-based techniques ». In *Papers from the 2002 AAAI Spring Symposium on Artificial Intelligence and Computer Games*, pages 46–51, 2002.

- [234] D. E. KIERAS, D. SCOTT, WOOD and MEYER. « Predictive Engineering Models Based on the EPIC Architecture for a Multimodal High-Performance Human-Computer Interaction Task ». *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, pages 230–275, 1997.
- [235] D.E. KIERAS, S. D. WOOD, K. ABOTEL and A. HORNOF. « GLEAN : A Computer-Based Tool for rapid GOMS Model Usability Evaluation of User Interface Designs ». In *Proceedings of UIST*, pages 91–100, Pittsburgh, New-York, 1995. ACM.
- [236] J. KIRAKOWSKI, N. CLARIDGE and R. WHITEHAND. « Human centered measures of success in web site design ». In *Proceedings of Fourth Conference on Human Factors and the Web On-line. Disponible sur <http://www.research.att.com/conf/hfweb/>*. Basking Ridge, NJ, USA, 1998.
- [237] S. KIRKPATRICK, C. D. GELATT and M. P. VECCHI. « Optimisation by simulated annealing ». *Science*, 220 :671–680, 1983.
- [238] P. G. KITAJIMA, M. et Polson. « A comprehension-based model of exploration ». In M. J. TAUBER, editor, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems : Common Ground*, pages 324–331. ACM Press, 1996.
- [239] B. KOKINOV. « A dynamic theory of implicit context », 1997. In *Proceedings of the Second European Conference on Cognitive Science*. University of Manchester Press, 1997.
- [240] B. KOLSKO. « Fuzzy cognitive maps ». *International Journal of Man and Machine Studies*, 1986.
- [241] K. KONOLIGE and M. E. POLLACK. « A representationalist theory of intention ». In Ruzena BAJCSY, editor, *Proceedings of the Thirteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-93)*, pages 390–395, Chambéry, France, 29– 3 1993. Morgan Kaufmann publishers Inc. : San Mateo, CA, USA.
- [242] J. LADRIERE. Représentation et Connaissance. In *Encyclopaedia Universalis*, volume 19, pages 822–824. Paris, 1995.
- [243] F. LAMARCHE. « *Humanoïdes virtuels, réaction et cognition : une architecture pour leur autonomie* ». PhD thesis, Université de Rennes 1, 2003.
- [244] E. LAMMA, P. MELLO, M. MILANO, R. CUCCHIARA, M. GAVANELLI and M. PICCARDI. « Constraint Propagation and Value Acquisition : Why we should do it Interactively ». In *Proc. of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, pages 468–477, 1999.
- [245] P. LEVESQUE. « Creation and Use of 3D As-built Models at EDF ». In *FIG Working Week 2003*, 2003.

-
- [246] P. LUCIDARME, O. SIMONIN and Liegeois A.. « Implementation and Evaluation of a Satisfaction/Altruism Based Architecture for Multi-Robot systems ». In *International Conference of Robotics and Automation*, pages 1007–1012, Washington, 2002.
- [247] A. MACKWORTH. « Constraint Satisfaction ». *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, pages 285–293, 1992.
- [248] M. MACLEOD and R. RENGGER. « The Development of DRUM : A Software Tool for Video-Assisted Usability Evaluation ». In L. ALTY, DIAPER, DAN and D. GUEST, editors, *Proceedings of the Eighth Conference of the British Computer Society Human Computer Interaction Specialist Group - People and Computers VIII*, pages 293–309, Loughborough University, UK, 1993.
- [249] Shigeo MATSUBARA. « Trade of a problem-solving task ». In *AAMAS '03 : Proceedings of the second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 257–264, New York, NY, USA, 2003. ACM Press.
- [250] J. MAY and P. BARNARD. « The case for supportive evaluation during design ». *Interacting with Computer*, 7 :115–144, 1995.
- [251] T. MCGEER. « Passive dynamic walking ». *International Journal of Robotics Research*, 9(2) :62–82, 1990.
- [252] J.A. MEYER. « Pour une approche complémentaire de l'IA traditionnelle : le manifeste animat ». In *Cognito*, 6 :1–4, 1996.
- [253] M. MINSKY. *The Society of Mind*. New-York, 1986.
- [254] S. MINTON, M. JOHNSTON, A. PHILIPS and P. LAIRD. « Minimizing Conflicts : a Heuristic Repair Method for Constraint Satisfaction and Scheduling Problems ». *Artificial Intelligence*, 58 :160–205, 1992.
- [255] Hammami MOEZ and Ghedira KHALED. « COSATS : A new Cooperation Model between Simulated Annealing and Tabu Search for the K-Graph Partitioning Problem ». In Rajiv KHOSLA, Robert J. HOWLETT and Lakhmi C. JAIN, editors, *The Fourth IEEE International Workshop on Soft Computing as Transdisciplinary Science and Technology*, volume 3684 of *Lecture Notes in Computer Science*, 2005.
- [256] U. MONTARANI and F. ROSSI. « Constraint Solving and Programming : What Next ? ». *Constraints*, 2(1) :87–91, 1997.
- [257] J. MÜLLER and M. PISCHEL. « The Agent Architecture InteRRaP : Concept and Application ». Technical Report RR-93-26, DFKI Saarbrücken, 1993.
- [258] J. P. MÜLLER, M. PISCHEL and M. THIEL. « Modelling reactive behaviour in vertically layered agent architecture ». In *M. J. Wooldridge and N. R. Jennings : Interacting Agents — Theories, Architectures, and Languages – Lecture Notes in Computer Science, No. 890*, pages 261–276. Springer Verlag, January 1995.

- [259] Bertrand NEVEU and Pierre BERLANDIER. « Maintaining Arc Consistency through Constraint Retraction. ». In *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, pages 426–431, 1994.
- [260] A. NEWELL and H. A. SIMON. « GPS, a program that simulates human thought ». *Computer and Thought*, pages 279–293, 1969.
- [261] J. NIELSEN. *Usability Engineering*. Academic Press Inc, 1993.
- [262] N. J. NILSSON. « Telemorphic programs for agent control ». *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1 :139–158, 1994.
- [263] B. W. OLSEN, D. R. et Halversen. « Interface usage measurements in a user interface management system ». In *Proceedings of the 1st Annual ACM SIGGRAPH Symposium on User Interface Software*, pages 102–108, Alberta, Canada, 1988. ACM Press, New York.
- [264] OMG. « Unified Modeling Language : Superstructure ». Object Management Group : <http://www.omg.org>, 2005.
- [265] S. OVIATT. « Ten myths of multimodal interactions ». *Commun. ACM*, 42(11) :74–81, 1999.
- [266] F. PATERN. *Model-Based Design and Evaluation of Interactive Applications*. Springer, 2001.
- [267] C.S. PEIRCE. *Ecrits sur le signe*. Seuil, 1978.
- [268] Isabelle PESCHARD. « *La réalité sans représentation, La théorie énoncative de la cognition et sa légitimité épistémologique* ». PhD thesis, Ecole Polytechnique, 2004.
- [269] J. PIAGET. *Le comportement, moteur de l'évolution*. Gallimard, Paris, 1976.
- [270] R. PICARD. *Affective computing*. MIT Media Lab, 1995.
- [271] M. E. POLLACK and J. F. HORTY. « There's more to life than making plans ». *AI Magazine*, 20(4) :71–83, 1998.
- [272] P. G. POLSON and D. E. KIERAS. « A quantitative model of the learning and performance of text editing knowledge ». In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages pp. 207–212, San Francisco, California, United States, 1985. ACM Press, New York.
- [273] D.M. POPOVICI, C. SEPSEAULT and R. QUERREC. « Motivate them to communicate ». In *IEEE Computer Society, Proceedings of CW2006, à paraître*, 2006.
- [274] I. PRIGOGINE and I. STENGERS. *Order out of Chaos*. Bantam, 1984.
- [275] Patrik PROSSER. « Hybrid algorithms for the constraint satisfaction problem ». *Computational Intelligence*, 9(3) :268–299, 1993.

-
- [276] Z. PYLYSHYN. *Computation and Cognition : Toward a Foundation for Cognitive Science*. Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1984.
- [277] J. RASMUSSEN. « The role of hierarchical knowledge representation in decision making and system management ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15 :234–243, 1985.
- [278] J. REASON. *Human error*. Cambridge University Press, 1990.
- [279] J. RICKEL and L. JOHNSON. « Animated Agents for Procedural Training in Virtual Reality : Perception, Cognition, and Motor Control ». *Applied Artificial Intelligence*, 13 :343–382, 1999.
- [280] F. E. RITTER, G. D. BAXTER, G. JONES and R. M. YOUNG. « Supporting cognitive models as users ». *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, pages 141–173, 2000.
- [281] G. ROBERT and A. GUILLOT. « MHiCS, A Modular And Hierarchical Classifier Systems Architecture For Bots ». In Q. MEHDI, N. GOUGH and S. NATKIN, editors, *4th International Conference on Intelligent Games and Simulation (GAME-ON'03)*, pages 140–144, London, United Kingdom, 2003.
- [282] L. ROGNIN, P. SALEMBIER and M. ZOUINAR. « Cooperation, Interactions and Socio-Technical Reliability : the case of Air-Traffic Control. Comparing French and Irish settings ». In *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics (ECCE9)*, pages 19–24, 1998.
- [283] E. ROSCH and B. LLOYDS, editors. *Categorization and cognition*. Erlbaum, 1978.
- [284] F. ROSENBLATT. « The perceptron : a probabilistic model for information storage and organisation in the brain ». *Psychological Review*, 65 :386–408, 1958.
- [285] J. K. ROSENBLATT and D. W. PAYTON. « A fine-grained alternative to the subsumption architecture for mobile robot control ». In *the IEEE International Conference on Neural Networks*, volume 2, pages 317–324, Washington, DC, 1989. IEEE Press.
- [286] J. RUMBAUGH, I. JACOBSON and G. BOOCH. *The Unified Modeling Language Reference Manual*. Addison-Wesley, New-York, 1999.
- [287] D. SABIN and E. FREUDER. « Detecting and Resolving Inconsistency and Redundancy in Conditional Constraint Satisfaction Problems ». In *Proc. of the 9th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP-03)*, pages 649–663, 2003.
- [288] Daniel SABIN and Eugene FREUDER. « Contradicting conventional wisdom in constraint satisfaction ». In *Principles and Practice of Constraint Programming*, volume 874 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 10–20, 1994.

- [289] D.L. SCAPIN and C. PIERRET-GOLBRIECH. « Towards a method for task description : MAD ». In *Work with Display Units 89*, pages 371–380. North Holland, Elsevier science, 1989.
- [290] R.C. SCHANK and R.P. ABELSON. *Scripts, plans, goals and understanding*. Erlbaum, Hillsdale, 1977.
- [291] B. SCHMIDT. *The Modelling of Human Behaviour*. SCS - The Society for Computer Simulation International, 2000.
- [292] M. J. SCHOPPERS. « Universal plans for reactive robots in unpredictable environments ». In MCDERMOTT, editor, *Proceedings of the Tenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 1039–1046, 1987.
- [293] Bart SELMAN, Hector LEVESQUE and David MITCHELL. « A new method for solving hard satisfiability problems ». In *AAAI'92, Tenth National Conference on Artificial Intelligence*, pages 440–446, 1992.
- [294] A. C. SIOCHI and D. HIX. « A study of computer-supported user interface evaluation using maximal repeating pattern analysis ». In S. P. ROBERTSON, G. M. OLSON and J. S. OLSON, editors, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems : Reaching Through Technology*, pages 301–305. ACM Press, New York, 1991.
- [295] SLOMAN and SCHEUTZ. « A framework for comparing agent architectures ». In *UKCI'02 : UK Workshop on Computational Intelligence*, Birmingham, 2002.
- [296] Reid G. SMITH. « The Contract Net Protocol : High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver ». *IEEE Transactions on Computers*, C-29(12) :1104–1113, 1981.
- [297] W. STOLZMANN. « Anticipatory classifier systems ». In *Third Annual Genetic Programming Conference*, pages 658–664. Morgan Kaufmann, 1998.
- [298] A. TATE. « Generating project networks ». In *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 888–893, 1977.
- [299] P. TCHOUNIKINE, M. BAKER, N. BALACHEFF, M. BARON, A. DERYCKE, M. GUIN, J. F. NICAUD and P. RABARDEL. « Platon-1 : quelques dimensions pour l'analyse des travaux de recherche en conception d'EIAH ». Technical Report, Rapport de l'action spécifique " fondement théorique méthodologique de la conception d'EIAH " département STIC du CNRS, 2004.
- [300] N. TINBERGEN. *L'étude de l'instinct*. Payot, 1951.
- [301] I. TOLLINGER, R. L. LEWIS, M. MCCURDY, P. TOLLINGER, A. VERA, A. HOWES and L. PELTON. « Supporting efficient development of cognitive models at multiple skill levels : exploring recent advances in constraint-based modeling ». In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '05*, pages 411–420. ACM Press, 2005.

-
- [302] G. TROMBETTONI. « A Polynomial Time Local Propagation Algorithm for General Dataflow Constraint Problems ». In *Proc. of the 4th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP-98)*, pages 432–446, 1998.
- [303] D. L. UEHLING and K. WOLF. « User action graphing effort (UsAGE) ». In R. KATZ, MACK and L. MARKS, editors, *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems*, pages 290–291. ACM Press, 1995.
- [304] F. J. VARELA. « Patterns of Life : Intertwining Identity and Cognition ». *Brain and Cognition*, 34 :72–87, 1997.
- [305] G. VERFAILLIE and T. SCHIEX. « Solution Reuse in Dynamic Constraint Satisfaction Problems ». In *Proc. of the 12th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-94)*, pages 307–312, 1994.
- [306] David E. WILKINS, Karen L. MYERS, John D. LOWRANCE and Leonard P. WESLEY. « Planning and Reacting in Uncertain and Dynamic Environments ». *Journal of Experimental and Theoretical AI*, 7(1) :197–227, 1995.
- [307] W. S. WILSON. « ZCS : A zeroth level classifier system ». *Evolutionary Computation*, 2(1) :1–18, 1994.
- [308] Terry WINOGRAD and Fernando FLORES. *L'intelligence artificielle en question*. PUF, 1989.
- [309] David D. WOODS. « Coping with complexity : the psychology of human behaviour in complex systems ». *Tasks, errors, and mental models*, pages 128–148, 1988.
- [310] I WRIGHT. « *Emotional Agents* ». PhD thesis, School of Computer Science, The University of Birmingham, 1997.
- [311] R. M. YOUNG, T. R. GREEN and T. SIMON. « Programmable user models for predictive evaluation of interface designs ». In K. BICE and C. LEWIS, editors, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems : Wings For the Mind*, pages 15–19. ACM Press, 1989.

