

# THÈSE

Présentée à

L'Université Mentouri de Constantine  
Faculté des Sciences de l'ingénieur - Département d'Informatique

En vue de l'obtention du titre de:

**Docteur En Sciences**

Discipline: Informatique

Par:

**Mohamed El Habib LARABA**

Thème:

**Sur le Raisonnement Qualitatif : Une Approche à Base  
d'Agents Dialogiques pour l'Explication de la Simulation  
Qualitative**

Soutenue le:

Devant le jury composé de :

Zaidi Sahnoun	Professeur, Université Mentouri- Constantine	Rapporteur
Mahmoud Boufaïda	Professeur, Université Mentouri- Constantine	Président
Aïcha Mokhtari	Professeur, Université Houari Boumediène- Alger	Examineur
Zizette Boufaïda	Professeur, Université Mentouri- Constantine	Examineur
Mohamed Tayeb Laskri	Professeur, Université Baji Mokhtar- Annaba	Examineur
Karim Djouani	Professeur, Université Paris XI- Paris	Invité

Département D'informatique - Université Mentouri de Constantine

Route de Ain El Bey - 25000\_- Constantine

# Préface

*Entre :*

*Ce que je pense,  
Ce que je veux écrire,  
Ce que je crois écrire,  
Ce que j'écris,  
Ce que vous avez envie de lire,  
Ce que vous croyez lire,  
Ce que vous lisez,  
Ce que vous avez envie de comprendre,  
Ce que vous comprenez,*

*Il y a dix possibilités qu'on ait des difficultés à communiquer.*

*Mais essayons quand même.*

**Adaptée par nos soins  
De B. Werber, « *Le père de nos pères* »**

## Résumé

Les chercheurs, aussi bien en sciences de l'ordinateur qu'en sciences humaines, n'ont jamais abandonné l'idée, ô combien ambitieuse, de faire de l'ordinateur un partenaire qui dialogue, raisonne, mais aussi explique... Nous nous plaçons, dans le cadre de notre thèse, parmi ceux là, et nous proposons de doter la machine de capacités explicatives et dialogiques, pour mieux comprendre le raisonnement qualitatif.

Le raisonnement qualitatif (RQ) est un domaine d'activité de l'Intelligence Artificielle qui a pour but de modéliser, de prévoir et d'expliquer le comportement des systèmes physiques en termes qualitatifs. Ses techniques se situent souvent à un niveau d'abstraction faisant ressortir les caractéristiques qualitatives de ces systèmes et se préoccupent des imprécisions et incomplétudes de la connaissance disponible. C'est le cas de la simulation qualitative, en particulier.

La simulation qualitative est considérée comme une source intéressante de production d'explications. Les recherches relatives à la production d'explications à partir de la simulation qualitative n'ont quand même pas atteint, dans leur dimension, les travaux sur la génération d'explications dans les systèmes à bases de connaissances notamment.

La production d'explications sur les résultats fournis par la simulation qualitative, quant à elle, a suscité moins d'intérêt parmi la communauté des chercheurs. Dans le peu de travaux que nous avons rencontrés au cours de nos investigations, et qui y font référence, un fait remarquable a suscité notre intérêt: l'explication est produite unilatéralement. L'utilisateur, auquel elle est destinée, ne participe nullement à son élaboration, même s'il n'a pas été complètement oublié comme l'attestent certains travaux relatés dans la thèse.

Notre thèse se propose de pallier à ce manque. La production d'explications sur les résultats de la simulation qualitative, en coopération entre le système explicatif et l'utilisateur auquel l'explication est destinée, constitue alors le premier volet de notre recherche.

La tâche de construction d'une explication est, en fait, un processus assez complexe, pouvant même s'avérer itératif. Il s'agit d'abord de décrypter le besoin de l'utilisateur, rechercher les connaissances nécessaires pour y répondre, fournir une première explication, et rester à l'écoute d'une réaction probable de l'utilisateur, qui pourrait nécessiter une répétition du processus. Cette tâche est alors confiée à un système multi-agents explicatif. Il s'agit là du deuxième volet de notre recherche.

Le SMA explicatif coopère donc avec l'utilisateur humain pour obtenir la meilleure explication possible, à même de satisfaire ce dernier. Un dialogue

régulier prend donc place entre les deux. Dans quel langage sommes-nous alors demandés ?

L'idée de doter l'ordinateur d'activités langagières et discursives, jusque là réservées aux humains, a fait l'objet d'une multitude de recherches. La littérature fait état de cette discipline bien connue qu'est l'Interaction Homme-Machine (IHM) qui propose différentes formes de Communication Homme-Machine. Nous en citons :

- les interfaces Homme-Machine, ces systèmes graphiques permettant l'interaction par manipulation du clavier et d'un pointeur,
- ou le dialogue Homme-Machine, dont les systèmes s'appuient sur le langage naturel pour des échanges avec les utilisateurs,
- ou encore l'interaction dialogique, permettant la communication à un haut niveau sémantique, dans un sous-ensemble du langage naturel.

Cette dernière forme d'interaction, qui se trouve à la frontière entre l'Interaction Homme-Machine et les systèmes multi-agents, nous a particulièrement intéressés. A la base, elle est préconisée pour permettre à des utilisateurs d'interagir, dans un sous-ensemble du langage naturel, avec des composants logiciels d'Internet, considérés comme des agents conversationnels. Nous la trouvons bien adaptée dans le contexte de notre thèse. Notre système multi-agents explicatif sera alors constitué d'agents dialogiques. Voilà le troisième volet de notre recherche.

La participation active de l'utilisateur final d'un algorithme de simulation qualitative, destinataire d'une explication des résultats de cet algorithme, dans le processus de construction de cette explication, constitue la contribution principale de notre recherche.

Nous avons alors répondu aux préoccupations suivantes :

- Quel profil d'utilisateur notre système explicatif cible-t-il ?
- Quelle architecture proposer pour notre système multi-agents explicatif, à même d'assurer la meilleure coopération avec l'utilisateur afin de lui fournir l'explication la plus satisfaisante ? Quels objectifs l'agent doit réaliser ? Quelles sont ses possibilités de raisonnement ou d'apprentissage ? Quels sont ses modèles de connaissances ?
- Quel type de communication établir entre les agents du SMA explicatif ? Comment mettre en place leurs mécanismes de communication ?
- Quelles interactions faut-il mettre en place pour assurer une coopération entre ses agents pour produire la meilleure explication souhaitée ?
- Quel mécanisme d'interprétation et de représentation de ces interactions doit être présent dans l'architecture de l'agent ?

Un exemple extrait de la littérature de la simulation qualitative a servi alors de « banc d'essai » pour notre système explicatif.

## Dédicaces

*En hommage au grand Homme à la grande Classe qu'était Mon Père,  
A celle qui sait rester grande quand tout se fait petit, Ma Mère,  
A celle qui m'a inspiré le désir de vivre autrement, Ma femme,  
A Celle qui demeure pour moi ma seconde maman, ma sœur Fatiha,  
A ma nièce Soumeya,  
A mes p'tits neveux Yasser, Younes et Yassine,  
A toute Ma famille,  
A tous Mes amis*

## Remerciements

*Mes premiers remerciements s'adressent à Mesdames et Messieurs les membres du jury de la soutenance de cette thèse pour l'intérêt porté à mon travail. Je remercie sincèrement Pr. Mahmoud Boufaïda pour avoir accepté de présider ce jury où la présence de Pr. Mohamed Tayeb Laskri, malgré ses nombreuses occupations, m'honore. Je suis particulièrement sensible à l'acceptation de Mesdames Pr. Aïcha Aïssani et Pr. Zizette Boufaïda de faire partie de ce jury.*

*Merci à mon directeur de thèse, Pr. Z. Sahnoun, qui m'a guidé dans l'épineux sentier de cette thèse, grâce à sa disponibilité et ses précieux conseils. Il m'a ouvert les portes du Laboratoire LIRE qu'il dirige, où j'ai passé confortablement, l'essentiel du temps que je devais consacrer à la réalisation de ce travail. Il était incontestablement l'homme qu'il fallait pour diriger cette thèse!*

*Ce temps passé au Labo était tant bénéfique, grâce aux séminaires organisés au sein de l'équipe de recherche « Génie Logiciel et Intelligence Artificielle », dirigée par Pr. Zaidi Sahnoun et dont je suis membre, mais aussi conjointement avec l'équipe de recherche « Génie Logiciel et Systèmes Distribués », dirigée par mon ami Hacène Sebih. J'en remercie les membres des deux équipes. Leurs remarques pertinentes et autres conseils lors de mes exposés, m'ont été d'un apport considérable quant à l'avancement des travaux de ma thèse.*

*Ce temps passé au Labo était aussi agréable grâce à la bonne ambiance créée par mes amis mais aussi compagnons quotidiens de travail Hacène, Mohamed, Hafid et Nasro sous la houlette du « chef » Mahmoud. Merci à tous !*

*Ce temps passé au Labo était quelquefois stressant quand même, dû au travail qui tantôt n'avancait pas, tantôt s'arrêtait, mais aussi aux soumissions et les attentes de notifications de leur acceptation ou refus, les demandes de congés et stages scientifiques et les procédures d'obtention de visas...Ce stress se réduisait souvent grâce au dévouement permanent d'une personne tellement disponible, mon amie Ilhem, que les mots ne suffirent jamais pour exprimer ma profonde gratitude, mais aussi mon ami Mourad et, depuis leur retour, mes amis*

*Raida et Allaoua, toujours présents pour me rendre service, Un grand Merci à tous !*

*Le reste de ce temps consacré à ma thèse, je l'ai passé au CNAM de Paris. Pr. K.Barkaoui a bien accepté de m'y accueillir pour finaliser ma thèse, Merci Kamel!*

*Mon séjour de dix-huit mois dans la capitale française a pu se réaliser grâce à une bourse offerte par les autorités universitaires de mon pays, qu'elles en soient remerciées!*

*Mon dieu, combien de temps ai-je donc dû manquer chez moi, où j'ai toujours été entretenu à la perfection! Elles ont toutes indirectement concouru à la réalisation de cette thèse: Fatiha, Lilia et surtout Soumeya chez moi à Daksi, Mma, Aziza, Boubba, Soria, Nazek et Sabrina chez moi à Mila, et plus récemment, Assia chez moi à Zouaghi! Merci à toutes! Vous avez été parfaites!*

*Merci à mes frères et cousins, mes belles sœurs et cousines, mes neveux et nièces, toujours proches et disponibles! Un grand Merci à Nadéra dont la présence à l'université m'a toujours été d'un grand réconfort, et a toujours facilité mes démarches administratives!*

*Merci à tous mes collègues du département d'informatique!*

*Merci à tous mes amis!*

## Table des matières

<b>Chapitre 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte de la recherche .....	1
1.2 Motivations .....	5
1.3 Objectifs de la recherche .....	6
1.4 Démarche suivie .....	7
1.5 Structure du manuscrit .....	8
<b>Chapitre 2 Le Raisonnement Qualitatif : de la Physique Naïve aux Technologies de l'information.....</b>	<b>10</b>
2.1 Raisonnement qualitatif .....	10
2.2 Pourquoi le raisonnement qualitatif.....	11
2.3 Origines du raisonnement qualitatif.....	11
2.3.1 Physique qualitative.....	12
2.3.2 Physique naïve.....	12
2.4 Champs d'application .....	12
2.5 Notions de base .....	14
2.5.1 Exemple1 .....	14
2.5.2 Exemple2.....	14
2.5.3 Variables et bornes .....	15
2.5.4 Espace des quantités .....	16
2.5.5 Etats et comportements qualitatifs.....	17
2.5.6 Contraintes et équations différentielles qualitatives .....	17
2.6. Approches du raisonnement qualitatif.....	18
2.6.1 Approche par confluences .....	18
2.6.2 Approche par ordre de grandeur relative .....	19
2.6.3 Approche par fonctions de propagation.....	19
2.7 Techniques de raisonnement qualitatif .....	19
2.7.1 Raisonnement causal .....	20
2.7.2 Théorie des processus qualitatifs .....	21
2.7.3 Envisionnement .....	23
2.7.4 Simulation qualitative.....	24
2.7.5 QSIM.....	25
2.7.6. Création de modèles .....	27
2.7.7 Analyse comparative .....	27
2.7.8 Raisonnement téléologique.....	28
2.7.9 Raisonnement spatial .....	28
2.7.10 Interprétation des données .....	28
2.7.11 Planification.....	29
<b>Chapitre 3 Explications: De la Trace des Systèmes Experts à l'Interaction Dialogique en Physique Qualitative .....</b>	<b>30</b>
3.1 Définition formelle .....	30
3.2 Explication: étude linguistique .....	31
3.2.1 Contrainte sur l'explandum .....	31
3.2.2 Contraintes sur l'explanans.....	32
3.2.3 Contraintes sur le lien entre explandum et explanans.....	32
3.3 Explication: interprétations de sens commun .....	33



<b>3.4 Explication: thème de recherche en Intelligence Artificielle.....</b>	<b>33</b>
<b>3.5 Explication: nos premiers pas dans la recherche .....</b>	<b>36</b>
<b>3.6 Explication et Enseignement par Ordinateur.....</b>	<b>37</b>
<b>3.7 Explication et raisonnement qualitatif .....</b>	<b>39</b>
<b>3.8 Explication:Quelle interface pour une interaction particulière? .....</b>	<b>42</b>
3.8.1 Interfaces Homme-Machine .....	43
3.8.2 Dialogue Homme-Machine .....	43
3.8.3 Interaction dialogique .....	44
3.8.3.1 Définition .....	44
3.8.3.2 Types d'interaction dialogique.....	45
A- Interaction Humain-Agent .....	45
B- Interaction Agent-Agent.....	45
3.8.3.3 Notion d'agent dialogique.....	45
A- Architecture à base de médiateur .....	46
A-1 Composant effectif .....	46
A-2 Médiateur .....	46
A-3 Interface.....	47
B- Architecture modulaire.....	47
B-1 Modèle de la langue.....	48
B-2 Modèle du dialogue .....	48
B-3 Modèle de la tâche.....	48
<b>Chapitre 4Systèmes Multi-agents, Formes de Communication et Modèle d'Agent Dialogique.....</b>	<b>49</b>
<b>4.1 Intelligence artificielle distribuée.....</b>	<b>49</b>
<b>4.2 Systèmes multi-agents.....</b>	<b>50</b>
<b>4.3 Concept d'agent.....</b>	<b>53</b>
4.3.1 Définitions .....	54
4.3.2 Propriétés.....	55
4.3.2.1 Intentionnalité .....	56
4.3.2.2 Autonomie .....	56
4.3.2.3 flexibilité.....	56
4.3.2.4 Adaptabilité.....	56
4.3.2.5 Rationalité.....	56
4.3.2.6 Engagement .....	56
4.3.3. Récapitulons .....	57
4.3.4 Niveaux de description .....	58
4.3.4.1 Modèle d'agent .....	58
A- Modèle OMG .....	58
B- Modèle FIPA .....	59
C- Modèle KAOS.....	59
D- Modèle General Magic.....	59
4.3.4.2 Architecture d'agent.....	60
A- Architecture BDI.....	60
B- Architecture de subsomption.....	63
C- Architecture hybride.....	64
4.3.4.3 Implémentation d'agent .....	65
4.3.5 Types d'agents cognitifs .....	65
4.3.5.1 Agents intelligents .....	65
4.3.5.2 Agents collaboratifs .....	66
4.3.5.3 Agents d'interface ou assistants.....	66
4.3.5.4 Agents d'information.....	67
4.3.5.5 Agents conversationnels .....	67
<b>4.4 Communication inter-agents.....</b>	<b>70</b>
4.4.1 Actes de langage .....	71

4.4.2 Langage KQML.....	73
4.4.3 Langage ACL-FIPA .....	73
<b>Chapitre 5 Modélisation des Connaissances et du Raisonnement Explicatifs d'un Outil Explicatif pour la Simulation Qualitative.....</b>	<b>76</b>
5.1 Problématique .....	76
5.2 Modélisation du raisonnement explicatif.....	79
5.2.1 Identification des tâches explicatives .....	81
5.2.2 Description des tâches explicatives .....	82
5.3 Modélisation des connaissances explicatives .....	84
5.4 Modélisation d'un texte explicatif.....	87
<b>Chapitre 6 DIABET: Un Système Explicatif à Base d'Agents Dialogiques pour la Simulation Qualitative. ....</b>	<b>90</b>
6.1 Discussion.....	90
6.2 Modélisation des agents DIABET.....	91
6.2.1 Identification des agents .....	92
6.2.2 Description des agents .....	92
6.3 Modèle d'agent DIABET.....	96
6.3.1 Scénario prévu .....	96
6.3.2 Architecture d'un agent DIABET.....	98
6.3.2.1 Composant linguistique .....	99
6.3.2.2 Composant dialogique .....	100
6.3.2.3 Composant cognitif.....	100
6.3.2.4 Composant de communication.....	101
6.4 Communication Inter-agents .....	101
6.4.1 Scénario prototype.....	102
6.4.2 Description de l'interaction .....	103
6.5 Communication Intra-agents .....	105
6.6 Communication utilisateur-agents .....	105
<b>Chapitre 7.....</b>	<b>107</b>
<b>Bilan et Perspectives.....</b>	<b>107</b>
7.1 Contribution .....	107
7.2 Limites et perspectives.....	109
7.3 Conclusion .....	110
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>111</b>

## Liste des figures

Figure 2.1 Chute d'une bille de fer dans une flamme .....	22
Figure 2.2 Règles de p-transition .....	26
Figure 2.3 Règles de i-transition .....	26
Figure 3.1 Schéma général d'une interaction dialogique.....	45
Figure 3.2 Un agent dialogique à base de médiateur .....	46
Figure 3.3 Un agent dialogique modulaire.....	47
Figure 4.1: Evolution des concepts à travers le temps (1) .....	51
Figure 4.2: Evolution des concepts à travers le temps (2) .....	52
Figure 4.3: Vue canonique d'un SMA .....	53
Figure 4.4: Architecture d'un agent .....	58
Figure 4.5: Une architecture BDI.....	62
Figure 4.6: Une architecture de subsomption .....	64
Figure 4.7: Une architecture hybride.....	65
Figure 4.8: Image d'un agent intelligent .....	66
Figure 4.9: Prototypes d'ACA .....	68
Figure 4.10 Vision d'ensemble d'un agent conversationnel.....	69
Figure 4.11 Vision d'ensemble d'un agent émotionnel .....	69
Figure 4.12 Principe d'architecture à médiateur pour un agent dialogique.....	70
Figure 5.1 Etats successifs inférés durant le processus de simulation.....	77
Figure 5.2 Un outil explicatif pour les résultats de la simulation .....	78
Figure 5.3 Echange utilisateur - outil explicatif.....	78
Figure 5.4 Modèle conceptuel du raisonnement explicatif.....	82
Figure 5.5 Modèle conceptuel des connaissances explicatives .....	86
Figure 5.6 graphe conceptuel correspondant à la proposition P1 .....	88
Figure 5.7 graphe conceptuel correspondant à la proposition P2 .....	88
Figure 5.8 graphe conceptuel correspondant à la proposition P3 .....	88
Figure 5.9 Réseau sémantique correspondant au texte explicatif .....	89
Figure 6.1: Un système à base d'agents dialogiques.....	96
Figure 6.2: Modèle d'agent DIABET .....	99
Figure 6.3 Diagramme de cas d'utilisation interne pour une interaction et sa réponse.....	102
Figure 6.4: Schéma de communication intra-agents .....	105

# Chapitre 1

## Introduction

*"Le commencement est beaucoup plus que la moitié de l'objectif."*

Aristote

L'ordinateur est, pour l'être humain, plus qu'un simple objet. L'être humain lui parle, l'implore, l'encourage, l'insulte, et parfois même l'agresse... Il n'est certes pas un être social, n'a pas d'intention, ni de culture, mais les chercheurs, aussi bien en sciences de l'ordinateur qu'en sciences humaines, n'ont jamais abandonné l'idée, ô combien ambitieuse, d'en faire un partenaire qui dialogue, raisonne, mais aussi explique...

Nous nous plaçons, dans le cadre de notre thèse, parmi ceux là, et nous proposons de doter la machine de capacités explicatives et dialogiques, pour mieux comprendre le raisonnement qualitatif.

### 1.1 Contexte de la recherche

Notre thème de recherche se place dans un contexte pluridisciplinaire. Nous nous appuyons, dans le cadre de notre travail, sur des idées et techniques issues de différents grands champs disciplinaires. Nous empruntons à chaque discipline les éléments qui nous conviennent et qui sont les plus importants.

L'intelligence artificielle (IA)[Turing et al 00][Alliot et al 02]<sup>1</sup> est la première de ces disciplines. Nous la considérons, telle que toujours présentée depuis son avènement, comme une tentative de reproduction artificielle de certaines formes d'intelligence.

Le raisonnement est incontestablement une des formes d'intelligence ayant suscité le plus d'intérêt chez les chercheurs en IA. Des systèmes, dits experts, ont alors été conçus pour reproduire le raisonnement humain dans différents domaines d'activité humaine. Ainsi, pour un raisonnement courant de tous les jours, les situations physiques et les interactions sous-jacentes sont saisies sans

---

<sup>1</sup> Ouvrage collectif

que cela ne nécessite une analyse ou des connaissances quantitatives. Par contre, dans les domaines de la science et du génie, les ingénieurs effectuent des inférences à partir des connaissances bien moindres que celles qu'une analyse quantitative exigerait. C'est, par exemple, le cas des tâches de surveillance et de diagnostic, où des informations précises ne seraient pas disponibles ou seraient trop coûteuses à acquérir.

Le raisonnement qualitatif (RQ) est, à ce titre, un autre domaine d'activité de l'IA qui a pour but de modéliser, de prévoir et d'expliquer le comportement des systèmes physiques en termes qualitatifs [Kuipers 86]. Il fournit un ensemble de formalismes et de techniques qui s'appuient généralement sur des concepts intuitifs (ordres de grandeurs, causalité, etc.) et permettent de dégager des mécanismes d'inférence présentant des analogies avec les types de raisonnements effectués par l'homme sur les systèmes physiques. Ainsi, les techniques se situent souvent à un niveau d'abstraction faisant ressortir les caractéristiques qualitatives de ces systèmes et se préoccupent des imprécisions et incomplétudes de la connaissance disponible. C'est le cas de la simulation qualitative, en particulier.

Une importance particulière est accordée au pouvoir explicatif des résultats fournis. La simulation qualitative est alors considérée comme une source intéressante de production d'explications comme il est considéré que la trace d'exécution de tout algorithme de prédiction fournit une explication [Forbus 84, Kuipers 86, Yan 04]. Les étapes d'une telle explication ne suivent en général aucune notion d'ordre causal. Plusieurs méthodes ont alors été développées pour inférer des explications causales à partir du modèle d'un système physique [De Kleer et al 84] [Iwasaki et al 86a] [Iwasaki et al 86b] [Iwasaki 88] [Iwasaki et al 94] [Top et al 91][Dauphin-Tanguy 00]. Remarquons à ce niveau que les recherches relatives à la production d'explications à partir de la simulation qualitative, n'ont quand même pas atteint, dans leur dimension, les travaux sur la génération d'explications dans les systèmes à bases de connaissances

notamment. Quant à la production d'explications sur les résultats fournis par la simulation qualitative, elle a suscité moins d'intérêt parmi la communauté des chercheurs. Dans le peu de travaux que nous avons rencontrés au cours de nos investigations, et qui y font référence, un fait remarquable a suscité notre intérêt: l'explication est produite unilatéralement. L'utilisateur, auquel elle est destinée, ne participe nullement à son élaboration, même s'il n'a pas été complètement oublié comme l'attestent les travaux de [Khan et al 97] et [Bouwer et al 99].

Notre thèse se propose de pallier à ce manque. La production d'explications sur les résultats de la simulation qualitative, en coopération entre le système explicatif et l'utilisateur auquel l'explication est destinée, constitue alors le premier volet de notre recherche.

Le processus d'élaboration d'une explication fait donc intervenir deux entités ayant des comportements bien distincts. Et pour cause! L'une, le système explicatif, est une entité artificielle, l'autre, l'utilisateur destinataire de l'explication produite, est une entité naturelle.

L'étude du comportement humain est une des tâches essentielles de la psychologie, deuxième domaine du contexte pluridisciplinaire de notre thèse. La psychologie propose, en effet, des modèles explicatifs, servant de guide à l'analyse d'un comportement. Par ailleurs, le comportement d'un individu dépend du groupe dans lequel il interagit, mais aussi des groupes dans lesquels il a interagi par le passé. L'étude du comportement de l'individu en groupe, et celui du groupe lui-même relève de la psychologie sociale, un sous-domaine de la psychologie.

Pour l'étude du comportement de l'entité artificielle, on a recours à l'intelligence artificielle dont les modèles proposés sont génératifs, dans ce sens qu'ils servent plutôt à produire un comportement. Ainsi, un modèle de l'IA permet de concevoir des objets, au sens générique du terme, représentant des comportements qui, une fois associés, définiront un agent, ayant un comportement global.

Cet agent artificiel, comme un individu humain, a un comportement communautaire, c'est à dire lié à la communauté dans laquelle il interagit. La mise en commun de différents agents artificiels, et les conséquences qui en découlent, relèvent du domaine des systèmes multi-agents (SMA), autre grand champ disciplinaire ayant suscité notre intérêt durant cette recherche. Les SMA représentent une branche importante, relativement jeune, de l'intelligence artificielle distribuée (IAD), sous-domaine de l'intelligence artificielle qui s'occupe des situations où plusieurs systèmes interagissent pour résoudre un problème commun [Weiss 99]<sup>1</sup>.

La tâche de construction d'une explication est, en fait, un processus assez complexe, pouvant même s'avérer itératif. Il s'agit d'abord de décrypter le besoin de l'utilisateur, rechercher les connaissances nécessaires pour y répondre, fournir une première explication, et rester à l'écoute d'une probable réaction de l'utilisateur, qui pourrait nécessiter une répétition du processus. Cette tâche est alors confiée à un système multi-agents explicatif. Il s'agit là du deuxième volet de notre recherche.

Le SMA explicatif coopère donc avec l'utilisateur humain pour obtenir la meilleure explication possible, à même de satisfaire ce dernier. Un dialogue régulier prend donc place entre les deux. Dans quel langage devrions-nous nous demander?

L'idée de doter l'ordinateur d'activités langagières et discursives, jusque là réservées aux humains, a fait l'objet d'une multitude de recherches. La littérature fait état de cette discipline bien connue qu'est l'Interaction Homme-Machine (IHM) [Kolski 01] [Caroll 02] qui propose différentes formes de communication Homme-Machine. Nous en citons:

- les interfaces Homme-Machine, ces systèmes graphiques permettant l'interaction par manipulation du clavier et d'un pointeur,

---

<sup>1</sup> Gerhard Weiss fait partie d'une équipe de 22 auteurs ayant contribué à la rédaction de cet ouvrage collectif dont il est en fait l'éditeur.

- ou le dialogue Homme-Machine, dont les systèmes s'appuient sur le langage naturel pour des échanges avec les utilisateurs,
- ou encore l'interaction dialogique, permettant la communication à un haut niveau sémantique, dans un sous-ensemble du langage naturel.

Cette dernière forme d'interaction, qui se trouve à la frontière entre l'interaction Homme-Machine et les systèmes multi-agents, nous a particulièrement intéressés. A la base, elle est préconisée pour permettre à des utilisateurs d'interagir, dans un sous-ensemble du langage naturel, avec des composants logiciels d'Internet considérés comme des agents conversationnels. Nous la trouvons bien adaptée dans le contexte de notre thèse. Notre Système multi-agents explicatif sera alors constitué d'agents dialogiques. Voilà le troisième volet de notre recherche.

## 1.2 Motivations

Un utilisateur a souvent recours à la simulation qualitative dans le but d'obtenir une description claire et compacte du comportement d'un système. Une telle description ne fournissant qu'un simple énoncé de ce qui se produit, une compréhension plus approfondie est souvent souhaitée.

Dans le cas particulier du très populaire algorithme QSIM (Qualitative SIMulator)[Kuipers 86], développé, au milieu des années quatre-vingt, à l'université du Texas à Austin, l'utilisateur reçoit, en guise de résultat de la simulation, un arbre des comportements, représentant l'ensemble des états du système et les transitions entre états. L'objectif étant de prédire l'ensemble des comportements possibles, l'arbre est construit par croissance en largeur. L'arbre des comportements, au delà de sa complexité dans certains cas, ne répond souvent pas aux attentes de l'utilisateur. Ce dernier pourrait bien se demander en effet, pourquoi tel état est présent dans l'arbre, ou même pourquoi tel autre ne l'est pas? De telles informations sont malheureusement introuvables dans l'arbre des comportements.



Une explication causale, reliant le modèle du système au comportement de ses variables, est donc nécessaire. Elle devra pouvoir montrer, entre autres, que tel comportement, résultat de la simulation, est bien une conséquence du modèle et de l'état précédent.

Des chercheurs se sont déjà intéressés à la question depuis quelques années. Les travaux qui en ont résulté, et sur lesquels nous reviendrons plus loin, nous ont particulièrement surpris par la prise en compte, quasiment nulle, du rôle de l'utilisateur dans la construction de l'explication qui, pourtant, lui est destinée ! Partant de notre conviction qu'une explication ne peut être satisfaisante que si elle découle d'un processus coopératif, le débat sur l'aspect bilatéral de la production d'une explication, et son importance dans l'acceptation de celle-ci par son destinataire, est, à notre sens, définitivement tranché en faveur d'une indispensable coopération entre le système explicatif et l'utilisateur.

Le processus de production d'une explication est une tâche de résolution ayant ses propres connaissances explicatives. Celles-ci devraient provenir de différentes sources, et leur recherche, au moment de la construction d'une explication pourrait bien s'effectuer en simultanéité. Nous pouvons donc d'ores et déjà imaginer la tâche de construction de l'explication, composée d'un ensemble de sous-tâches en interaction. Quoi donc de plus naturel de penser sa modélisation par un système multi-agents ? Les SMA sont en effet mieux adaptés que d'autres techniques de modélisation à générer cette sorte de phénomène émergent. En plus, avec la propriété dialogique de ses agents, le SMA explicatif pourra interagir avec l'utilisateur, à un haut niveau sémantique pour recevoir des requêtes et fournir des explications.

### **1.3 Objectifs de la recherche**

La participation active de l'utilisateur final d'un algorithme de simulation qualitative, destinataire d'une explication, dans le processus de construction de cette explication, constitue l'objectif principal de notre recherche.

Nous devons alors répondre aux préoccupations suivantes :

- Quel profil d'utilisateur notre système explicatif cible-t-il ?
- Quelle architecture proposer pour notre outil explicatif, à même d'assurer la meilleure coopération avec l'utilisateur afin de lui fournir l'explication la plus satisfaisante? Quelles tâches doit-il réaliser? Quelles sont ses possibilités de raisonnement? Quels sont ses modèles de connaissances?
- Une fois l'option SMA explicatif justifiée, quel type de communication établir entre les agents du SMA explicatif ? Comment mettre en place leurs mécanismes de communication?
- Quelles interactions avec l'utilisateur faut-il mettre en place pour assurer une coopération entre ses agents pour produire la meilleure explication souhaitée ?
- Quel mécanisme d'interprétation et de représentation de ces interactions doit être présent dans l'architecture de l'outil explicatif?

Ces questions trouveront leurs réponses dans la suite du présent manuscrit dont nous donnons une description succincte de l'organisation dans le cinquième paragraphe de la présente introduction.

## 1.4 Démarche suivie

Notre recherche a commencé par une étude bibliographique. Celle-ci nous a permis de comprendre que le raisonnement qualitatif, source intéressante de production d'explications, mérite aussi d'être expliqué, au même titre que le raisonnement classique de l'IA. Nous avons opté pour une approche coopérative de cette explication, basée sur le dialogue, dans un sous-ensemble du langage naturel, entre le système explicatif, représenté par un système multi-agents dialogique, et l'utilisateur humain.

Un exemple extrait de la littérature de la simulation qualitative a servi alors de « banc d'essai » pour notre système explicatif, baptisé DIABET, acronyme suggéré par la traduction dans une langue étrangère de la caractérisation de notre

contribution –un outil explicatif à base d’interaction dialogique-, et qui nous rappelle une bien triste maladie.....

## **1.5 Structure du manuscrit**

Notre contribution, et un parcours de l’ensemble des disciplines y ayant attiré, sont présentés dans le présent manuscrit organisé comme suit:

**Chapitre 1: Introduction.** Ce chapitre détaille le contexte pluridisciplinaire de notre thèse, en présente les motivations et objectifs, insiste sur sa principale contribution et décrit la démarche suivie pour la réaliser.

**Chapitre 2: Le raisonnement qualitatif: de la physique naïve aux technologies de l’information.** Ce chapitre vise à faire connaître le raisonnement qualitatif en général, depuis ses premiers pas avec la physique naïve jusqu’à ses dernières applications dans le domaine des technologies de l’information, et la simulation qualitative, à travers l’algorithme QSIM, en particulier.

**Chapitre 3: Explications: De la Trace des Systèmes Experts à l’Interaction Dialogique en Physique Qualitative.** Ce chapitre traite de l’explication comme un acte de vie quotidienne dont il donne une signification vocabulaire et des interprétations de sens commun, avant de s’intéresser à l’explication comme un thème de recherche dans différents domaines des sciences cognitives et éducatives.

**Chapitre 4: Formes de communication et modèle d’agent dialogique.** Dans ce chapitre nous nous intéressons aux systèmes multi-agents, branche importante de l’intelligence artificielle distribuée. Nous y revenons sur le concept d’agent puis celui de la communication entre agents, support de la coordination entre agents, un élément central des systèmes multi-agents. Nous discutons différentes

formes de communication entre agents artificiels d'une part, mais aussi entre agents artificiels et agents humains d'autre part. Nous arrivons alors à la notion d'interaction dialogique et présentons le modèle d'agent dialogique.

**Chapitre 5: Modélisation des Connaissances et du Raisonnement Explicatifs d'un Outil Explicatif pour la Simulation Qualitative.** Ce chapitre concrétise l'idée d'un processus explicatif ayant son propre raisonnement et ses propres connaissances par la modélisation du raisonnement, des connaissances et du texte explicatifs dans un outil explicatif pour la simulation qualitative.

**Chapitre 6: DIABET un système explicatif à base d'agents dialogiques pour la simulation qualitative.** Ce chapitre détaille l'architecture de l'outil explicatif à concevoir, baptisé DIABET, après une discussion préliminaire ayant guidé nos choix de conception.

**Chapitre 7: Bilan et perspectives.** Ce chapitre achève notre manuscrit. Il rappelle alors notre contribution, met le point sur les limites du travail et indique comment elles pourraient être dépassées. Une conclusion le termine alors à son tour.

## Chapitre 2

# Le Raisonnement Qualitatif : de la Physique Naïve aux Technologies de l'information

*"La science cherche le mouvement perpétuel.*

*Elle l'a trouvé : c'est elle-même."*

V. Hugo

Ce chapitre vise à faire connaître le raisonnement qualitatif en général, depuis ses premiers pas avec la physique naïve jusqu'à ses dernières applications dans le domaine des technologies de l'information, et la simulation qualitative, à travers l'algorithme QSIM, en particulier.

Ainsi, après la présentation de la notion de raisonnement qualitatif, nous discuterons l'intérêt de ce type de raisonnement, et remonterons à travers ses origines. Nous en exposerons ensuite, à travers deux exemples choisis dans la littérature, quelques notions de base qui nous permettront de suivre le principe de l'algorithme QSIM que nous présenterons. Les champs d'application de ce type de raisonnement auront, par ailleurs, été énumérés auparavant. Enfin, des techniques de raisonnement qualitatif seront passées en revue pour clore ce chapitre.

### 2.1 Raisonnement qualitatif

Il est largement reconnu que l'intelligence humaine fonctionne au niveau qualitatif. Il devrait en être de même pour l'intelligence artificielle. Un programme d'IA doit pouvoir résoudre un problème en l'absence d'informations quantitatives détaillées, nécessaires dans les modèles numériques de simulation. Pour cela le raisonnement doit permettre:

- la prédiction des états futurs du système étudié,
- l'explication de ses comportements, en se fondant sur la description qualitative de ce système (afin de permettre de mieux comprendre le fonctionnement du système).

Une telle façon de raisonner exprime le mode de raisonnement qualitatif

[Kuipers 94].

## 2.2 Pourquoi le raisonnement qualitatif

L'intérêt du raisonnement qualitatif est multiple:

- la perception par l'homme de l'évolution des paramètres régissant un système est plutôt de nature qualitative, même si ces paramètres sont souvent définis quantitativement;
- dans la résolution des problèmes, on se heurte souvent à un manque de données quantitatives; par ailleurs, le traitement de telles données est parfois coûteux;
- la construction de modèles quantitatifs complets n'est pas toujours possible. En effet, les relations exactes reliant des paramètres ne peuvent pas toutes être formulées mathématiquement. La représentation qualitative permet l'expression explicite des liens de causalité entre les paramètres;
- les systèmes experts manquent souvent de connaissances de bon sens. Ce manque peut être pallié en partie par l'utilisation du raisonnement qualitatif.

Le raisonnement qualitatif constitue aujourd'hui un domaine mature avec une mixture d'activités appliquées et de base. La croissance substantielle de la puissance de calcul disponible, combinée au besoin urgent de produire des logiciels plus articulés, suggèrent une augmentation continue de l'importance du raisonnement qualitatif [Forbus 03].

## 2.3 Origines du raisonnement qualitatif

De Kleer [De Kleer 77] et Hayes [Hayes 78] sont considérés comme les précurseurs du développement du champ «raisonnement qualitatif»: le premier, avec ses travaux sur l'utilisation des méthodes qualitatives pour la résolution des problèmes d'ingénierie, ayant été à la base de la «physique qualitative», et le deuxième, avec son programme ayant visé le développement d'une «physique naïve» qu'il définit comme un «formalisme à grande échelle pour des connaissances de sens commun» [Hayes 78].

### ***2.3.1 Physique qualitative***

La Physique qualitative, née donc dans les années soixante-dix, s'attachait à prédire et expliquer le comportement des mécanismes physiques en termes qualitatifs, donc de manière symbolique. Ses objectifs étaient :

- Faire plus simple que la physique classique en maintenant les distinctions importantes telles que « état » et « oscillation », sans faire appel aux mathématiques des quantités continûment variables et autres équations différentielles.
- Produire, pour les mécanismes physiques, des justifications facilement compréhensibles.
- Servir de base pour les modèles des systèmes experts de « nouvelle génération ».

### ***2.3.2 Physique naïve***

L'objectif de la physique naïve tel que stipulé dans [Hayes 78] était de décrire formellement le monde tel que perçu par le commun des mortels plutôt que de le décrire tel qu'il est pensé par les physiciens. La physique naïve inclut alors aussi bien les connaissances de bon sens bien connues dans le domaine de la physique formelle, que des éléments régulièrement utilisés en dehors du champ de la physique classique.

## **2.4 Champs d'application**

Les systèmes de raisonnement qualitatif ont été utilisés pour résoudre des problèmes dans différents domaines. Nous en citons:

- Explication: les tâches explicatives produisent, à partir de la structure d'un système, une explication du comportement de ce système, en fonction de cette structure. Le circuit régulateur de pression hydraulique [De kleer & al 84] est un exemple de système dérivant des explications à partir de la structure.
- Prédiction: se basant sur la description d'un système dans un état instable, une tâche prédictive produit, à partir de la structure du système et d'un état

initial, une prédiction d'une séquence d'états futurs, ou d'un état stable final. Le problème de la balle lancée en l'air [Forbus 84] en est un exemple.

- **Diagnostic:** partant d'un état ou comportement inconsistant avec la structure supposée d'un système, une tâche de diagnostic détecte l'élément de la structure à l'origine du comportement observé. Un profit considérable peut alors être tiré de l'utilisation des représentations qualitatives. Ces dernières correspondent en effet aux descriptions naturelles appliquées par les concepteurs et autres opérateurs du système, et peuvent donc contribuer à offrir de nouvelles opportunités d'automatisation.

- **Commande:** commander un système nécessite d'en résumer son comportement à un niveau de description permettant d'agir. L'utilisation des représentations qualitatives peut alors s'avérer d'un apport non négligeable. Les concepts utilisés par le logiciel de surveillance peuvent en effet être assimilés à ceux pratiqués par ses utilisateurs, contribuant ainsi à l'amélioration de la communication Homme-Machine.

- **Planification:** partant de la description d'un système à un état donné, et un état objectif à atteindre, une tâche de planification doit décrire les transformations que devra subir le système pour aboutir à l'état visé.

- **Conception:** partant de la description du comportement souhaité pour un système, une tâche de conception produit une structure du système qui aura le comportement désiré. Dans certains domaines, les méthodes et règles de conception sont formulées en langage naturel. L'utilisation des représentations qualitatives peut alors aider à leur formalisation en vue de leur automatisation.

- **Systemes tuteurs intelligents et environnements d'apprentissage:** fournissant un langage pour les modèles mentaux de l'apprenant, les représentations qualitatives simplifient la communication entre le logiciel et l'apprenant.

Plus récemment, le raisonnement qualitatif a tenté d'investir de nouveaux domaines de recherche comme les systèmes interactifs [Hartley et al 06] et les



technologies de l'information [Ricardo et al 06], ou des domaines de notre vie quotidienne comme le problème de l'ozone [Zabkar et al 05] ou même la vie politique [Forbus et al 05].

## **2.5 Notions de base**

Les notions présentées dans ce paragraphe sont généralement extraites de [Forbus 84] [Kuipers 86], [Kuipers 94], [Kuipers 97], [Mallory 98], [Kuipers 01], [Duong 05]. Certaines d'entre elles seront présentées à travers un exemple tiré de [Mallory 98], d'autres à travers un exemple tiré de [Throop & al 94]. Nous exposons les deux exemples ci-après.

### ***2.5.1 Exemple1***

Il s'agit de l'exemple classique, du moins dans le milieu du raisonnement qualitatif, du remplissage d'une baignoire vide avec le drain partiellement ouvert. On fait donc couler l'eau du robinet dans la baignoire, à un débit constant. On observe alors une élévation du niveau de l'eau dans la baignoire en même temps que s'élève le taux d'écoulement de l'eau à travers le drain. D'après cette observation, un des deux phénomènes suivants devrait arriver:

- soit la baignoire déborde,
- soit le taux d'écoulement de l'eau à travers le drain atteint le débit d'écoulement du robinet. Le niveau de l'eau dans la baignoire arrête alors de s'élever et arrive à un état d'équilibre.

Une telle conclusion n'est pas le résultat de la recherche d'une solution exacte ou numérique au problème. Une telle solution aurait nécessité des connaissances plus précises comme le rapport entre le taux d'écoulement de l'eau à travers le drain et le taux d'élévation du niveau de l'eau dans la baignoire.

### ***2.5.2 Exemple2***

Il s'agit cette fois de lancer une balle en l'air et d'examiner sa trajectoire. La balle gravite pendant un moment, ralentit à un arrêt, puis retombe par terre atteignant une vitesse maximale à la descente. En observant la balle voler dans

l'air, on voit une trajectoire continue. Pourtant, et à des fins de raisonnement, des segments de cette trajectoire peuvent être traités comme satisfaisant une description simple, comme « la balle monte en ralentissant » par exemple. Ces segments peuvent être séparés par des points culminants, appelés bornes, comme le point temporel et spatial où la balle s'arrête au sommet de sa trajectoire, par exemple.

### 2.5.3 Variables et bornes

Une variable qualitative représente l'évolution d'une quantité dans le temps. Elle s'exprime comme une fonction du temps  $f(t)$ , continûment dérivable sur l'intervalle temporel borné  $[t_0, t_n] \subset \mathbb{R}$ , constituant son domaine de définition.

Les variables sont numériques, réelles, mais leur plage de variation est découpée en intervalles mettant en évidence certaines valeurs ou grandeurs particulières dites bornes.

Une borne, traduction que nous avons préféré pour «landmark» [Kuipers 86], est un point d'assemblage naturel, qui sépare des ensembles continus de valeurs en régions qualitativement distinctes. Une borne est un nom symbolique pour un nombre réel particulier, dont la valeur peut être connue ou non. Elle sert de frontière pour une région qualitative. Notons ici, que Kuipers distingue la notion de borne de celle de valeur floue inhérente à la logique floue [Zadeh 79].

Les variables n'ont pas de valeur limite supérieure ou inférieure précises. Elles ont plutôt, respectivement, la borne maximale «inf» (infinité), ou minimale «minf» (infinité minimale). Par ailleurs, seule la valeur numérique 0 peut être associée à une borne.

Une variable est caractérisée par:

- sa grandeur qualitative notée  $qmag$ . Il s'agit d'une borne particulière, ou un intervalle entre deux bornes,

$$qmag(f) = \begin{cases} l_i & \text{if } f(t) = l_i \\ (l_i, l_{i+1}) & \text{if } f(t) = (l_i, l_{i+1}) \end{cases}$$

- son sens de variation qualitatif, noté  $qdir$ , qui peut être « inc » (en incrémentation), « dec » (en décrémentation) ou « std » (en stabilité).

$$qdir(f) = \begin{cases} inc & \text{if } f'(t) > 0, \\ std & \text{if } f'(t) = 0, \\ dec & \text{if } f'(t) < 0. \end{cases}$$

Le couple ( $qmag$ ,  $qdir$ ) constitue alors la valeur qualitative de la variable, notée  $qval$ ,

- et son signe, déterminé par la présence obligatoire de 0 dans son espace de quantités.

Considérons, pour l'exemple de la baignoire cité précédemment, la variable représentant la quantité de l'eau dans le baquet. Les seules valeurs limites exigées pour cette variable sont 0 («vide») et «plein» (la valeur 0 a donc été associée à la borne «vide»). Ses seules bornes possibles sont 0, «entre vide et plein» notée (0 plein) et «plein». Sa valeur qualitative, quelques instants après le début de l'écoulement d'eau, sera ((0 plein), inc).

#### **2.5.4 Espace des quantités**

L'ensemble des bornes pour une variable particulière est appelé espace des quantités. Forbus [Forbus 84] utilise le terme «espace des quantités» pour décrire un ensemble ordonné de valeurs qualitativement différenciées d'une quantité particulière. La signification de ce terme a ensuite été étendue pour désigner tout ensemble résultant de la division qualitative d'un intervalle continu de valeurs.

Dans [Milne et al 93], l'espace des quantités est considéré comme une partition de la « ligne réelle » où une valeur qualitative correspond à un sous-ensemble de  $\mathbb{R}$ , ensemble des nombres réels.

Kuipers quant à lui, regrette que certaines applications du raisonnement qualitatif, n'ayant pas respecté la distinction entre borne et valeur floue relatée précédemment, considèrent la logique floue comme une des alternatives possibles à la notion d'espace des quantités [D'Ambrosio 87].

### 2.5.5 *Etats et comportements qualitatifs*

Un état qualitatif est un ensemble de propositions caractérisant un comportement, qualitativement distinct, d'un système. Pour une balle lancée en l'air par exemple, un état qualitatif est représenté par les informations sur les paramètres physiques accompagnant sa chute (vitesse, accélération...) ainsi que du sens de variation des paramètres de la balle (les coordonnées de sa position...).

Une séquence d'états qualitatifs apparaissant dans un intervalle de temps déterminé constitue un comportement qualitatif. Ce dernier peut être décrit à travers des connaissances purement qualitatives, ou purement quantitatives ou encore une mixture des deux.

En résumé donc, un système est un ensemble de variables. L'état d'un système à l'instant  $t$  est l'ensemble de toutes les valeurs qualitatives des variables qui le constituent. Le comportement d'un système est décrit par la séquence de ses états qualitatifs sur l'ensemble  $[t_0, t_n]$ .

### 2.5.6 *Contraintes et équations différentielles qualitatives*

Une équation différentielle qualitative (EDQ) est une abstraction d'une équation différentielle ordinaire, consistant en un ensemble de variables réelles, reliées par des contraintes.

Ces dernières sont, d'une part algébriques, et d'une autre part différentielles. En fait, et au delà des opérations d'addition, de négation, de produit et de dérivation, on ne précise que le caractère monotone des relations et les points critiques (y compris à l'infini). Nous en présentons ici quelques exemples en Lisp, extraits de [Guerrin et al 01] :

$$\begin{aligned}
 (\text{add } x \ y \ z) &\equiv \forall t \quad x(t) + y(t) = z(t) \\
 (\text{mult } x \ y \ z) &\equiv \forall t \quad x(t) \times y(t) = z(t) \\
 (\text{minus } x \ y) &\equiv \forall t \quad -x(t) = y(t) \\
 (\text{d/dt } x \ y) &\equiv \forall t \quad \frac{dx}{dt} = y(t). \quad (\text{constant } x) \equiv \forall t \quad \frac{dx}{dt} = 0
 \end{aligned}$$

Des relations fonctionnelles peuvent, d'une autre part, être représentées. Nous en citons  $(M+, x, y)$  exprimant que  $y(t)$  est une fonction monotone croissante de  $x(t)$ , et  $(M-, x, y)$  qui exprime que  $y(t)$  est une fonction monotone décroissante de  $x(t)$ .

La théorie des EDQs s'appuie sur le calcul dans l'ensemble des signes  $S = \{\text{positif, nul, négatif, indéterminé}\}$ .

Les équations sont plutôt vues comme des contraintes qui peuvent être moins complètement spécifiées. La résolution de base peut consister, étant donnée une spécification déterminée de l'état initial, à:

- trouver tous les états compatibles (algorithme CFilter).
- Donner l'arbre des comportements du système, représentant toutes les trajectoires dynamiques qualitatives qui satisfont les contraintes, et un état initial donné (algorithme QSIM).
- Donner le graphe de transition du système, les trajectoires étant des chemins dans ce graphe (approche de l'envisonnement total). Il faut pouvoir énumérer les états.

Les QDEs, implémentées dans l'algorithme QSIM notamment, sont à la base d'une des multiples approches de raisonnement qualitatif dont nous présentons quelques exemples ci-après.

## 2.6. Approches du raisonnement qualitatif

De multiples approches de raisonnement qualitatif sont donc relatées dans la littérature. Nous en présentons les suivantes :

### 2.6.1 Approche par confluences

Les confluences représentent des équations linéaires à plusieurs variables dont les paramètres prennent des valeurs qualitatives.

L'approche par confluences, qui discrétise l'intervalle des valeurs des variables aux trois valeurs  $\{+ 0 -\}$ , décrit un système en fonction de trois éléments: la matière, les composants et les conduits. Le composant agit sur la

matière que le conduit transporte d'un composant à un autre. Un composant est décrit par un ensemble de variables, un ensemble de confluences et un ensemble de connections. L'assemblage des différents composants constitue le modèle du système global.

### ***2.6.2 Approche par ordre de grandeur relative***

Cette approche permet la comparaison qualitative d'entités sans aucune référence à une échelle absolue. L'information concernant une variable donnée est toujours exprimée relativement à d'autres variables considérées. C'est le système formel FOG [Milne et al 93] qui est à la base de cette approche. Trois opérateurs, en l'occurrence « *négligeable par rapport à* », « *a le même signe et le même ordre de grandeur que* » et « *près de* », y sont utilisés pour exprimer des relations entre les variables, résultant sur un modèle statique du système à un point d'exploitation donné de ce dernier. Il est à noter que malgré les avantages reconnus à ce modèle, des problèmes concernant l'insuffisance de certaines relations d'ordre ont été décelés. Saadi en faisait état dans [Saadi 2001] et proposait alors pour les éviter, tout en profitant des avantages de l'utilisation des relations floues, une approche basée sur un ensemble plus riche de relations d'ordres de grandeurs et sur l'approximation linguistique [Sahnoun et al 90].

### ***2.6.3 Approche par fonctions de propagation***

Cette approche est qualifiée de causale du fait que le modèle du système est supporté par un graphe orienté où les nœuds représentent les variables du système et les arcs symbolisent l'influence d'une variable sur une autre.

Les fonctions de propagation, encore dites fonctions de transfert, définissent une contrainte comportementale entre les variables d'entrée et les variables de sortie. Aussi, à chaque fonction temporelle en entrée, est associée une fonction temporelle en sortie.

## **2.7 Techniques de raisonnement qualitatif**

Une large variété de techniques de raisonnement qualitatif ont été

développées, utilisant les notions vues précédemment. Nous nous intéressons de suite à deux d'entre elles: le raisonnement causal, et la simulation qualitative.

### ***2.7.1 Raisonnement causal***

La causalité est un des concepts essentiels pour raisonner sur les systèmes physiques. Elle tient une place de choix dans le raisonnement qualitatif, même si les objectifs de ce dernier dépassent de loin ceux du raisonnement causal, objet lui-même de nombreuses recherches [Mokhtari 97] [Kayser et al 98] [Halpern et al 05]. Nous nous intéresserons à cette notion, à cause - tiens donc - de l'étroitesse de sa liaison avec l'idée de l'explication. Nous ne chercherons donc pas à la définir

- serait-elle d'ailleurs définissable ? <sup>-1</sup> mais plutôt à la situer dans le cadre de la physique qualitative en général et de la simulation qualitative en particulier.

La causalité est considérée [Dague et al 04a] comme une théorie de « comment le système fonctionne » qui fait le lien entre le raisonnement sur la structure et le raisonnement sur la fonction, tous deux à l'œuvre dans la plupart des tâches de raisonnement sur les systèmes physiques artificiels. Elle joue un rôle dans les tâches de conception, de diagnostic, de commande et d'explication des systèmes physiques.

Parler de raisonnement causal, c'est reconnaître, comme stipulé dans [Dague & al 04b], qu'un énoncé du type « A cause B », a bien des conséquences, notamment en sciences cognitives.

Différentes méthodes de raisonnement causal ont été mises en œuvre dans le cadre du raisonnement qualitatif. Nous en citons les principales, décrites dans [Dague et al 04a]:

- La causalité mythique [De Kleer et al 84] : qui peut être vue comme une méthode intuitive qui cherche à propager de proche en proche le sens

---

<sup>1</sup> Dubois et Prade se sont posés la question inverse [Dubois et al 03] en se basant sur les affirmations de Zadeh [Zadeh 01] et bien d'autres auteurs sur la possibilité de définir la causalité.

d'évolution des variables en réponse à une perturbation. Elle utilise pour cela des heuristiques.

- L'ordonnancement causal [Iwasaki et al 86a] [Iwasaki et al 86b] [Iwasaki 88] [Iwasaki et al 94]: qui peut être qualifié de méthode calculatoire puisque sont confondus enchaînement causal et enchaînement de calcul des valeurs de variables, sans référence particulière au système physique sous-jacent.
- L'approche par graphes de liaison [Top et al 91][Dauphin-Tanguy 00]: qui peut être qualifiée d'approche méthodologique pour la physique en ce qu'elle propose un langage unifié à caractère graphique de modélisation qui s'appuie sur une catégorisation des phénomènes physiques.

Forbus [Forbus 84], lui, parlait de changements, en se posant aussi bien les questions: «quels changements se produisent et comment?», mais aussi: «pourquoi les choses changent et qu'est ce qui cause le changement?». C'est d'ailleurs cette dernière question, dont la réponse était: «ce sont les processus qui causent le changement », qui était à l'origine de la théorie des processus qualitatifs, considérée alors comme une autre technique de raisonnement qualitatif, et dont nous disons quelques mots ci-après.

### ***2.7.2 Théorie des processus qualitatifs***

Le principe de cette théorie est que les processus sont au cœur de la compréhension humaine du monde physique. Les phénomènes d'écoulement, de mouvement, de pression ou encore d'ébullition, sont des exemples de processus.

Un processus est défini par cinq éléments: les êtres ou individus, les préconditions, les conditions sur les valeurs, les relations et les influences.

La présence des êtres spécifiés, ajoutée à la satisfaction des préconditions et des conditions sur les valeurs, implique la validité des relations et des influences.

Présentons, à titre illustratif, l'exemple suivant de la chute d'une bille de fer à travers une flamme:



Une bille de fer tombe, à cause du phénomène de la gravité. Elle atteint une flamme. Au moment de son passage au travers de la flamme, un flot de chaleur provoque une augmentation de la température de la bille de fer. Un moment après, la bille quitte la flamme mais continue à chuter, comme illustré dans le schéma indicatif ci-après

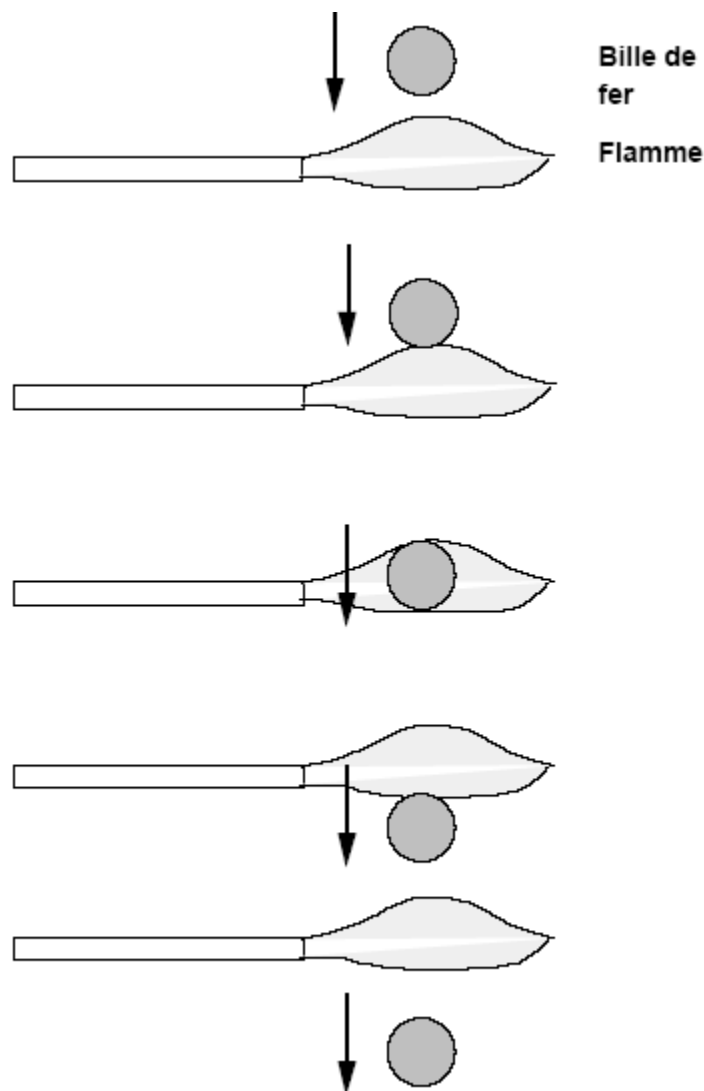


Figure 2.1 Chute d'une bille de fer dans une flamme

Le raisonnement causal, appliqué sur cet exemple, se traduit par, B symbolisant la bille:

Quoi:	Position(B), Température(B)
Comment:	Position(B) décroît, Température(B) augmente
Pourquoi:	Mouvement, Flot de chaleur

D'un autre côté, les processus sont:

### **Processus Flux-de-Chaleur**

Etres:

src un objet, AUneQuantité(src, chaleur)

dst un objet, AUneQuantité(dst, chaleur)

chemin un Chemin-Chaleur, Connection-Chaleur(chemin,src,dst)

Préconditions:

Aligné-Chaleur(chemin)

ConditionsSurLesvaleurs:

$A[\text{température}(\text{src})] > A[\text{température}(\text{dst})]$

Relations:

Soit flux une valeur

$A[\text{flux}] > \text{ZERO}$

flux a (température(src) - température(dst))

Influences:

I (chaleur(src), A[flux])

I (chaleur(dst), A[flux])

### **Processus Mouvement(B, dir)**

Etres:

B un objet, Mobile(B)

dir une direction

Préconditions:

Direction-libre(B,dir)

Direction-De(dir, vitesse(B))

ConditionsSurLesvaleurs:

$A[\text{vitesse}(\text{B})] > \text{ZERO}$

Influences:

I (position(B),A[vitesse(B)])

Du point de vue des sciences cognitives, le raisonnement causal se rapproche d'un type de raisonnement plus général sur les systèmes physiques appelé « envisionnement », considéré d'ailleurs comme une technique de raisonnement qualitatif. Parlons-en:

### ***2.7.3 Envisionnement***

Cette technique, dont le nom est introduit pour la première fois par De Kleer [De Kleer 77], à propos d'un système de résolution de problèmes en mécanique, consiste à prédire grossièrement, à partir d'une connaissance qualitative, le comportement d'un système physique dans une situation donnée. Techniquement, elle engendre, sous forme d'un arbre, des successions d'états qualitatifs, décrivant ce qui pourrait arriver. Il s'agit de l'arbre des comportements, dont une vision alternative est celle du graphe des transitions, encore appelé envisionnement total, dont les chemins représentent implicitement les comportements qualitatifs possibles.

L'envisionnement a servi de base à la simulation qualitative, autre technique de raisonnement qualitatif, détaillée ci après:

### ***2.7.4 Simulation qualitative***

La simulation qualitative est donc une autre technique de raisonnement qualitatif. Elle était proposée pour l'analyse qualitative des systèmes dynamiques continus. Elle permet la génération automatique des comportements qualitatifs de variables réelles continues, contraintes par un ensemble d'équations différentielles qualitatives, à partir de la description qualitative de la structure d'un système et d'un état qualitatif initial. Une telle structure inclut une abstraction qualitative de l'étendue de chaque variable et les relations qualitatives entre les variables. A la différence d'autres méthodes basées sur des équations différentielles ordinaires, la simulation qualitative s'appuie sur des connaissances imprécises, voire incomplètes du système étudié. Elle nécessite alors:

- des représentations des structure et comportement qualitatifs d'un système, et
- des algorithmes pour déduire un comportement à partir d'une structure et des conditions initiales.

Les algorithmes de simulation qualitative développés devaient alors répondre à ces deux exigences. Quatre dimensions principales les ont caractérisés:

- leurs états initiaux,
- les conditions utilisées pour filtrer les états ou les transitions,
- la génération de nouvelles bornes, et
- la quantité d'espace exploité par les éventuels nouveaux comportements.

QSIM est le plus populaire de ces algorithmes. Il est donc naturellement la cible de notre système explicatif. Nous en parlons ci-après:

### **2.7.5 QSIM**

L'algorithme QSIM effectue la simulation qualitative en dérivant les successeurs immédiats de chaque état qualitatif, répétant cette étape pour accroître le graphe des comportements à partir de l'état initial placé à sa racine. Pour garantir que tous les comportements possibles soient prévus, il est nécessaire:

- d'abord, que toutes les transitions possibles des valeurs qualitatives soient prévues,
- et ensuite que des combinaisons des valeurs qualitatives ne soient supprimées que lorsqu'elles sont contradictoires.

La phase de génération successive de QSIM consiste à résoudre les contraintes des EDQs.

La résolution des contraintes consiste donc:

- d'abord à affecter des valeurs qualitatives à des variables libres afin de compléter une spécification incomplète d'un état initial,
- puis à déduire tous les états successifs possibles à partir de l'état courant du système, selon le critère de satisfaction des contraintes qualitatives, se traduisant par des règles de transition basées sur des règles de continuité. Ainsi toute transition du sens de variation  $qdir$  d'une variable entre les sens  $inc$  et  $dec$

ou inversement, devra passer par le sens std (la dérivée s'annulant à un extremum). Deux catégories de règles de transition sont alors utilisées :

- les règles de p-transition: à l'instant  $t_i$ , les valeurs qualitatives sont générées au prochain intervalle de temps  $(t_i, t_{i+1})$ , comme illustré ci-après:

	<b>Qval(f, <math>t_i</math>)</b>	<b>Qval(f, <math>(t_i, t_{i+1})</math>)</b>
<b>P1</b>	(lj ,std)	(lj ,std)
<b>P2</b>	(lj ,std)	((lj,lj+1),inc)
<b>P3</b>	(lj ,std)	((lj-1,lj),dec)
<b>P4</b>	(lj ,inc)	((lj,lj+1),inc)
<b>P5</b>	((lj,lj+1),inc)	((lj,lj+1),inc)
<b>P6</b>	(lj,dec)	((lj,lj+1),dec)
<b>P7</b>	((lj,lj+1),dec)	((lj-1,lj),dec)

Figure 2.2 Règles de p-transition

- les règles de i-transition: à l'intervalle de temps  $(t_i, t_{i+1})$ , les valeurs qualitatives sont générées au prochain instant  $t_{i+1}$ , comme illustré ci-après:

	<b>Qval(f, <math>(t_i, t_{i+1})</math>)</b>	<b>Qval(f, <math>t_i</math>)</b>
<b>I1</b>	(lj,std)	(lj, std)
<b>I2</b>	((lj,lj+1),inc)	(lj+1,std)
<b>I3</b>	((lj,lj+1),inc)	(lj+1,inc)
<b>I4</b>	((lj,lj+1),inc)	((lj,lj+1),inc)
<b>I5</b>	((lj,lj+1),dec)	(lj,std)
<b>I6</b>	((lj,lj+1),dec)	(lj,dec)
<b>I7</b>	((lj,lj+1),dec)	((lj,lj+1),dec)
<b>I8</b>	((lj,lj+1),inc)	(l*,std)
<b>I9</b>	((lj,lj+1),dec)	(l*,std)

Figure 2.3 Règles de i-transition

Une telle sélection constitue un premier filtrage des états successifs candidats permettant alors d'éliminer les états inconsistants. Un filtrage global est ensuite

effectué selon certains critères non spécifiés dans les EDQs. Ainsi, le critère de la différence qualitative permet d'éliminer un état identique à son prédécesseur. Par ailleurs, la simulation s'arrête à l'atteinte d'un état d'équilibre ou au passage du système par un état déjà rencontré (comportement cyclique). Ceci équivaut à l'exploration complète de l'arbre des comportements construit, rappelons le, par croissance en largeur...

La popularité établie de l'algorithme QSIM n'a pas empêché qu'on puisse lui proposer des extensions, comme celle consistant à affecter des valeurs qualitatives floues aux variables qualitatives dans FUSIM (FUZZY SIMULATION) [Shen et al 93], ou encore celle ayant proposé d'étendre la méthode QSIM classique avec le concept de courbature qualitative [Abul Hossain & al 96], voire lui préférer d'autres méthodes de simulation pour une classe particulière de systèmes dynamiques, les systèmes hybrides, où il est jugé plutôt approximatif [Nomura 03].

A présent, passons en revue d'autres techniques de raisonnement qualitatif.

### ***2.7.6. Création de modèles***

Les méthodes de création automatique de modèles pour une tâche spécifique, contribution considérable de la physique qualitative, formalisent des connaissances typiquement implicites en ingénierie et autres mathématiques traditionnelles.

De nombreux algorithmes de création automatique de modèles ont été développés, dont l'évolution rapide a sensiblement réduit le recours aux méthodes traditionnelles utilisant des lois et simplifications spécifiques au système et autres tâches implicites.

Parmi ces algorithmes, le plus simple consiste, étant donné une représentation propositionnelle du scénario objet du raisonnement, à instancier chaque fragment possible du modèle à partir d'une théorie du domaine.

D'autres, plus sophistiqués, explorent les suppositions de modélisation de manière à contrôler les aspects de modélisation à instancier.

### ***2.7.7 Analyse comparative***

L'analyse comparative permet de déterminer quels changements interviennent dans une situation suite à la modification d'un de ses paramètres. Il est certes possible qu'une telle question trouve réponse dans les méthodes analytiques traditionnelles ou autres méthodes d'analyse à sensibilité numérique, mais ces dernières s'avèrent inopinées pour deux raisons principales :

- d'abord, parce qu'elles sont insuffisamment maîtrisées par le public intéressé par ce type de question,
- ensuite, parce que les techniques purement quantitatives n'ont pas de bonnes capacités explicatives.

### ***2.7.8 Raisonnement téléologique***

Ce type de raisonnement relie la structure et le comportement d'un système aux objectifs qui ont motivé sa conception. Ainsi, décrire le fonctionnement d'un système reviendrait à:

- attribuer une fonction à chacun de ses composants,
- expliquer comment ces fonctions réalisent ensemble les objectifs de conception du système.

### ***2.7.9 Raisonnement spatial***

Le raisonnement spatial qualitatif se distingue des autres formes de raisonnement spatial par l'extraction et la représentation explicite des représentations qualitatives de la forme et autre espace. Par ailleurs, ses techniques de traitement sont empruntées aux recherches dans les domaines de la vision et la robotique.

### ***2.7.10 Interprétation des données***

L'interprétation des données, comme technique de raisonnement qualitatif, consiste à:

- expliquer une séquence temporelle de mesures en termes d'une séquence d'états qualitatifs,
- créer un modèle qualitatif d'espace de phase en interprétant les résultats d'expériences de simulations numériques.

### ***2.7.11 Planification***

La physique qualitative, grâce à sa capacité de fournir des prédictions à partir d'informations incomplètes, s'est avérée un composant intéressant pour les systèmes de planning. Ainsi, différentes approches ont tenté de faire du raisonnement qualitatif une partie entièrement intégrante de ces systèmes [Hogge 87] [Forbus 89] [De Coste 91] [Drabble 93].

Ce chapitre était donc destiné à faire connaître le raisonnement qualitatif, domaine d'application de notre futur outil explicatif. Nous y avons présenté, en nous aidant d'exemples, outre les principaux concepts et notions de base, des techniques de raisonnement qualitatif et un algorithme de simulation qualitative. Les nombreuses références bibliographiques qui y sont mentionnées permettront de fournir tous les détails souhaités.



## Chapitre 3

# Explications: De la Trace des Systèmes Experts à l'Interaction Dialogique en Physique Qualitative

*"Nous ne connaissons pas le vrai si nous ignorons les causes."*

**Aristote**

Expliquer est, selon le dictionnaire de la langue française [Hachette 01], l'action de rendre un énoncé clair et non ambigu. L'explication est, de son côté, définie comme un ensemble d'actes communicatifs qui font comprendre quelque chose à quelqu'un et une demande d'explication est alors assimilée à une demande de comprendre quelque chose. Une définition plus formelle est donnée dans le premier paragraphe de ce chapitre.

Par ailleurs, le sens de l'explication peut dépendre de la fonction<sup>1</sup> qui lui est assignée [Balacheff 90].

D'un autre côté, nous soutenons que le terme explication peut être défini différemment selon qu'il soit interprété dans la vie de tous les jours, nous en parlerons dans le troisième paragraphe de ce chapitre, ou au sein de la communauté des sciences cognitives, nous y consacrerons les quatrième, sixième et septième paragraphes.

L'explication a été le thème de nos premiers pas dans le domaine de la recherche, nous y reviendrons dans le cinquième paragraphe.

### 3.1 Définition formelle

Plus formellement donc, et pour reprendre la terminologie de Hempel [Hempel 66], on appelle:

- explanandum: l'entité à expliquer (processus physique, phénomène, actions pour accomplir une tâche, ...). Soit, par exemple, «je prends mon parapluie»

---

<sup>1</sup> Balacheff affirmait en fait que différentes fonctions, ne s'excluant pas mutuellement, pouvaient être assignées à l'explication. Ainsi distinguait-il l'explication pour s'expliquer, l'explication pour prouver, l'explication pour comprendre et l'explication pour « faire comprendre ».

- explanans: l'entité qui constitue l'explication (texte, démonstration, énoncé, propositions, représentation mentale, ....). Soit, par exemple, «il pleut»
- explication: le processus de production des explanans pour des explananda. Soit, par exemple, «je prends mon parapluie parce qu'il pleut».

Une telle définition formelle de l'explication a été la base d'une étude linguistique sur les marques de l'explication, menée par le groupe  $\lambda-1$  ("Logique et Langage"), un groupe de professeurs et de chercheurs traitant des rapports possibles entre l'enseignement de la langue et celui de la pensée logique, et dont nous présentons un extrait dans le deuxième paragraphe de ce chapitre.

### 3.2 Explication: étude linguistique

Nous présentons donc ici un extrait de l'étude menée par le groupe  $\lambda-1$  que nous avons tiré de [Karsenty et al 96]:

Les membres du Groupe  $\lambda-1$  considèrent, et conformément donc à la terminologie de Hempel, une explication comme un énoncé constitué de trois composants :

- l'explandum, ou information à expliquer, noté p,
- l'explanans, ou contenu explicatif, noté q,
- et l'explication qui constitue le lien entre p et q.

Un énoncé de la forme p parce que q représente pour ces auteurs un exemple typique de l'acte explicatif.

Pour définir la spécificité de ce type d'énoncé, ils envisagent alors les contraintes suivantes:

#### 3.2.1 Contrainte sur l'explandum

La vérité de p doit toujours être reconnue. C'est d'ailleurs ce qui permet de distinguer sémantiquement les deux tournures suivantes : "p parce que q " et "q ; aussi p " comme le montrent les deux énoncés suivants:

- Je suis sorti parce qu'il faisait beau
- Il faisait beau ; aussi suis-je sorti.

Dans les deux cas, q est donné pour l'origine de p. Mais lorsqu'on emploie "parce que", p est considéré comme un fait déjà connu, que l'on cherche à expliquer, "cette admission préalable (de p) étant cela même qui permet de parler d'un acte d'explication"<sup>1</sup>

### ***3.2.2 Contraintes sur l'explanans***

Aucune contrainte particulière ne semble s'appliquer sur q. Le producteur d'explication (locuteur) ne présente pas nécessairement q comme déjà connu du destinataire de cette dernière (auditeur), ni davantage comme inconnu. Mais il faut ajouter que si l'auditeur refuse d'admettre la vérité de q, il ne pourra pas, a fortiori, tenir q pour cause de p (autrement dit, un énoncé de type : p parce que q "implique", parmi ses multiples conséquences, la vérité de q)

### ***3.2.3 Contraintes sur le lien entre explanandum et explanans***

Le contenu qui est asserté dans une explication est la relation causale entre p et q. C'est ce lien qui est présenté comme un apport d'information nouvelle. Ceci conduit d'ailleurs les auteurs à poser que la nécessité de croire q découle logiquement, une fois p considéré comme incontestable, de la causalité affirmée entre p et q "

Ces travaux, en se penchant sur l'utilisation de la conjonction " parce que ", amènent donc à dire que la spécificité de l'acte d'explication repose les deux aspects suivants :

- l'admission préalable de l'explanandum
- l'énonciation d'une relation causale entre l'explanandum et un ou plusieurs explanans

---

<sup>1</sup> Extrait de [Groupe  $\lambda$ -1 75], page 262.

### **3.3 Explication: interprétations de sens commun**

L'explication est une tâche quotidiennement effectuée par les êtres humains qui l'utilisent pour justifier certains de leurs actes, communiquer leur savoir, ou s'en servent pour la prise de décision. Généralement, une explication est vue comme tout ce qui peut identifier la cause d'un événement particulier, comme lorsqu'on dit « le match est reporté à cause des conditions météorologiques ». Elle peut être, dans [Boutouhami et al 06], un fait non connu comme certain, mais s'il s'avérait vrai, constituerait une cause réelle du fait à expliquer. Cependant, on peut utiliser des explications fonctionnelles comme dans la phrase « j'ai pris mon parapluie pour me couvrir de la pluie », ou intentionnelles comme dans la phrase « je prépare ma valise pour partir en voyage ». La question d'acceptation d'une explication par son destinataire reste quand même posée, car principalement influencée par les objectifs recherchés par ses deux protagonistes : son producteur et son destinataire.

### **3.4 Explication: thème de recherche en Intelligence Artificielle**

Une tâche humaine, si habituelle, telle que l'explication, n'a pas manqué de susciter l'intérêt des chercheurs en intelligence artificielle dont certains ont même caractérisé l'I.A de « la science de l'explication fournie par le système à son utilisateur, dans le langage de ce dernier ».

Ainsi, le terme explication a été appréhendé de deux manières en intelligence artificielle:

- la première considère l'explication comme une partie du processus de raisonnement lui-même,
- la deuxième interprétation traite de l'aspect usager de l'explication, en tentant de rendre le raisonnement, son résultat ou encore l'usage de ce résultat, compréhensible par l'utilisateur.

Ces deux interprétations ont permis l'émergence de différentes directions de recherche sur le thème de l'explication en I.A:

- la première considère que n'est explicable que ce qui est explicite. Elle s'attache ainsi à prendre en compte l'explication dès le début de la conception du système à base de connaissances (SBC) afin que les connaissances et les raisonnements mis en oeuvre au cours de la résolution sur le domaine soient accessibles au module d'explication [Lemaire et al 91] [Jimenez 92] [Alexis et al 96].
- la seconde s'intéresse au processus de construction d'explication, ie à la modélisation du raisonnement explicatif tenu par le SBC explicatif: que faut-il expliquer, comment, à quel moment? [Bourcier et al 94].
- la troisième s'intéresse au rôle joué par l'utilisateur dans la production d'une explication, qu'elle considère comme un processus coopératif dont les agents (système et utilisateur) doivent interagir dans un contexte commun [Brézillon 92a] [Brézillon 92b] [Brézillon 93a] [Brézillon et al 94] [Brézillon et al 95a] [Brézillon et al 95b].
- la quatrième s'intéresse à la génération d'une explication.

Les fruits des différents travaux effectués dans l'une ou l'autre de ces directions sont nombreux. Nous en citons les principaux:

MYCIN [Buchanan et al 84] était l'un des premiers systèmes à fournir des explications. Il pouvait produire une trace de son raisonnement, un enchaînement des règles utilisées, pour expliquer la solution qu'il a produite. Une explication dans MYCIN était alors qualifiée d'explication trace. Sa caractéristique principale est le couplage très fort entre la ligne de raisonnement et la ligne explicative: les règles du système n'étant qu'une représentation codée du processus de raisonnement du système, la trace d'exécution ne pouvait servir pour justifier les décisions du système.

Swartout proposait alors de pallier à cette limite dans son système XPLAIN [Swartout 83]. L'approche d'explication suivie dans XPLAIN faisait appel à la programmation automatique: le programmeur automatique, l'écrivain, construisait à partir de la base de connaissances un programme prêt à être

exécuté. Ayant lui-même construit son programme de raisonnement, il était donc naturellement apte à justifier son raisonnement. Avec XPLAIN, un nouveau paradigme de SBC explicatif était né. Cependant, le bas niveau de représentation des connaissances dans ces systèmes (règles, frames...) ne pouvait permettre l'obtention d'une explication à un haut niveau d'abstraction.

Chandrasekaran [Chandrasekaran et al 89] suggérait alors de décomposer le système à expliquer en une hiérarchie de tâches contenant des connaissances explicatives de base aux niveaux d'abstraction appropriés, chacune des tâches apportant sa contribution à l'explication du système global.

Dans les travaux que nous venons de citer, deux points importants méritent d'être relevés, qui ont été à l'origine d'autres travaux sur les explications:

- le premier est le fait que la ligne explicative était conforme à la ligne de raisonnement. Pourtant, il était bien reconnu que rares étaient les experts humains qui expliquaient un processus de raisonnement complexe exclusivement en termes du processus de résolution utilisé. Tenant compte de cette réalité, Wick [Wick 92] proposait une stratégie reconstructive d'explication qui combinait le raisonnement du système expert à d'autres connaissances du domaine assurant un meilleur transfert des compétences du système à l'utilisateur.
- Le deuxième est le fait que l'explication était exclusivement produite par le système. Pourtant, elle devait permettre à l'utilisateur à qui elle était destinée d'assimiler une nouvelle connaissance. Elle n'aurait alors atteint son objectif que si ce dernier pouvait facilement intégrer la nouvelle connaissance à l'ensemble des connaissances qu'il possédait déjà. Karsenty et Brézillon [Karsenty et al 95] ont, par exemple, montré que lors de dialogues de validation de schémas conceptuels de bases de données, réunissant un concepteur et des futurs utilisateurs, aucune explication apportée par le concepteur (l'expert) ne portait sur son raisonnement à l'origine de la structure de la base de données proposée.

Ses explications, qui pour la grande majorité étaient données spontanément, portaient plutôt:

- soit sur la signification des éléments composant les schémas conceptuels,
- ou sur leur justification en termes de besoins utilisateurs,
- ou encore sur leur mode d'utilisation dans le travail quotidien des utilisateurs.

Ce n'est donc pas la " trace du raisonnement " de cet expert qui est nécessaire pour rendre ses propositions plus acceptables, mais la prise en compte du point de vue des utilisateurs (c'est à dire leurs activités préalables, leurs objectifs, leurs contraintes, etc.) sur la future base de données. Balacheff et Soury tiendront, à leur tour, un discours similaire et parleront plus tard [Balacheff et al 96] de l'explication comme une propriété émergente du discours dans une interaction dialogique et reconnaîtront qu'il n'y a explication et donc succès de l'interaction visant à l'explication que s'il y a satisfaction des interlocuteurs. L'explication, déjà caractérisée de processus interactif [Cawsey 91] [Moore 95], devait donc être considérée comme un processus coopératif. Le système et l'utilisateur devaient en être les agents, et différents contextes devaient être pris en compte: les caractéristiques de l'utilisateur, son profil, ses intentions, ainsi que l'historique de son dialogue avec le système. Tenant compte de cette réalité, Brézillon [Brézillon 92b] suggérait la nécessité d'explicitier la notion de contexte dans les explications et proposait plus tard de la représenter [Brézillon et al 95a].

Nous étions nous-mêmes intéressés par cette évolution des recherches en explication, et y avons apporté notre modeste contribution que nous détaillons dans le paragraphe suivant.

### **3.5 Explication: nos premiers pas dans la recherche**

Notre parcours dans le sinueux mais ô combien plaisant domaine de la recherche fut donc initié par une modeste contribution aux travaux sur les explications dans les systèmes à base de connaissances. En effet, nous

défendions dans [Laraba 98] l'idée que l'utilisation effective et à bon escient d'un SBC dépendait principalement de sa capacité d'explication. Nous soutenions que la construction d'une explication par un SBC était une tâche de conception indépendante où la prise en compte de l'utilisateur devenait indispensable. La production d'une explication était alors vue comme un processus coopératif. Le système et l'utilisateur, qui en étaient les agents, devaient interagir dans un même contexte. Nous nous étions intéressés aux deux notions de coopération et de contexte, et à la nécessité de les considérer dans le processus de production d'une explication par un SBC. Finalement, nous proposons la conception, au niveau connaissances, d'un système à base de connaissances explicatif, coopératif et contextuel, baptisé COCONTEX (COoperative and CONTextual EXplanator). Intervenant dans la lignée des SBCs dits de seconde génération, COCONTEX tentait d'outrepasser les insuffisances des SBCs dits de première génération les ayant empêché de fournir des explications convaincantes à leurs utilisateurs.

Nous croyons intéressant de souligner ici que la notion d'explication contextuelle peut être interprétée différemment dans d'autres...contextes! Notre attention a été particulièrement attirée par l'explication contextuelle utilisée dans SAVANT3 un système d'Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur (EIAO), une discipline où l'explication a toujours joué un rôle important. Nous en parlons dans le paragraphe suivant. Nous tenons, quand même à souligner, auparavant et pour finir avec le présent paragraphe, que notre intérêt pour l'explication ne s'est pas arrêté à la recherche citée ci-haut, mais s'est poursuivi avec la présente thèse et les nombreuses recherches l'ayant accompagnée [Laraba 99] [Laraba et al 00] [Laraba et al 02a] [Laraba et al 02b] [Laraba et al 04a] [Laraba et al 04b] [Laraba et al 06a] [Laraba et al 06b][Laraba et al 06c].



### 3.6 Explication et Enseignement par Ordinateur

S'il est incontestablement avéré que l'apprentissage est l'objectif principal des systèmes d'éducation, il est aussi reconnu la nécessité de fournir des explications à l'apprenant, dont il est naturel d'admettre l'incapacité d'assimiler la totalité des notions ou comprendre l'ensemble des concepts reçus. L'apprentissage, ne signifiant souvent pas, typiquement, fournir à l'utilisateur la bonne solution à un problème mais plutôt lui expliquer le processus de solution dans le but d'accroître sa compréhension du domaine enseigné, l'objectif d'une explication pourrait être:

- de fournir à l'apprenant plus de généralités sur le domaine enseigné,
- ou encore l'entraîner à résoudre des problèmes similaires à celui résolu par le système.

Autrement dit, et comme détaillé dans [Sormo et al 05], l'explication est souvent plus importante que la réponse elle-même.

La construction d'une explication dans un système d'enseignement nécessite que le système élabore une représentation des connaissances de l'élève au moins relativement à l'objet de l'explication. L'acceptation de l'explication par l'apprenant dépend alors, comme expliqué dans [Balacheff et al 96], du degré de convergence de l'état de connaissances de l'apprenant d'un côté et de la représentation que le système a de l'apprenant d'un autre côté, vers un état qui permet l'acceptation de cette explication.

La similitude avec le processus de construction coopérative et contextuelle d'explications dans les SBC est certes évidente, mais la notion d'explication contextuelle a une signification différente en EIAO. Le système d'enseignement SAVANT 3 décrit, par exemple, dans [Dessalles 92] reposait sur le principe de l'explication conversationnelle telle qu'elle pouvait être modélisée à partir de l'observation de situations d'explication spontanées. Le mode d'explication exploité dans SAVANT 3 fonctionnait en deux temps: le système tentait d'établir une description de la situation que l'apprenant devait pouvoir

reconnaître comme contradictoire. L'apprenant avait alors la possibilité de donner une issue à cette contradiction sous la forme d'une explication décrite comme une invalidation logique. Il en résultait un dialogue où l'explication, qui consistait alors à résoudre la contradiction, jouait un rôle central. Dessalles justifiait le choix de ce type d'explication contextuelle par le raisonnement suivant:

- D'une part, ce type d'explication semblait cognitivement plausible, dans la mesure où il était observé dans les conversations spontanées. Les interlocuteurs manifestaient fréquemment ce qu'ils ressentaient comme des incompatibilités, et leurs vis-à-vis s'empressaient de leur fournir des solutions.

- D'une autre part, ce type d'explication contextuelle était fortement contraint d'un point de vue logique, ce qui permettait à un système comme SAVANT 3 non seulement de fournir des explications qui, il était du moins espéré, étaient ressenties comme pertinentes, mais aussi de comprendre les explications de l'apprenant.

L'apprenant, ce partenaire incontournable dans tout système d'enseignement a focalisé toutes les attentions des chercheurs dans ce domaine, dont Bredeweg et de Koning qui se sont intéressés dans [Bredeweg et al 98] à diagnostiquer les problèmes de l'apprenant et l'aider à développer les meilleures stratégies pour résoudre ses problèmes. Leurs travaux sur le raisonnement à base de modèles en éducation ont permis d'identifier les problèmes de raisonnement nécessitant un raisonnement qualitatif de la part de l'apprenant. Une implémentation, certes élémentaire, d'un générateur d'explications faisait partie de ces travaux. Voilà justement l'occasion de discuter de l'explication dans le domaine du raisonnement qualitatif. Nous le faisons dans le paragraphe suivant.

### **3.7 Explication et raisonnement qualitatif**

Le raisonnement qualitatif a toujours été une source importante de génération d'explications, grâce surtout à la délicatesse - pour garder le mot utilisé dans

[Bouwer et al 99] - des modèles de simulation que ses techniques offrent. Cette source n'a pourtant été que faiblement utilisée à cause notamment de la pauvreté de l'interface des résolveurs de problèmes qualitatifs.

Historiquement, c'est la théorie des processus qualitatifs (QPT), abordée au chapitre précédent, et notamment ses concepts d'influence et de processus, qui a permis de mettre en évidence les capacités explicatives de la simulation qualitative. En effet, et bien que n'ayant montré aucune capacité de production d'explications, le système Gizmo décrit dans [Forbus 84], qui se limitait à répondre à différentes questions sur la simulation, a été à l'origine de beaucoup de travaux sur l'utilisation de la simulation qualitative comme source de production d'explications.

Simgen, un système décrit dans un autre travail de Ken Forbus réalisé en collaboration avec Brian Falkenhainer [Falkenhainer et al 90][Falkenhainer et al 92], et considéré comme une concrétisation de la simulation auto explicative, est considéré comme un de ces travaux.

DME (Device Modeling Environment), décrit dans [Gautier et al 93a ; Gautier et al 93b] en est un autre. Possédant des capacités explicatives similaires à celles de Simgen, DME disposait en plus d'une interface plus sophistiquée.

Dans le même ordre d'idées, nous pouvons citer le système conçu par James Lester [Lester 94]. A la base de ce système, une large base de connaissances multifonctionnelle était construite au laboratoire d'IA de l'université du Texas, dans le cadre d'un projet relevant de la Botanique, et servait de support à des travaux de recherche ayant pour objectif, entre autres, de fournir des explications sur des phénomènes botaniques divers. Ainsi, le système conçu par James Lester répondait en langage naturel, à des interrogations sur des thèmes de la base dans le domaine de la physiologie des plantes.

Dans le même contexte, et pour permettre à des utilisateurs d'interroger la base de connaissances botanique sur le comportement dynamique d'un système de plantes, Jeff Rickel [Rickel 95] proposait un système qui simulait

qualitativement un modèle construit à partir de la base pour prévoir ses différents comportements et utilisait ces derniers pour produire des descriptions et explications de haut niveau.

La description des comportements d'un modèle était d'ailleurs une des questions ciblées par les travaux de Clancy, Brajnik et Kay [Clancy et al 97a]. Les outils résultant de ces travaux, destinés à analyser les résultats de l'algorithme de simulation qualitative QSIM en vue de révision de modèle, n'avaient certes pas pour objectif la production d'explications mais les informations qu'ils fournissaient au modéleur expliquaient bien la simulation.

Nous dirons la même chose au sujet d'autres travaux:

- Ceux de Clancy, en collaboration cette fois avec Kuipers [Clancy et al 97b], où l'objectif recherché était l'élimination de chatter, qui n'ont pas manqué de servir à expliquer la simulation,
- Ou encore ceux de Salles [Salles et al 97], dans le cadre du projet écologique brésilien Cerrado, basés cette fois sur la simulation qualitative dans GARP (Generic Architecture for Reasoning about Physics), un framework développé pour le raisonnement qualitatif [Bredeweg 92]. Les principaux concepts du domaine étaient représentés dans des fragments de modèle constituant des ingrédients intéressants pour la production d'explications.

Plus tard, et dans le but de fournir un niveau d'explication applicable à un large éventail de simulations qualitatives d'une part, et pour répondre à une demande plus concrète d'expliquer l'occurrence d'un comportement lors d'une simulation d'une autre part, Richard Smith Mallory [Mallory 98] suggérait un niveau de description mieux approprié et une explication causale. Son système Expound disposait, en effet, d'un outil explicatif produisant des explications causales, générées textuellement, dans un langage naturel certes encore largement perfectible, à des niveaux d'abstraction multiples selon le niveau d'abstraction du modèle choisi pour la simulation.

Un intérêt particulier mérite d'être porté aux travaux de Khan, Brown et Leitch [Khan et al 97] qui, s'inspirant des travaux de Winkels sur les systèmes tuteurs intelligents [Winkels 92], stipulaient la nécessité de distinguer entre différents types de destinataires d'explications selon les besoins de chacun et identifiaient alors quatre types fondamentaux d'explication basés chacun, principalement, sur un type de connaissance:

- L'explication instructionnelle utilisant des connaissances temporelles.
- L'explication de prise de décision utilisant des connaissances corrélationnelles.
- L'explication justificative ou la justification utilisant des connaissances causales.
- L'explication théorique utilisant des connaissances structurelles.

Davantage de considération est réservée aux destinataires d'explications dans les travaux de Bouwer et Bredeweg<sup>1</sup> [Bouwer et al 99] qui, s'inspirant cette fois du modèle d'utilisateur des systèmes tuteurs intelligents, s'intéressaient donc non seulement aux besoins du destinataire d'explications mais aussi à son profil, ses buts, ses tâches, ses préférences et ses connaissances. La disponibilité de telles informations permet l'adaptation de toute interaction selon les spécificités de l'utilisateur y prenant part, et assure particulièrement la génération d'explications à un niveau de détail accommodé au niveau d'expertise de son destinataire, évitant notamment l'usage de concepts mal maîtrisés ou totalement inconnus de ce dernier. Pour ce faire, l'accent était mis sur le rôle crucial imparti à l'interface entre le système générateur de l'explication et l'utilisateur destinataire de cette dernière. Ce sera, justement, l'objet du prochain paragraphe de ce chapitre.

---

<sup>1</sup> Il était notamment question, dans ces travaux, de l'intégration des différentes techniques disponibles dans des domaines tels que le raisonnement qualitatif, les systèmes tuteurs intelligents et le langage naturel, pour produire de meilleures facilités explicatives.

### **3.8 Explication:Quelle interface pour une interaction particulière?**

Nous le disions déjà il y a quelques années, des explications sans un modèle approprié de l'IHM (Interaction Homme-Machine), ne seraient que des constructions ad hoc [Laraba 98].

L'interaction Homme-Machine propose différentes formes de communication Homme-Machine. Nous en citons<sup>1</sup>:

#### ***3.8.1 Interfaces Homme-Machine***

Ces systèmes graphiques permettant l'interaction par manipulation du clavier et d'un pointeur, Qualifiées généralement par les acronymes anglo-saxons **GUIs** (Graphical User Interfaces) [Boufaida 95] ou **WIMP** (Windows, Icons, Menus and Pointing) [Palanque et al 95], les interfaces graphiques, encore appelées à manipulation directe ou applications contrôlées par l'utilisateur, ont pris depuis le début des années 1980 de plus en plus d'importance. Depuis quelques années, la majorité des applications interactives développées proposent à l'utilisateur une interface graphique.

Grâce à leurs qualités ergonomiques (facilité d'utilisation, concision, cohérence et flexibilité), et le fait que les utilisateurs restent maîtres de l'interaction avec l'application tout le long d'une session, les interfaces graphiques ont eu un grand succès auprès des utilisateurs, qu'ils ont vite réussi à séduire. Nous ne pouvons cependant dire de même pour les concepteurs d'interfaces graphiques qui trouvent beaucoup de difficultés à concevoir le dialogue entre l'homme et la machine.

Dans les interfaces graphiques, les commandes sont entrées au moyen d'un élément graphique accessible par manipulation directe, qui peut être une icône, un menu, une fenêtre, une boîte de dialogue, une liste de choix, un bouton radio, un bouton poussoir ou une case à cocher [Boufaida 95] [Palanque et al 95].

---

<sup>1</sup> Les deux premières formes sont reprises de [Laraba 98].

### ***3.8.2 Dialogue Homme-Machine***

Les systèmes de dialogue Homme-Machine s'appuient sur le langage naturel pour des échanges avec les utilisateurs.

Pour les non spécialistes d'une application, le langage naturel constitue un moyen de communication privilégié avec la machine. Aucun autre moyen n'est aussi général ou flexible. Les menus sont bons pour la sélection d'options, mais sont inadaptés lorsqu'il s'agit d'exprimer des relations. Ces dernières peuvent être exprimées au moyen des équations mathématiques qui, par contre, ne savent pas exprimer des commandes. Celles-ci peuvent provenir des langages de programmation qui ne peuvent cependant pas poser des questions. Les langages de requête posent bien les questions mais ne savent pas donner des explications. Seul le langage naturel peut offrir toutes les fonctions d'une communication humaine dans un cadre commun et flexible.

### ***3.8.3 Interaction dialogique***

Un système d'interaction dialogique permet la communication à un haut niveau sémantique, dans un sous-ensemble du langage naturel dans un environnement délimité incluant des agents humains et artificiels.

Cette dernière forme d'interaction, qui se trouve à la frontière entre l'interaction homme-machine et les systèmes multi-agents<sup>1</sup>, nous a particulièrement intéressés. A la base, elle est préconisée pour permettre à des utilisateurs d'interagir, dans un sous-ensemble du langage naturel, avec des composants logiciels d'Internet considérés comme des agents conversationnels. Nous la trouvons bien adaptée dans le contexte de notre thèse, et nous la détaillons ci-après:

#### **3.8.3.1 Définition**

Une interaction dialogique est une interaction à un haut niveau sémantique.

---

<sup>1</sup> Nous retrouverons d'ailleurs cette notion dans le chapitre suivant.

Elle est définie comme la restriction d'une interaction en langage naturel à une interaction à base de requêtes, une suite d'échanges de requêtes ayant un potentiel de sens [Valencia 00]. L'agent dialogique, que nous détaillerons plus tard, est à la base de cette interaction dialogique, que nous illustrons dans la figure suivante (où, faut-il le rappeler, BC désigne une base de connaissances), extraite de [Sansonnet et al 02]:

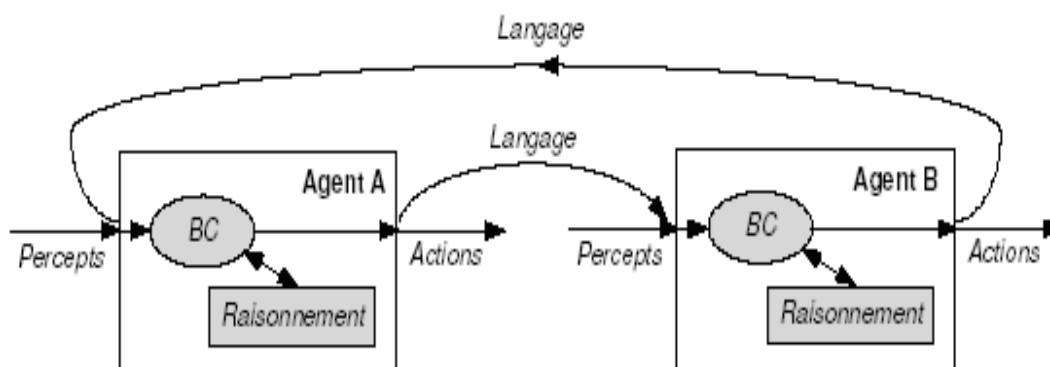


Figure 3.1 Schéma général d'une interaction dialogique

### 3.8.3.2 Types d'interaction dialogique

Le dialogisme, comme mentionné dans [Valencia 00], est donc un mode de communication entre un humain et un agent logiciel pouvant être étendu à un mode de communication entre agents logiciels. Deux types d'interaction dialogique sont alors connus:

#### A- Interaction Humain-Agent

L'utilisateur humain, bien conscient qu'il a en face un interlocuteur non humain, doit s'adapter au formalisme proposé par l'agent. Ce dernier, est de son côté obligé de disposer d'un module de traitement lui permettant de s'adapter à l'utilisateur humain.

#### B- Interaction Agent-Agent

Ce type d'interaction est totalement symétrique car impliquant deux entités pouvant partager des choses différentes par rapport aux humains.



### 3.8.3.3 Notion d'agent dialogique

Un agent dialogique (AD) est défini comme un composant logiciel, capable d'interagir à un haut niveau sémantique avec d'autres agents (logiciels ou humains). Pour cela, il doit être capable de se représenter son fonctionnement et de raisonner dessus pour recevoir des requêtes, fournir des explications et participer à des tâches d'assistance. Il est doté de capacités d'interaction avec les utilisateurs par la voie de la langue naturelle. Un agent dialogique modélise donc un composant logiciel et intègre dans une représentation unifiée une fonctionnalité opératoire représentée par sa partie active et une fonctionnalité explicative, matérialisée par sa partie interactive.

Un agent dialogique est composé de trois parties: le composant effectif, le médiateur et l'interface, selon une architecture à base de médiateur comme illustré dans la figure suivante [Sansonnnet et al 02].

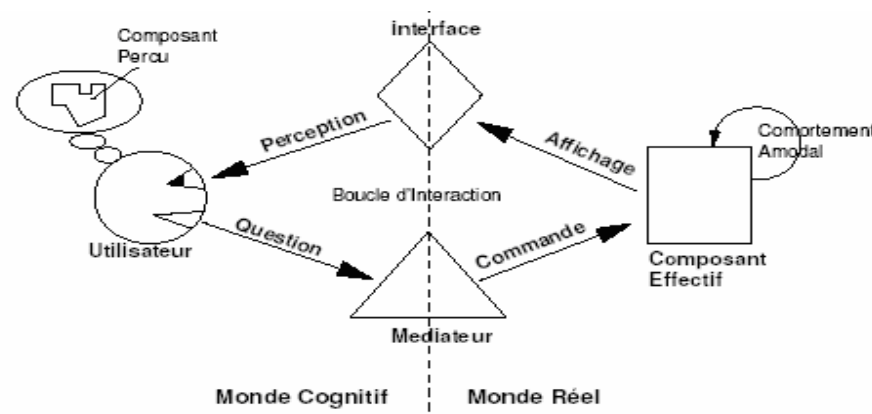


Figure 3.2 Un agent dialogique à base de médiateur

#### A- Architecture à base de médiateur

Cette architecture comprend trois composantes essentielles: le composant effectif, le médiateur et l'interface.

##### A-1 Composant effectif

Le composant effectif est un composant logiciel doté d'une interface graphique, il contient le processus logiciel ou matériel réel. Il est qualifié d'interopérable, pour caractériser sa capacité d'exposer une interface de

programmation accessible à un processus extérieur permettant d'atteindre ses méthodes (pour contrôler son fonctionnement) et ses propriétés (pour obtenir des informations sur sa structure et son contenu).

### A-2 Médiateur

Il est décrit dans un Langage de Description d'Agent (LDA), fait l'interface entre la langue et le composant effectif et possède une représentation du composant effectif du point de vue de l'utilisateur lui permettant de répondre aux questions de l'utilisateur sur le composant et contrôler celui-ci. Une de ses tâches consiste à maintenir la cohérence de la représentation.

### A-3 Interface

L'interface reflète les changements intervenant dans le composant. C'est en étudiant cette interface qu'on doit trouver les catégories des éléments que l'utilisateur devrait conceptualiser, et donc utiliser dans l'interaction pour référer aux objets ou aux événements.

Un agent dialogique peut aussi voir une architecture modulaire [Kotowicz 06], comme illustré dans la figure suivante :

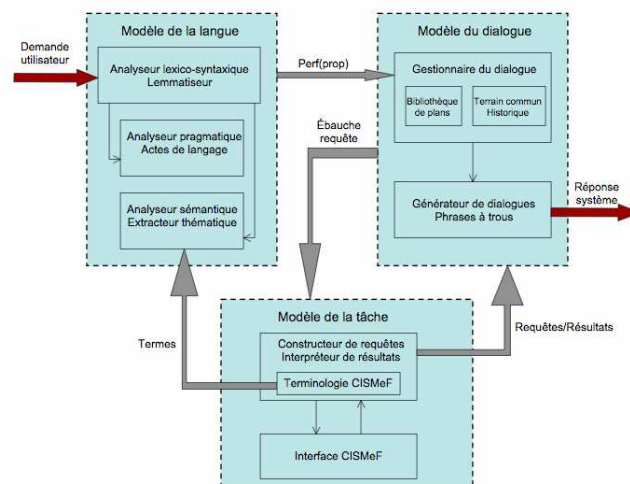


Figure 3.3 Un agent dialogique modulaire

## B- Architecture modulaire

Cette architecture comprend trois composantes essentielles : le modèle de la langue, le modèle du dialogue et le modèle de la tâche.

### B-1 Modèle de la langue

Il reçoit la demande de l'utilisateur sous la forme d'un énoncé en langage naturel. Il réalise trois analyses de cet énoncé :

- une analyse lexico-syntaxique décomposant l'énoncé en données lexicales utilisées par les deux autres analyses,
- une analyse pragmatique qui repose sur un interpréteur d'actes de langage,
- une analyse sémantique qui extrait essentiellement les thématiques abordées dans l'énoncé. Ce modèle de la langue permet de reconnaître un acte de langage appliqué à un contenu propositionnel précodé.

### B-2 Modèle du dialogue

Il comprend à la fois

- un gestionnaire du dialogue qui modélise tous les sous dialogues observés dans les corpus sous la forme d'une bibliothèque de plans et qui gère un historique des interactions échangées entre l'utilisateur et le système ainsi qu'une représentation d'un terrain commun.
- un générateur de dialogues fondé sur des phrases à trou qui permet de produire des énoncés présentés à l'utilisateur.

### B-3 Modèle de la tâche

Il encapsule directement l'interface qui permet d'accéder à la base de documents. Il comprend aussi un constructeur de requêtes à partir des termes reconnus de la demande et un interpréteur de résultats permettant d'affiner la requête si nécessaire.

Quoi de plus logique que ce chemin suivi par les recherches en explication, et que nous avons tenté de parcourir le long de ce chapitre! Il en ressort qu'une explication produite, autrement que suite à une conversation entre le système explicatif et l'utilisateur auquel elle est destinée, n'est plus envisageable, notamment avec l'avènement de ce concept d'interaction dialogique, étroitement lié à celui d'agent dialogique, que nous retrouverons dans le chapitre suivant...dans un autre contexte.

## Chapitre 4

# Systemes Multi-agents, Formes de Communication et Modèle d'Agent Dialogique

*"L'esprit de la conversation consiste  
bien moins à en montrer beaucoup  
qu'à en faire trouver aux autres.  
Celui qui sort de votre entretien  
content de soi et de son esprit  
l'est de vous parfaitement."*

Jean de La Bruyère

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux systèmes multi-agents (SMA), branche importante, relativement jeune, de l'intelligence artificielle distribuée (IAD) [Weiss 99].

Ainsi, après un rappel des notions d'IAD et de SMA, nous reviendrons sur le concept d'agent puis celui de la communication entre agents, support de la coordination entre agents, un élément central des systèmes multi-agents. Nous discuterons différentes formes de communication entre agents artificiels d'une part, mais aussi entre agents artificiels et agents humains d'autre part. Nous reviendrons alors sur la notion d'interaction dialogique et présenterons le modèle d'agent dialogique.

### 4.1 Intelligence artificielle distribuée

L'IAD est une branche de l'intelligence artificielle qui s'articule autour de trois axes [Weiss 99] [Jamont 05]:

- La résolution distribuée des problèmes qui s'intéresse à la manière de diviser un problème en un ensemble d'entités distribuées et coopérantes et à la manière de partager la connaissance du problème afin d'en obtenir la solution.
- L'intelligence artificielle parallèle qui développe des langages et des algorithmes parallèles visant ainsi l'amélioration des performances des systèmes d'IA.

- Les systèmes multi-agents qui privilégient une approche décentralisée de la modélisation et mettent l'accent sur les aspects collectifs des systèmes.

## 4.2 Systèmes multi-agents

Les systèmes multi-agents sont actuellement très largement utilisés, particulièrement pour les applications complexes nécessitant l'interaction entre plusieurs entités.

Ainsi, la construction, la maintenance et l'exécution des systèmes complexes sont des tâches délicates et nécessitent la coopération de plusieurs intelligences entre elles, plutôt que de tenter de les attribuer à une seule intelligence monolithique. Cette complexité s'est exprimée soit de façon structurelle, soit de façon comportementale, soit, plus généralement, les deux à la fois [Drogoul 05].

D'un autre côté, certains problèmes, comme la gestion décentralisée d'un réseau électrique ou la coopération de robots, sont naturellement distribués et seule donc une résolution distribuée est à même de les solutionner. Enfin, certains systèmes naturels, aussi bien physiques, biologiques que humains, ne sont pas modélisables par des outils standard et leur compréhension passe par la simulation du comportement d'un grand nombre d'entités atomiques [Ricordel 01],

L'étude des comportements collectifs et la répartition de l'intelligence sur des agents autonomes, capables de s'organiser et d'interagir pour résoudre des problèmes, sont alors les motivations principales de l'avènement, dans les années quatre-vingt, des systèmes multi-agents, qui obéissait à une évolution logique des concepts ayant répondu au besoin sans cesse accru, dans le temps, de l'être humain, de recourir à l'outil informatique. Ouvrons ici une parenthèse d'histoire, si révélatrice:

Dans un premier temps, lorsque l'objectif des personnes qui utilisaient l'outil informatique était de simplifier la programmation, on s'est attelé à élaborer des langages dits évolués passant par l'agrégation d'instructions en procédures puis

en fonctions lorsqu'elles retournaient des résultats. Ensuite, un besoin en dynamisme des applications et en généricité s'est fait sentir et on a assisté à l'émergence de la programmation structurée suivie de l'introduction du concept d'objet. Un manque d'autonomie n'a pas tardé à se faire sentir à son tour, induit par la répartition et la distribution des ressources, et la réponse n'a pas non plus tardé avec l'avènement de la notion d'agent. Très peu de temps après, la coopération a amené les informaticiens à créer des systèmes à agents. La prise en compte d'objectifs globaux et l'utilisation de l'émergence ont alors abouti à l'introduction du paradigme multi-agents qui, intégrera alors le processus de Génie Logiciel [Sahnoun et al 97].

La figure ci-après, extraite de [Jamont 05], illustre cette parenthèse d'histoire:

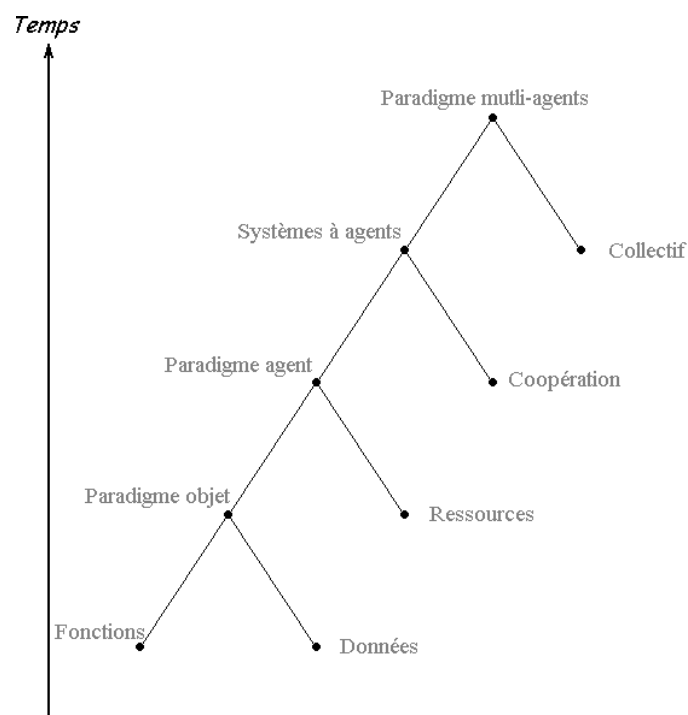


Figure 4.1: Evolution des concepts à travers le temps (1)

La figure suivante, extraite de [Ferber 05], la complète bien:

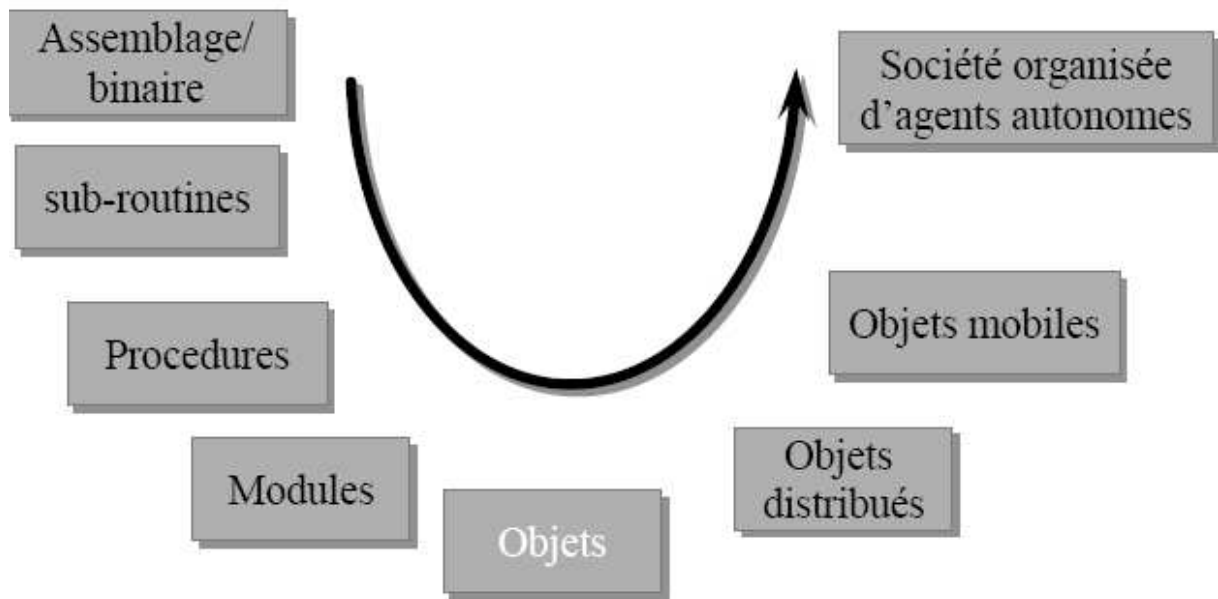


Figure 4.2: Evolution des concepts à travers le temps (2)

Fermons à présent cette parenthèse et revenons aux SMA.

Un système multi-agents est défini comme un système distribué composé d'un ensemble d'agents intelligents qui interagissent le plus souvent selon des modes de coopération, de concurrence ou de coexistence. Il faut dire que la littérature spécialisée n'a pas excessivement abondé en matière de définitions de SMA, et nous pensons que si nous devons nous attarder sur une d'entre elles, nous nous arrêterions sur la définition suivante, extraite de [Chaib-draa et al, 01], qui stipule qu'un système multi-agents est un système distribué composé d'un ensemble d'agents. L'intérêt que nous avons porté à une telle définition est qu'elle nous permet de faire ressortir une question non moins intéressante: un SMA est-il juste une collection d'agents? Nous y reviendrons plus tard.

La figure suivante, extraite de [Jennings et al 00], donne une vue canonique d'un SMA:

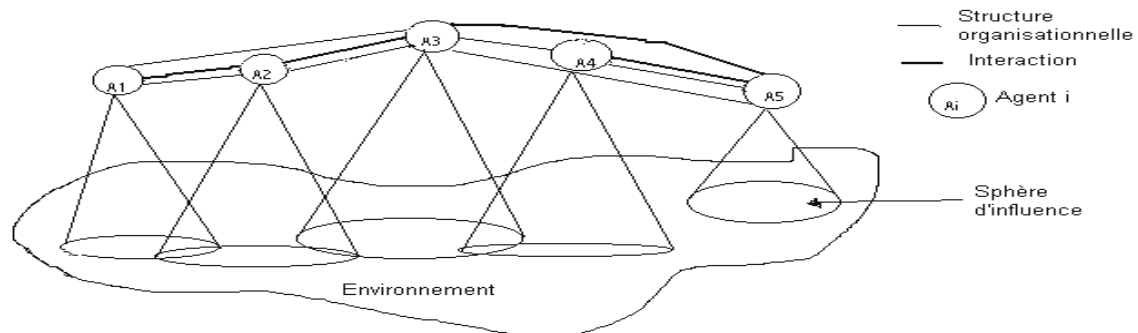


Figure 4.3: Vue canonique d'un SMA

### 4.3 Concept d'agent

Nous avons longtemps hésité avant de décider de présenter le concept d'agent à la suite de la notion de SMA. Nous nous sommes en effet demandés s'il fallait le présenter ainsi ou fallait-il plutôt en faire une introduction aux SMA, comme le suggère la parenthèse d'histoire que nous avons ouverte plus haut? Nous avons alors choisi l'option actuelle, pour mettre au premier plan notre choix précédemment souligné d'opter pour un SMA pour produire une explication. D'ailleurs, faut-il vraiment en faire un débat alors que, et comme le dit si bien Blaise Pascal: *les parties du monde ont toutes un tel rapport et un tel enchaînement l'une avec l'autre que je crois impossible de connaître l'une sans l'autre et sans le tout.*

Pour définir le concept d'agent, un parcours non exhaustif de la littérature traitant de l'agent, qui laisse quand même se dégager un consensus autour de la difficulté de définir un agent en termes informatiques, nous a permis de rassembler une variété de définitions que nous relatons ci-après, et qui montrent qu'un agent est vu sous deux angles distincts. Certains chercheurs considèrent qu'on peut définir un agent en isolation. D'autres pensent qu'il ne peut être pris indépendamment de son environnement ni même de l'application pour laquelle il a été conçu. Selon ces derniers, un agent est souvent défini suivant



l'explication que l'auteur de cette définition tente de donner à son usage du terme « agent ». Il va sans dire, est-il anticipé de le dire, qu'à un niveau d'abstraction plus élevé, un SMA est considéré lui-même comme un agent [Demazeau 97], qui signifierait, d'un point de vue interne, qu'un agent peut être un SMA [Chicoisne 02].

Passons donc en revue l'ensemble de ces définitions:

### ***4.3.1 Définitions***

- Minsky [Minsky 85] utilise le terme d'agent pour désigner un processus pouvant effectuer des tâches simples ne demandant ni esprit ni réflexion.
- Un agent est une entité qui agit de manière rationnelle par rapport à ses buts et à ses croyances, dans [Demazeau et al 90] et [Demazeau et al 91].
- Un agent est une entité qui fonctionne continuellement et de manière autonome dans un environnement, qui peut être partiellement connu et où d'autres processus se déroulent et d'autres agents existent, dans [Shoham 93].
- Un agent est une entité logicielle persistante destinée à réaliser un but spécifique, dans [Smith et al 94].
- Coen [Coen 04] voit un agent comme un programme engagé dans un dialogue pour négocier et coordonner un transfert d'information.
- Un agent, dans [Ferber 95], est une entité autonome, réelle ou abstraite, capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, de communiquer, dans un univers multi-agents, avec d'autres agents, de se reproduire, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents.
- Maes [Maes 95], comme Wooldridge et Jennings [Wooldridge et al 95] définissent un agent comme un système informatique agissant, dans un environnement, d'une façon autonome, pour réaliser les tâches et objectifs pour lesquels il a été conçu.

- Pour Franklin [Franklin 96], un agent est un objet qui agit, en plus de raisonner.
- Dans [Russell 97], un agent est une entité qui perçoit et agit sur son environnement.
- Enfin, un agent, dans [Ferber 05] est une entité physique (hard) ou logicielle (soft) située dans un environnement (réel ou virtuel) qui est capable d'agir dans son environnement, de percevoir et partiellement se représenter son environnement (et les autres), de communiquer avec d'autres agents, de mû par ses tendances internes (buts, recherche de satisfaction), de se conserver et se reproduire, et qui présente un comportement autonome qui est la conséquence de ses perceptions, de ses représentations et de ses communications.

« Agir » est, sans conteste, le mot le plus communément invoqué dans la quasi-totalité de ces définitions. Une recherche dans le dictionnaire de la langue française permet de lire les significations suivantes de ce mot: « faire quelque chose », « opérer un effet », « se conduire ».

Ca met clairement en évidence cet aspect « actif » de l'agent ou « proactif » pour s'accorder avec la littérature, qui peut donc « fonctionner » même en l'absence de sollicitation externe. C'est d'ailleurs l'essence même de l'agent cognitif, à l'inverse de l'agent réactif, dont la particularité est de répondre directement à des stimuli. Nous venons d'évoquer là les deux principaux types d'agents rencontrés. Nous discuterons ultérieurement d'autres types d'agents, particulièrement cognitifs, après une exploration plus profonde des définitions précédentes pour en dégager les propriétés présentées dans le paragraphe suivant.

### ***4.3.2 Propriétés***

Les propriétés suivantes peuvent donc être dégagées des définitions précédentes:

### **4.3.2.1 Intentionnalité**

L'intentionnalité d'un agent est définie comme la déclaration des buts à atteindre et des moyens mis en œuvre pour y parvenir.

### **4.3.2.2 Autonomie**

Définie comme la capacité propre d'un agent de pouvoir atteindre son but, indépendamment des autres agents. C'est, en d'autres termes, l'aptitude d'un agent d'avoir un comportement spontané, de prendre l'initiative pour parvenir à ses objectifs.

### **4.3.2.3 flexibilité**

C'est la possibilité pour un agent de modifier son comportement et sa morphologie.

### **4.3.2.4 Adaptabilité**

Il s'agit de la capacité d'un agent d'améliorer son fonctionnement individuel ou collectif pour faire face à un environnement perpétuellement évolutif, ce qui lui permet d'acquérir une « personnalité » qui l'individualise, et le différencie des autres agents.

### **4.3.2.5 Rationalité**

Un agent rationnel, utilise efficacement les ressources à sa disposition pour sélectionner une action dont l'exécution lui permet d'atteindre un de ses buts.

### **4.3.2.6 Engagement**

Un agent est engagé à accomplir les actions qui satisfont un but à atteindre et se donne les moyens d'y parvenir.

### **4.3.3. Récapitulons**

Nous retiendrons donc ce qui suit:

- Un agent est une entité clairement identifiable de résolution de problèmes.
- L'agent est situé dans un environnement spatio-temporel, considéré comme la représentation du monde où il peut fonctionner. L'environnement produit les conditions nécessaires à l'existence de l'agent, il est naturellement dynamique et évolutif de part les actions de l'agent qui, en le percevant, prend conscience de sa présence dedans.
  - L'agent est une entité intelligente, et de ce fait, il perçoit son environnement par des senseurs, raisonne, agit sur son environnement par des effecteurs, et communique, voire interagit avec son environnement ou d'autres agents. La communication consiste à envoyer des messages, l'interaction, quant à elle, permet d'aller plus loin et d'établir des conversations structurées entre agents.
- L'agent est l'entité d'observation et d'analyse primitive, ses décisions sont prises localement et ses actions sont guidées par des observations et des raisonnements locaux.
- L'agent est une entité sociale, et de ce fait, son comportement est autonome mais collectif. Différents agents coopèrent entre eux pour réaliser un but commun.

La figure suivante, extraite de [Russel et al 95] illustre, à un niveau très général, l'architecture d'un agent intelligent:

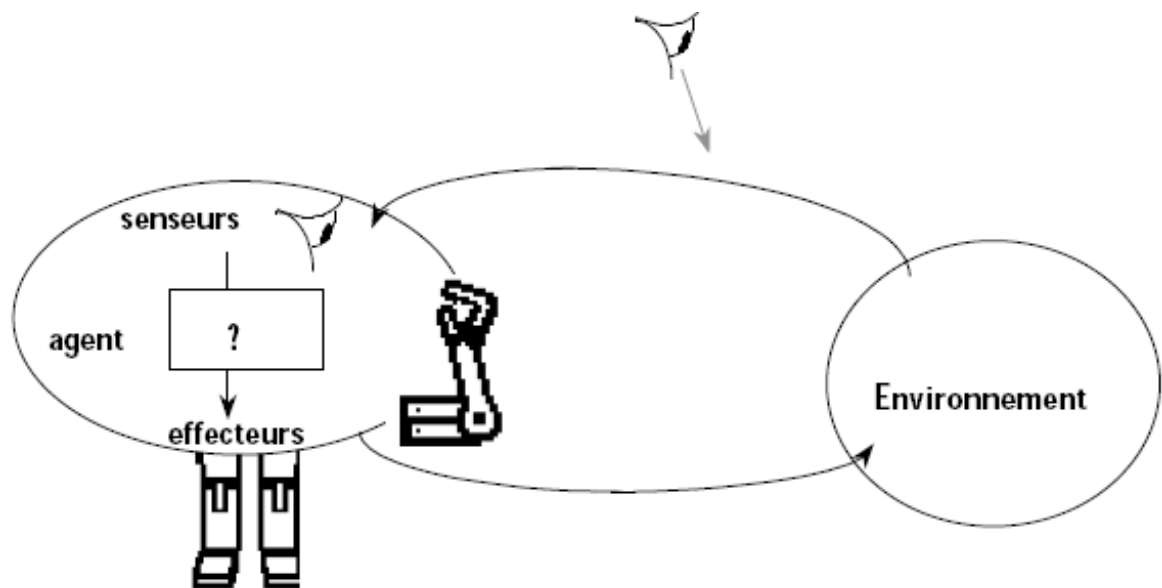


Figure 4.4: Architecture d'un agent

L'architecture est un des trois niveaux de description d'un agent selon Wooldridge et Jennings dans [Wooldridge et al 95]. Les deux autres sont le modèle et l'implémentation. Nous en parlons dans le paragraphe suivant.

#### ***4.3.4 Niveaux de description***

Un agent est donc décrit à trois niveaux:

##### **4.3.4.1 Modèle d'agent**

Un modèle étant une représentation sémantique de la structure et du fonctionnement d'un composant logiciel et/ou matériel, le modèle d'agent décrit comment l'agent est compris, ses propriétés et comment on peut les représenter. La dernière décennie a vu se poursuivre la standardisation de la technologie des agents par un groupe de chercheurs et d'industriels indépendants, et a permis l'apparition des modèles dont nous reprenons ci-après une classification extraite de [Sabas 01].

##### **A- Modèle OMG**

Le groupe OMG (Object Manager Group) propose ce modèle faisant ressortir les caractéristiques d'un environnement agent composé

- d'agents caractérisés par leur compétence (de déduction, de planification, etc.), leurs types d'interaction (synchrone, asynchrone), et leur mobilité (statique, mobile avec ou sans état).
- et d'agences supportant l'exécution concurrente d'agents, la sécurité et la mobilité des agents, entre autres.

#### B- Modèle FIPA

Le groupe multidisciplinaire FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) a mis sur pied une série de spécifications pour diriger le développement des agents, dont les plus importantes sont:

- la spécification de la gestion d'agent (Agent Management) [FIPA 97a]
- la spécification du langage de communication agent (Agent Communication Language, ACL -dont nous parlerons plus tard-) [FIPA 97b].

Le modèle de FIPA pour le développement des agents est basé sur un paradigme minimal pour la gestion des agents dans un environnement ouvert. Ce paradigme est décrit en utilisant un modèle référentiel spécifiant:

- d'une part un environnement normatif dans lequel les agents existent et opèrent,
- d'une autre part, une plate-forme agent, qui spécifie une infrastructure pour le déploiement et l'interaction des agents

#### C- Modèle KAOS

Le modèle KAOS (Knowledgeable Agent-Oriented System) décrit la structure d'agents (partant de la notion de simple agent à la notion de rôle d'agent, tel que les médiateurs et les apparieurs) et élabore, sur la base des interactions dynamiques d'agent à agent, des messages de communication en utilisant des politiques de conversation.

#### D- Modèle General Magic

General Magic est une tentative de recherche commerciale sur la technologie d'agents mobiles pour le commerce électronique. Les agents mobiles, qui sont

représentés comme des entités qui résident dans un endroit particulier en un temps donné, sont décrits suivant les compétences suivantes:

- ils peuvent voyager: ils ont le droit de se déplacer d'une place à une autre
- ils peuvent rencontrer d'autres agents : une rencontre permet aux agents à une même place d'invoquer des procédures d'autres agents,
- ils peuvent créer des connexions qui permettent à un agent de communiquer avec un autre agent d'une place différente,
- ils ont une représentativité : qui indique le monde physique individuel ou l'organisation que l'agent représente,
- ils possèdent des permis qui indiquent les compétences des agents.

#### **4.3.4.2 Architecture d'agent**

L'architecture d'un agent désigne une description de son organisation interne: les données et les connaissances de l'agent, les opérations qui peuvent être effectuées sur ses composantes et le flux de contrôle des opérations

L'architecture, qui est un niveau intermédiaire entre le modèle et le contrôle et l'implémentation, précise la création de l'agent c'est-à-dire les propriétés qu'il doit posséder conformément au modèle et les liaisons avec les autres agents.

Différentes architectures d'agents sont connues, adaptées aux types d'agents cités précédemment. Nous en citons:

##### **A- Architecture BDI**

L'architecture BDI (**B**elief qui signifie Croyance, **D**esire pour Désir et **I**ntention équivalent du mot français **I**ntention) est l'exemple le plus représentatif d'architecture permettant de bâtir un agent cognitif. Elle permet de représenter explicitement les croyances, désirs et intentions de l'agent, en utilisant divers modèles de représentation de connaissances. D'une manière informelle:

- Les croyances d'un agent sont les informations que l'agent possède sur l'environnement et sur d'autres agents qui existent dans le même environnement. Les croyances peuvent être incorrectes, incomplètes ou incertaines et, à cause de cela, elles sont différentes des connaissances de l'agent, qui sont des informations toujours vraies. Les croyances peuvent changer au fur et à mesure que l'agent, par sa capacité de perception ou par l'interaction avec d'autres agents, recueille plus d'information.

- Les désirs d'un agent représentent les états de l'environnement, et parfois de lui-même, que l'agent aimerait voir réalisés. Un agent peut avoir des désirs contradictoires ; dans ce cas, il doit choisir parmi ses désirs un sous-ensemble qui soit consistant. Ce sous-ensemble consistant de ses désirs est parfois identifié avec les buts de l'agent.

- Les intentions d'un agent sont les désirs que l'agent a décidé d'accomplir ou les actions qu'il a décidé de faire pour accomplir ses désirs. Même si tous les désirs d'un agent sont consistants, l'agent peut ne pas être capable d'accomplir tous ses désirs à la fois.

La figure suivante extraite avec la longue légende qui l'accompagne de [UPB 03] montre une architecture BDI, qui continue, par ailleurs, d'intéresser les chercheurs [Saadi et al 06]:



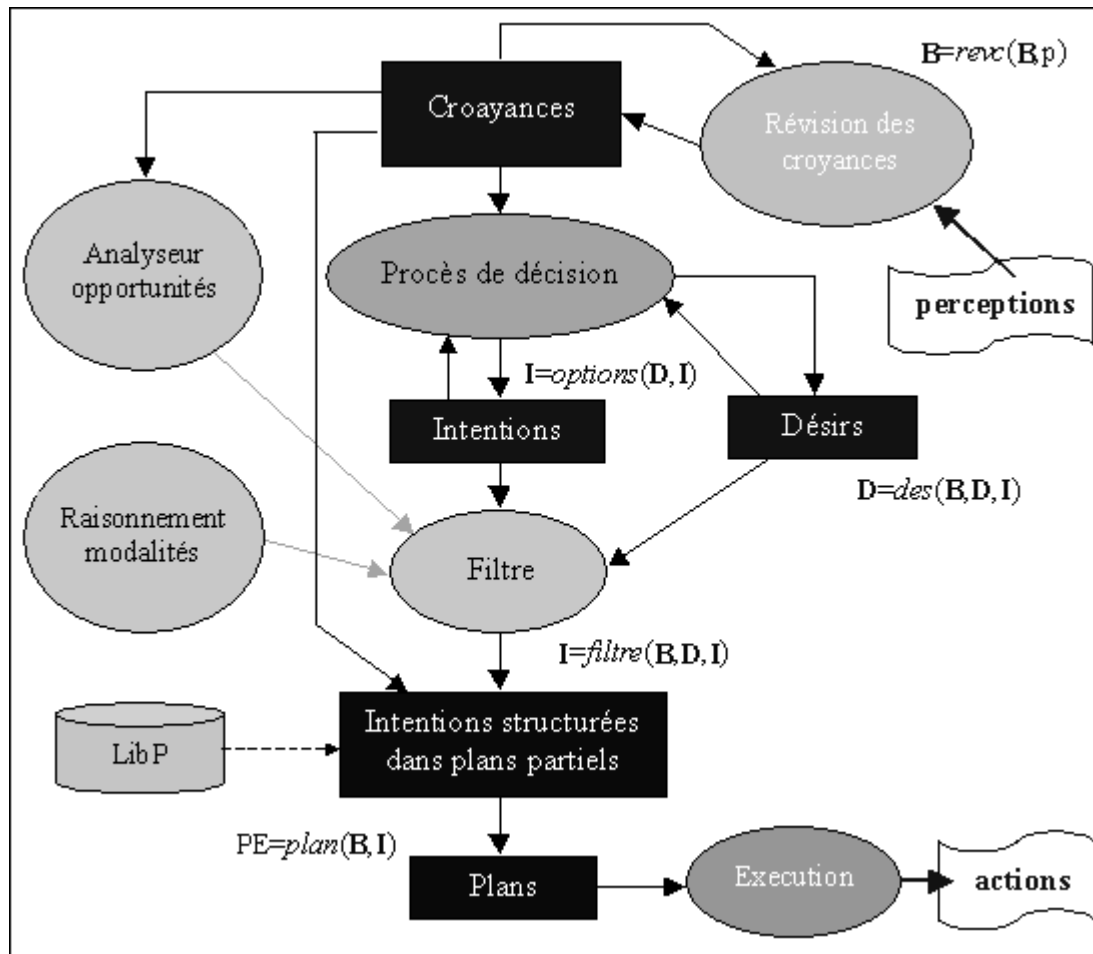


Figure 4.5: Une architecture BDI

Dans la figure ci-dessus, les carrés représentent des structures de connaissances ou de données alors que les ovales représentent des composantes de contrôle et d'exécution.  $B$ ,  $D$  et  $I$  dénotent respectivement les ensembles des croyances, désirs et intentions de l'agent.

Par ailleurs, les fonctions suivantes sont définies

**revc:**  $B \times P \rightarrow B$  est la fonction de révision des croyances de l'agent lorsqu'il reçoit de nouvelles perceptions sur l'environnement, où  $P$  représente l'ensemble des perceptions de l'agent; elle est réalisée par la composante **Révision des croyances**,

**options:**  $D \times I \rightarrow I$  est la fonction qui représente le processus de décision de l'agent prenant en compte ses désirs et ses intentions courantes ; cette fonction est réalisée par la composante **Processus de décision**,

**des:**  $B \times D \times I \rightarrow D$  est la fonction qui peut changer les désirs d'un agent si ses croyances ou intentions changent, pour maintenir la consistance des désirs de l'agent.(on suppose dans notre modèle que l'agent a toujours des désirs consistants) ; cette fonction est également réalisée par la composante **Processus de décision**,

***filtre:**  $B \times D \times I \rightarrow I$  est la fonction la plus importante car elle décide des intentions à poursuivre; elle est réalisée par la composante **Filtre**,*

***plan:**  $B \times I \rightarrow PE$  est la fonction qui transforme les plans partiels en plans exécutables, **PE** étant l'ensemble de ces plans ; elle peut utiliser, par exemple, une bibliothèque de plans, représentée par le module **LibP**.*

*La composante **Filtre** est la partie de l'architecture qui a la responsabilité de bâtir des plans partiels pour réaliser les intentions de l'agent, tout en tenant compte des nouvelles opportunités. En conséquence de ce qu'il perçoit de son environnement et de sa révision des croyances, l'agent peut détecter des nouvelles opportunités qui favorisent la réalisation de ses intentions ou qui peuvent même empêcher cette réalisation. Cette analyse est effectuée par la composante **Analyseur opportunités**. Ces nouvelles opportunités sont communiquées au **Filtre**. Le **Filtre** construit des plans partiels pour aboutir aux intentions de l'agent avec l'aide de la composante **Raisonnement modalités** ; cette dernière a la responsabilité d'effectuer le raisonnement orienté action et la modalité de réalisation des plans.*

#### B- Architecture de subsomption

Développée par Brooks [Brooks 91], l'architecture de subsomption est adaptée aux agents réactifs, modélisés en termes de fonctions de transition entre les données perçues et les actions exécutées. Cette architecture, grâce à la possibilité de regrouper les fonctions de transition en groupes correspondant à la même action, constitue un système modulaire vertical. Les modules sont organisés en couches hiérarchisées, chaque couche ayant une priorité différente. Ainsi, un module sur une couche inférieure a une priorité plus grande qu'un module situé sur une couche plus élevée, parce qu'il est responsable d'une tâche plus simple mais plus urgente.

La figure suivante extraite de [UPB 03] représente une architecture de subsomption, utilisée pour construire un robot qui devait explorer la planète Mars:

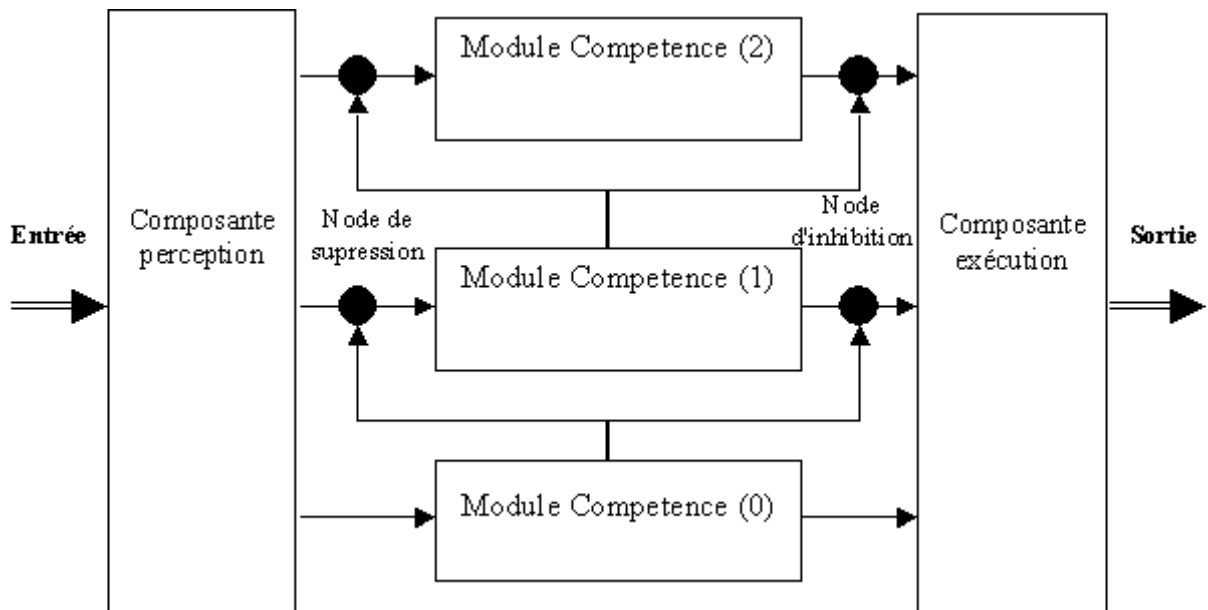


Figure 4.6: Une architecture de subsumption

La figure ci-dessus montre les trois composantes de l'architecture, à savoir la composante de perception, la composante d'exécution et la composante de sélection constituée de trois modules:

- *M0*: un module avec la compétence d'éviter les obstacles,
- *M1*: un module responsable des déplacements dans l'environnement tout en évitant les obstacles à l'aide de *M0*,
- *M2*: un module ayant la compétence supérieure, la plus abstraite, de faire l'exploration systématique de la planète en se déplaçant grâce aux actions du module *M1*.

#### C- Architecture hybride

Une architecture hybride combine le comportement proactif de l'agent, dirigé par les buts, avec un comportement réactif aux changements de l'environnement. Elle est alors composée d'un ensemble de modules organisés dans une hiérarchie, chaque module étant soit une composante cognitive avec représentation symbolique des connaissances et capacités de raisonnement, soit une composante réactive comme illustré dans la figure suivante extraite de [UPB 03]:

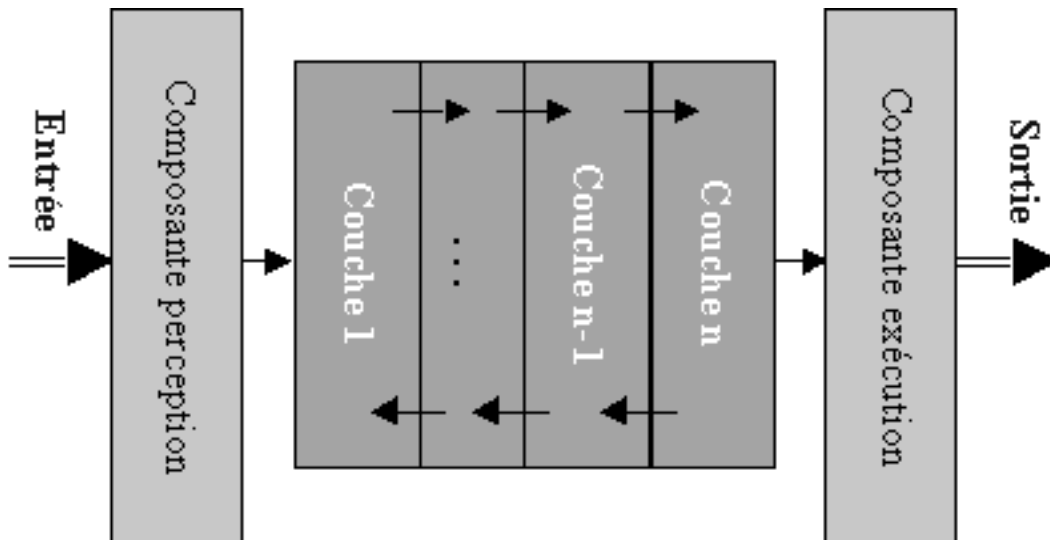


Figure 4.7: Une architecture hybride

#### 4.3.4.3 Implémentation d'agent

L'implémentation qui s'occupe de la réalisation pratique de l'architecture des agents à l'aide de langages de programmation.

#### 4.3.5 Types d'agents cognitifs

Nous venons de récapituler ci-haut tout ce que devrait signifier le concept d'agent. Nous restons quand même persuadés que seul l'usage de ce concept permet de le caractériser. Ainsi, distingue-t-on différents types d'agents cognitifs selon l'application qui les fait intervenir. Nous les énumérons ci-après, en adoptant la typologie proposée dans [Kolski et al 04] que nous mettons à jour.

##### 4.3.5.1 Agents intelligents

Ce sont des agents cognitifs autonomes, coopératifs et adaptatifs pouvant apprendre, acquérir leurs connaissances, les modifier, planifier leurs actions, et négocier avec d'autres agents.

La figure suivante, extraite de [Ferber 05] illustre l'image d'un agent intelligent:

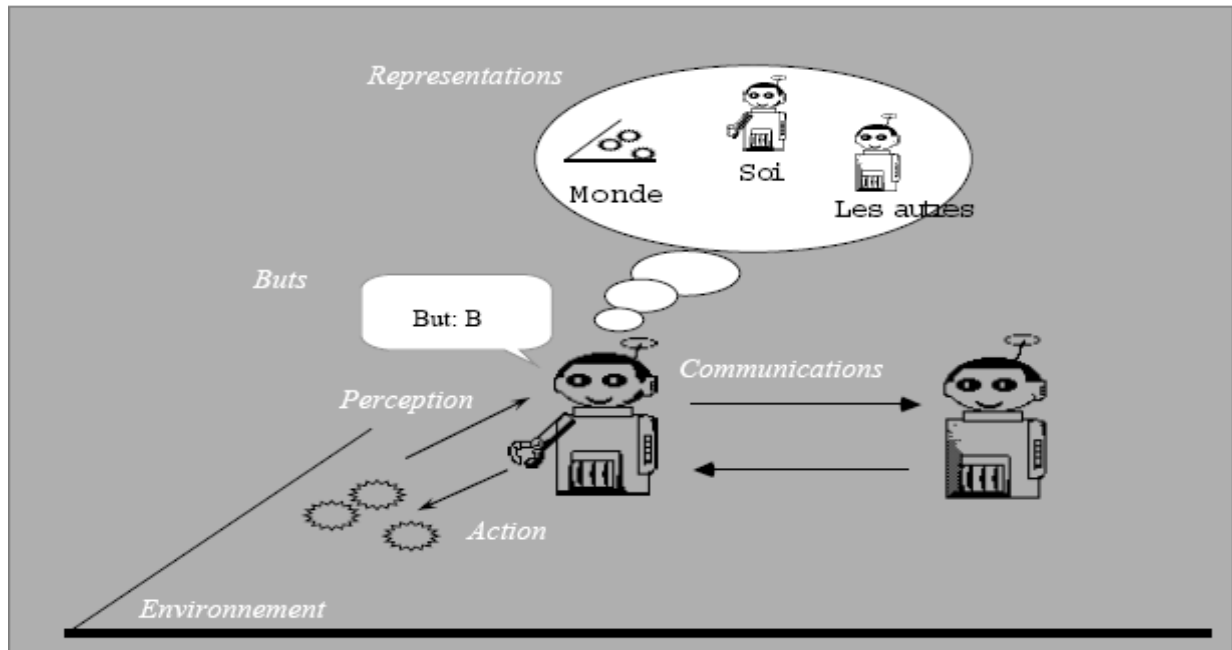


Figure 4.8: Image d'un agent intelligent

#### 4.3.5.2 Agents collaboratifs

Ce sont des agents cognitifs autonomes, coopératifs, peu adaptatifs et sans capacités d'apprentissage, utilisés surtout dans les domaines qui nécessitent une décentralisation comme la maintenance des réseaux, ou encore pour simuler le comportement d'organisations humaines ou animales.

#### 4.3.5.3 Agents d'interface ou assistants

Ce sont des agents cognitifs ayant en général une capacité de coopération limitée, principalement utilisés pour l'assistance à l'utilisateur dans le cas d'interfaces aux fonctionnalités nombreuses et complexes, mais également dans le domaine des systèmes tuteurs intelligents afin de faciliter l'apprentissage humain.

#### **4.3.5.4 Agents d'information**

Ce sont des agents cognitifs ayant une grande autonomie, pouvant agir seul, soit en fonction d'un calendrier, soit en fonction d'un manque d'information, soit en fonction d'une nouvelle disponibilité d'information, et adapter son comportement aux besoins de l'utilisateur ou selon la quantité ou pertinence de l'information.

#### **4.3.5.5 Agents conversationnels**

Ce sont des agents cognitifs ayant une grande capacité d'interaction multimodale, particulièrement langagière, avec l'utilisateur. Le concept d'agent conversationnel, relativement ancien puisqu'il remonte à la fin des années 60 [Bouchet 06], devient, dans les années 90, majoritairement animé, et donne naissance aux agents conversationnels animés. Les Agents Conversationnels Animés (ACA) sont, tel que présentés dans [Buisine 05], des personnages virtuels interactifs, se définissant par leur présence animée au sein d'un dispositif visuel (le plus souvent un écran), quelle que soit leur apparence (personnage humanoïde, fantaisiste...). Ils ont aussi un rôle communicatif, quel qu'en soit le degré d'élaboration et la modalité d'expression (parole orale, écrite, communication non verbale...). La conception de tels agents est par nature pluridisciplinaire: les domaines concernés incluent le graphisme, l'animation, l'intelligence artificielle, le traitement automatique de la langue, l'architecture logicielle, le design d'interface, la synthèse vocale, l'ergonomie, la psychologie, la sociologie, les arts du spectacle [Buisine 05]. Rares étant les équipes de recherches regroupant toutes ces compétences, la plupart des ACA rencontrés restent des prototypes de recherche. La figure suivante en présente des exemples développés dans quelques laboratoires français et extraits de [Pesty 06]



Figure 4.9: Prototypes d'ACA

L'exemple d'ACA le plus connu reste Trombine, le fameux trombone de Microsoft.

Les ACA sont créés:

- dans le cadre de la personnalisation d'interfaces utilisateurs [André et al 98] [André et al 00], avec l'adjonction d'un avatar représentant l'agent, doté au minimum d'une représentation graphique statique, mais aussi souvent d'expressions animées et d'une voix de synthèse leur permettant de vocaliser leurs réponses.
- ou pour exhiber des comportements émotionnels: les agents émotionnels [Kshirsagar et al 01] capables de réagir aux émotions exprimées par un utilisateur, et détectées au travers de ses expressions faciales. Cette réaction est basée sur un modèle computationnel du comportement émotionnel intégrant un modèle de la personnalité,
- ou pour prendre en considération le rôle du contexte social dans le comportement d'un agent: les agents personnalisés, modélisant de quelle manière les relations sociales et les comportements envers les autres affectent le dynamisme d'une interaction entre plusieurs agents [Rist et al 03], ou tentant de modéliser des comportements culturels [King et al 03], ou intégrant des variables contextuelles, telles que la distance sociale, le pouvoir social et la menace, dans leurs calculs de comportements verbaux et non verbaux d'un agent [Prendinger et al 04],
- ou dans le cadre d'applications pédagogiques: les agents pédagogiques [Pelachaud et al 04] qui constituent un paradigme pluridisciplinaire relativement récent pour les recherches en environnements interactifs d'apprentissage

humain. Ils se situent à la croisée de deux directions de recherche : les agents conversationnels et les environnements d'apprentissage à base de connaissance.

Les figures suivantes, extraites de [Bisognin et al 04], illustrent deux visions d'ensemble d'un agent conversationnel et un agent émotionnel, respectivement:

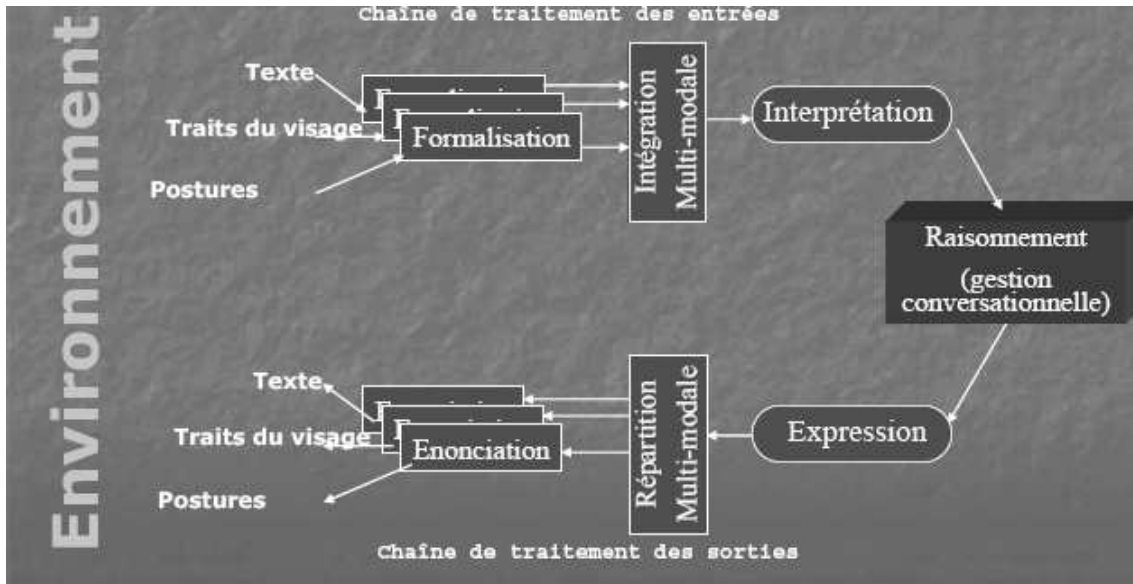


Figure 4.10 Vision d'ensemble d'un agent conversationnel

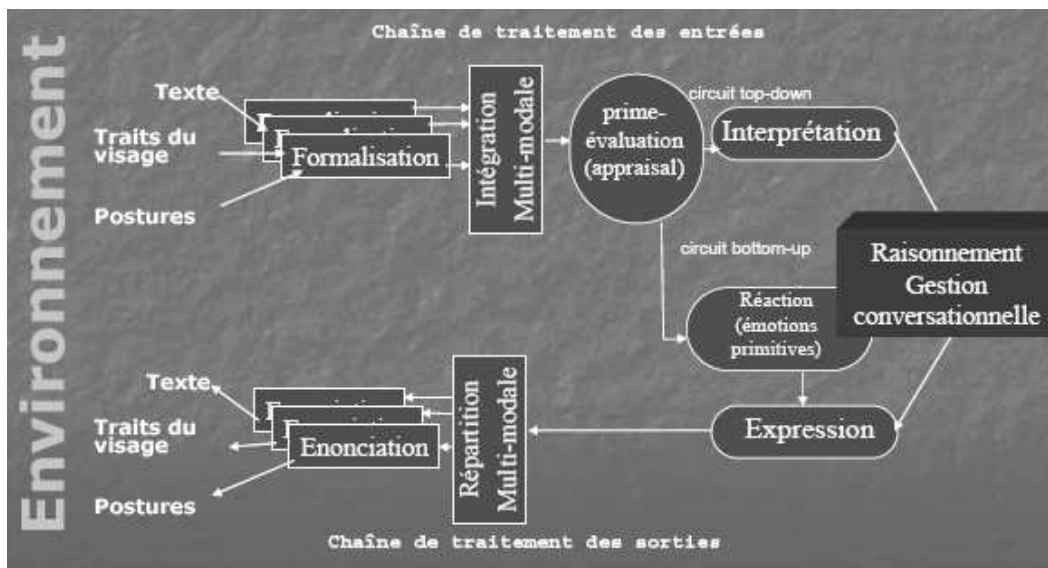


Figure 4.11 Vision d'ensemble d'un agent émotionnel

- ou dans le cadre de la généralisation des systèmes distribués autour de la technologie Internet qui crée des besoins et pose des problèmes nouveaux à la Communication Homme-Machine (CHM), avec l'émergence de la notion de



médiateurs permettant à des utilisateurs non spécialistes d'accéder à des composants interagissant de manière de plus en plus naturelle, pour répondre à des requêtes isolées: les agents dialogiques, dont nous présentons un modèle dans la figure ci-après, extraite de [Sansonnet et al 05]

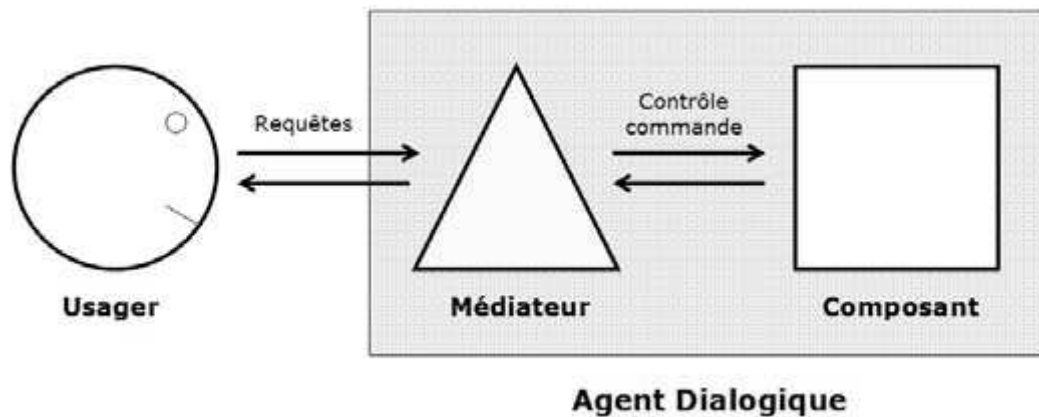


Figure 4.12 Principe d'architecture à médiateur pour un agent dialogique

Voilà maintenant le moment venu de revenir à la question que nous nous posons au moment où nous abordons le paragraphe sur les SMA: un système multi-agents n'est-il qu'une collection d'agents?

Il est indéniable, après ce que nous venons de voir, que la réponse ne peut être que négative et qu'un SMA est plutôt un collectif d'agents considéré comme une véritable communauté virtuelle au sens de Quentin Jones [Jones 97], dont les agents sont les participants.

Un point indispensable à l'existence d'une communauté virtuelle étant la communication entre ses participants [Chicoisne 02], la vie d'un SMA repose sans conteste sur le maintien d'une interaction entre ses agents. Discutons alors de la communication dans les SMA dans le paragraphe suivant.

#### 4.4 Communication inter-agents

L'envoi de messages est la base de la communication entre agents. Deux modes de communication sont généralement distingués selon la destination du message. Ainsi, les deux catégories suivantes sont clairement énumérées dans [Chicoisne 02] :

- Communication adressée: la communication adressée est une communication directe. L'agent émetteur envoie un message dont l'identifiant de l'agent destinataire est explicité parmi les paramètres qui le constituent. Le message est alors acheminé jusqu'à son destinataire.

- Communication par l'environnement: c'est une communication indirecte. L'agent émetteur envoie le message qui est déposé dans un ou plusieurs environnements où il sera perçu par les autres agents. La réception des messages, passive dans le mode de communication adressée, se résume dans ce mode à une consultation de l'environnement.

La communication dans les SMA s'inspirant depuis quelques années, de plus en plus, des phénomènes de la communication humaine pour qui principalement, communiquer est plus que envoyer et recevoir des messages, a alors vite adopté le concept d'acte de langage, concept ayant enrichi la philosophie du langage humain depuis les années soixante [Austin 62], et sur lequel nous revenons dans ce qui suit:

#### ***4.4.1 Actes de langage***

La notion d'acte de langage vit donc le jour, au début des années soixante, lorsque Austin montrait « comment agir avec des mots » [Austin 62]. Il stipulait alors que prononcer un énoncé équivalait à la réalisation simultanée de trois actes [Jars 02]:

- un acte locutoire: qui consiste à utiliser des conventions sociales, la langue, pour produire un énoncé doté d'un sens et d'une référence. Il nécessite un échange de signaux physiques et dépend de la nature du médium physique utilisé pour communiquer,

- un acte illocutoire: acte produit en disant quelque chose: avertir, informer, promettre, commander,

- un acte perlocutoire: qui est l'effet produit sur le monde par l'énoncé. Cet effet, particulièrement visible dans les énoncés déclaratifs, dépend de l'énoncé proféré, mais aussi des conditions dans lesquelles il a été dit.

Ainsi, dans cet exemple extrait de [Chicoisne 02], énoncer « Le ciel est bleu » correspond à un acte locutoire. La dimension illocutoire de cet énoncé est une assertion. L'acte perlocutoire peut être, suivant le contexte, une simple information, un refus d'aller au cinéma, une incitation à la promenade.

Les travaux d'Austin étaient suivis, à partir de la fin des années soixante, par ceux de Searle et Vanderveken sur l'axiomatisation de la logique illocutoire [Searle 69][Searle et al 85][Vanderveken 88][Vanderveken 90a][Vanderveken 90b], qui ont précisé la notion d'acte de langage en décomposant un énoncé en deux parties : le contenu propositionnel et la force illocutoire, en apportant un ensemble de contraintes sur le choix des forces illocutoires qu'il est possible d'employer à un moment donné d'une conversation. Ainsi, est-il posé qu'un acte de langage A est de la forme :  $A = F(P)$  où F est une force illocutoire appliquée à un contenu propositionnel P. La force illocutoire est présente dans une phrase sous la forme d'un verbe à la première personne de l'indicatif. L'acte de langage correspondant à la question (as-tu vu le match?) demandant, par exemple, à une personne si elle a regardé le match, doit être : je demande si tu as vu le match; le performatif étant ici le verbe « demander ». Notons qu'un performatif, ou « verbe performatif » (de l'anglais *to perform*, accomplir, exécuter, effectuer...) est un verbe existant dans une langue donnée et pouvant participer à la construction d'un acte de langage.

En se basant sur le formalisme des actes de langage, des langages ont été développés pour permettre l'interaction entre agents artificiels. Nous citons puis présentons brièvement dans ce qui suit:

- le langage KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) [Finin et al 94]

- le langage ACL (Agent Communication Language) [FIPA 97b] de la FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents)

#### **4.4.2 Langage KQML**

KQML est un langage fondé sur la théorie des actes de langage pour permettre la coopération d'agents cognitifs. Il est basé sur le fait de pouvoir coder explicitement dans les messages des actes illocutoires en termes de types de messages ou performatifs, et repose sur les états mentaux des agents. Il est caractérisé par:

- D'une part, la syntaxe du LISP a été utilisée et les arguments sont représentés dans un ordre quelconque.
- D'une autre part, trois couches sont conceptuellement identifiées dans un message de KQML [Jars 02]:
- la couche « contenu »: comporte le message proprement dit représenté par un langage propre au système,
- la couche de « communication »: comporte les paramètres de communication les plus bas tels que l'identité de l'expéditeur et du destinataire et un identifiant unique associé à la communication,
- la couche « message »: détermine l'acte de langage ou le performatif que l'expéditeur attache au contenu du message.

De son côté, le format KIF (Knowledge Interchange Format) est utilisé pour construire le corps du message KQML. C'est un langage déclaratif de type logique, utilisé pour l'échange de connaissance entre différents programmes. Ainsi les requêtes peuvent être exprimées par ce format

#### **4.4.3 Langage ACL-FIPA**

Ce langage s'appuie sur la définition de deux ensembles :

- un ensemble d'actes communicatifs de base, actes primitifs, dont la composition peut engendrer d'autres actes de communication, actes composés. Notons que, bien que se réclamant de la théorie des actes de

langage, les actes communicatifs de ce langage ne correspondent pas exactement aux performatifs de la théorie des actes de langage.

- un ensemble de messages prédéfinis compréhensibles par tous les agents.

Fondé sur le langage KQML, le langage ACL-FIPA reprend la décomposition conceptuelle d'un message de KQML. Ainsi, nous distinguons:

- un niveau « message » qui précise le type d'acte de langage employé, l'ontologie employée et éventuellement le protocole dans lequel s'intègre le message,
- un niveau « communication » qui donne les informations sur la transmission du message (émetteur, destinataire) ou le protocole dans lequel s'insère le message en cours,
- un niveau « contenu » qui correspond au message proprement dit.

Les langages KQML et ACL-FIPA présentent quelques similarités et différences résumées dans [Sahnoun 05] par:

- Similarités:
  - Séparation entre le langage externe (performative) et le langage interne (contenu).
  - Permettent n'importe quel langage du contenu
- Différences
  - Primitives de Communication:
    - KQML: performative
    - LCA FIPA: acte de communication
  - Frameworks sémantiques différents: impossible d'avoir une correspondance exacte ou des transformations entre les performatives KQML et FIPA.
  - KQML fournit des services facilitateurs alors que LCA FIPA n'en fournit pas.

Les langages d'agents, dont nous venons de donner un bref aperçu, ont été développés pour servir des besoins d'agents artificiels, et sont donc peu adaptés à l'interaction humaine. Néanmoins, les tentatives d'application de la théorie des actes de langage aux langages d'agents participent au rapprochement de ces langages et de la langue naturelle, même si comme montré dans [Chicoisne 02], cette application n'a été que limitée.

Voilà qui termine ce chapitre consacré donc aux concepts d'agent, de systèmes multi-agents et de communication. Nous estimons, à présent, disposer des moyens à même de nous permettre d'aborder la réalisation du principal objectif de cette thèse: concevoir un outil explicatif, à base d'agents dialogiques pour la simulation qualitative. Nous en discutons dans les deux chapitres suivants.

## Chapitre 5

# Modélisation des Connaissances et du Raisonnement Explicatifs d'un Outil Explicatif pour la Simulation Qualitative.

*"Nous avons beau enfler nos conceptions  
au-delà des espaces imaginables,  
nous n'enfantons que des atomes,  
au prix de la réalité des choses."*

Pascal

Nous nous sommes proposés, dans le cadre de cette thèse, de doter la machine de capacités explicatives et dialogiques pour mieux comprendre la simulation qualitative. Les chapitres précédents ont alors servi à définir les contours de notre proposition. Le présent chapitre devra, lui, concrétiser l'idée d'un processus explicatif ayant son propre raisonnement et ses propres connaissances. Il servira à la modélisation du raisonnement explicatif, des connaissances explicatives et du texte explicatif pour un outil explicatif destiné à la simulation qualitative, dont nous commençons alors par rappeler la problématique.

### 5.1 Problématique

Le plus populaire des algorithmes de simulation qualitative, QSIM, produit une succession d'états qualitatifs. Rappelons que pour l'exemple particulier de la balle lancée en l'air, discuté dans le deuxième chapitre de ce manuscrit, l'ensemble des états inférés durant le processus de simulation, ainsi que les transitions d'états sous leurs deux formes (p-transitions et i-transitions) sont regroupés dans la table représentée dans la figure ci-après:

time $t_i$	P-trans	time $[t_i, t_{i+1}]$	I-trans	time $t_{i+1}$
<1j, std>	p1	<1j, std>	i1	<1j, std>
<1j, std>	p2	<1j, lj+1), inc>	i2	<lj+1, std>
<1j, std>	p3	<lj-1, lj), dec>	i3	<lj-1, std>
<1j, inc>	p4	<1j, lj+1), inc>	i4	<lj+1), inc>
<lj, lj+1), inc >	p5	<lj, lj+1), inc>	i5	<lj, lj+1), inc>
<lj, dec>	p6	<lj-1, lj), dec>	i6	<lj-1, dec>
<lj-1, lj), dec >	p7	<lj-1, lj), dec>	i7	<lj-1, lj), dec>
		<lj, lj+1), inc>	i8	<1*, std>
		<lj-1, lj), dec>	i9	<1*, std>

Figure 5.1 Etats successifs inférés durant le processus de simulation

La table ci-dessus nous apprend, par exemple, que l'état qualitatif < (lj, lj+1), inc> est inféré de l'état qualitatif <lj, inc> suite à la transition p4, et dérive sur l'état qualitatif <lj+1, inc> selon la transition i4.

La transition d'un état qualitatif à un autre résulte d'une variation continue d'un ensemble de paramètres. Un arbre des comportements est créé, dont la lecture n'est pas toujours de nature à satisfaire l'utilisateur final destinataire des résultats de la simulation. Ce dernier, averti ou novice d'ailleurs, peut bien demander que des explications lui soient fournies quant à la véracité d'une transition, ou l'absence éventuelle d'un comportement attendu. L'intervention d'un outil explicatif à cette fin est donc, à notre sens, souhaitée voire impérative. Cet impératif est le premier motif du développement de cet outil explicatif, objet du présent chapitre, que nous consacrons donc à sa modélisation.

Nous schématisons ce qui vient d'être dit par la figure suivante:



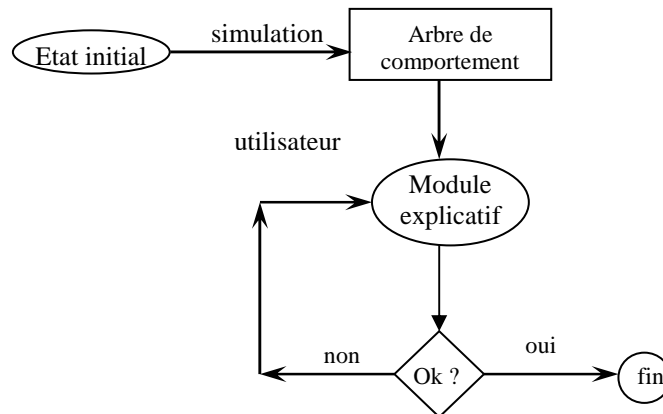


Figure 5.2 Un outil explicatif pour les résultats de la simulation

Il n'est évidemment pas dit que l'utilisateur final s'arrête à sa première requête, et c'est tout naturellement que nous devons prévoir qu'il revienne à la charge et, cette fois, pour demander des explications sur...la première explication qui lui a été fournie, ou...fournir lui-même de nouvelles connaissances au système dans l'esprit d'une production coopérative de l'explication finale. Cet échange engagé entre le système explicatif et l'utilisateur final, que nous illustrons dans la figure suivante, suggère déjà un aspect « dialogique » qui devra caractériser notre outil explicatif.

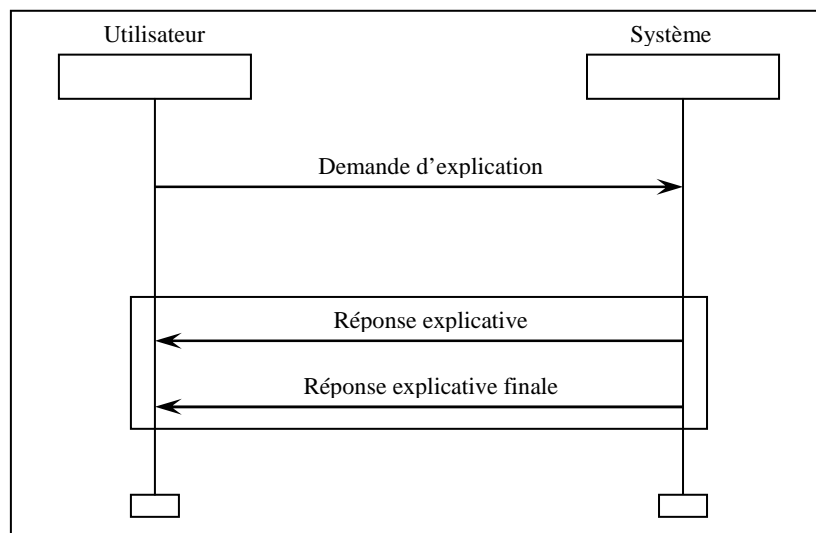


Figure 5.3 Echange utilisateur - outil explicatif

Ce dialogue est le résultat, du côté de l'outil explicatif comme celui du côté de l'utilisateur final, d'un raisonnement mettant en œuvre un ensemble de connaissances. Nous nous intéressons de suite à la modélisation du raisonnement explicatif, que suivra la modélisation des connaissances explicatives.

## 5.2 Modélisation du raisonnement explicatif

Le raisonnement explicatif dans notre outil explicatif est basé sur un ensemble de méthodes explicatives exécutées pour réaliser deux objectifs principaux:

- Justifier une transition d'états dans l'arbre des comportements
- Justifier l'absence d'un comportement attendu dans l'arbre des comportements.

Aussi, à la réception d'une requête de l'utilisateur final, l'outil explicatif l'analyse pour distinguer, puis y fournir une réponse satisfaisante, le besoin de ce dernier qui est donc:

- Soit demander à justifier une transition d'états lorsque la requête a commencé par l'un des adverbes interrogatifs « Pourquoi (Why) » ou « Comment (How) ».
- Soit demander à élucider le manque d'un comportement attendu dans l'arbre des comportements lorsque la requête a été initiée par l'adverbe interrogatif négatif « Pourquoi pas (Why not)».

La requête de l'utilisateur final étant clairement identifiée suite à cette analyse, l'outil explicatif devra s'atteler à la production de l'explication attendue par l'utilisateur final, selon une approche reconstructive, coopérative et contextuelle telle que discutée dans le troisième chapitre de ce manuscrit, puis à sa génération.

Le raisonnement explicatif explicité ci-dessus est repris dans l'algorithme général suivant:

Algorithme EXPLIQSIMDébut

*/\* Un utilisateur humain observe le déroulement de l'algorithme QSIM sur un phénomène particulier et récupère les résultats sous forme d'un arbre des comportements, il sollicite l'outil explicatif \*/*

*Initialiser NbEchec*

*Tant que Utilisateur intervient et NbEchec acceptable Faire*

Début

*Analyser intervention<sup>1</sup> de l'utilisateur ;*

*Si Requête Alors*

*Analyser validité de la requête ;*

*Si Requête valide Alors*

*Détermine r nature adverbe interrogatif ;*

*Si Adverbe = Pourquoi ou Comment Alors*

*justifier présence de transition dans arbre*

*Sinon*

*Si Adverbe = Pourquoi pas Alors*

*justifier absence de transition dans arbre*

*Sinon Incréments NbEchec*

*Finsi*

*Finsi*

*Sinon Incréments NbEchec*

*Finsi*

*Sinon Si Information Alors*

*Analyser Information*

*Si Information contradictoire Alors*

*Incréments NbEchec*

*Sinon Mettre à jour les connaissances du système*

*Finsi*

*Sinon Incréments NbEchec*

*Finsi*

*Finsi*

*Boucler*

*Fin Tant que*

*Fin EXPLIQSIM.*

Pour mettre en oeuvre ce raisonnement, Notre outil explicatif doit effectuer un ensemble de tâches, que nous identifions et décrivons ci-après, sur un ensemble

---

<sup>1</sup> Nous distinguons, en fait, une intervention de l'utilisateur demandant effectivement une explication, que nous appelons requête, de celle consistant à fournir de nouvelles connaissances au système, que nous appelons information

de connaissances explicatives dont nous détaillons la modélisation dans le paragraphe qui suivra.

### ***5.2.1 Identification des tâches explicatives***

Les tâches suivantes sont identifiées pour produire l'explication attendue par l'utilisateur final:

- La tâche d'analyse de l'intervention de l'utilisateur final. Elle consiste à déterminer s'il s'agit d'une requête dont il faut alors vérifier la validité, ou une information dont il faut alors ajouter les connaissances à la base des connaissances. Nous la notons *Analque*.
- La tâche de traitement de la requête avec l'un des adverbess interrogatifs Pourquoi ou Comment, chargée d'identifier l'adverbe interrogatif. Nous la notons *Why-how-key*.
- La tâche de traitement de la requête avec l'un des adverbess interrogatifs Pourquoi ou Comment, chargée de chercher dans la base des connaissances, les connaissances nécessaires à la construction du texte explicatif. Nous la notons *Why-how-know*
- La tâche de traitement de la requête avec l'adverbe interro-négatif Pourquoi-pas, chargée d'identifier l'adverbe interro-négatif. Nous la notons *Why-not-key*.
- La tâche de traitement de la requête avec l'adverbe interro-négatif Pourquoi-pas, chargée de chercher dans la base des connaissances, celles nécessaires à la construction du texte explicatif. Nous la notons *Why-not-know*.
- La tâche de construction du texte explicatif. Nous la notons *Consexp*.
- La tâche de génération du texte explicatif. Nous la notons *Genexp*.

Les tâches identifiées constituent, dans leur ensemble le modèle conceptuel du raisonnement explicatif représenté dans la figure ci-après:

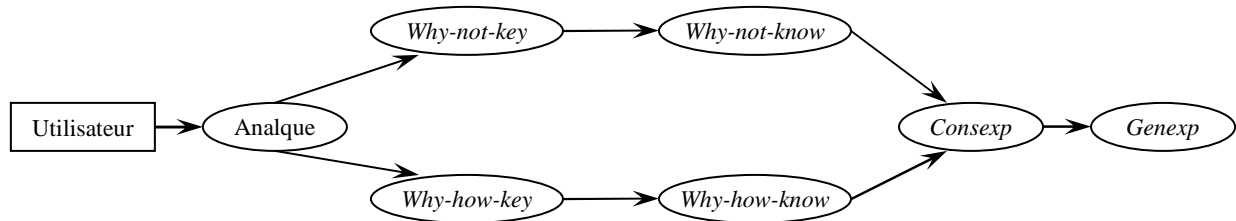


Figure 5.4 Modèle conceptuel du raisonnement explicatif

### 5.2.2 Description des tâches explicatives

Nous proposons à présent une description détaillée des tâches identifiées précédemment. Ainsi, nous donnerons pour chacune d'elles, son rôle, son entrée, sa sortie, sa structure de contrôle et sa fréquence d'utilisation.

#### 1. la tâche *Analque*:

Rôle : analyse l'intervention de l'utilisateur.

Entrée : intervention de l'utilisateur.

Sortie : selon nature de l'intervention

Structure de contrôle : Si requête valide

Alors déclencher production d'explication

Sinon Si information

Alors mettre à jour base des connaissances

Sinon Erreur

Fréquence d'utilisation : régulière

#### 2. la tâche *Why-not-key*:

Rôle : identifie l'adverbe interro-négatif « pourquoi pas ».

Entrée : adverbe de la requête.

Sortie : selon résultat de l'identification.

Structure de contrôle : Si adverbe interro-négatif identifié

Alors exécuter tâche *Why-not-know*

Sinon exécuter tâche *Why-how-key*

Fréquence d'utilisation : Faible

3. la tâche *Why-not-know*:

Rôle : rechercher les connaissances appropriées

Entrée : contenu de la requête

Sortie : explication à construire

Structure de contrôle : néant

Fréquence d'utilisation : faible

4. la tâche *Why-how-key*:

Rôle : identifier un adverbe interrogatif

Entrée : sortie de la tâche *Why-not-key*

Sortie : exécuter la tâche *Why-how-know*

Structure de contrôle : Si adverbe « pourquoi » identifié

Alors chercher connaissances appropriées

Sinon chercher connaissances relatives à

l'adverbe « comment »

Fréquence d'utilisation : régulière

5. la tâche *Why-how-know*:

Rôle : rechercher les connaissances appropriées

Entrée : contenu de la requête

Sortie : explication à construire

Structure de contrôle : néant

Fréquence d'utilisation : régulière

6. la tâche *Consexp*:

Rôle : construit un texte explicatif intermédiaire

Entrée : sortie de la tâche *Why-how-know* ou *Why-not-know*

Sortie : texte explicatif intermédiaire

Structure de contrôle : néant

Fréquence d'utilisation : régulière

### 7. la tâche *Genexp*:

Rôle : génère le texte explicatif final

Entrée : sortie de la tâche *Consexp*

Sortie : texte explicatif final

Structure de contrôle : néant

Fréquence d'utilisation : régulière

## 5.3 Modélisation des connaissances explicatives

La modélisation des connaissances est une activité de représentation des connaissances relatives à un domaine de savoir. Elle vise à identifier et structurer les connaissances en une représentation schématique pour les rendre visibles, manipulables, compréhensibles et communicables [Paquette 02]. Les chercheurs en intelligence artificielle ont recours à des techniques de modélisation de connaissances pour spécifier les connaissances à introduire dans un système informatique intelligent. La représentation schématique produite au cours d'un processus de modélisation des connaissances s'appelle « modèle des connaissances ».

Différents types de connaissances sont nécessaires pour l'exécution des différentes tâches du modèle conceptuel du raisonnement explicatif de notre outil explicatif. Nous nommons:

- **Les stratégies explicatives:** qui représentent les méthodes de résolution mises en oeuvre lors de la construction de l'explication. *Faire une synthèse du processus de simulation qualitative en proposant la table des états successifs inférés*, ou *Pour présenter un concept du domaine si l'on est en cours de résolution donner sa description comportementale sinon énoncer sa définition* en sont deux exemples.
- **Les principes explicatifs:** qui représentent des connaissances plus heuristiques qui contribuent à l'amélioration de l'explication de base proposée par les stratégies explicatives. Les textes *Il est préférable d'illustrer par un*

*exemple les concepts complexes et il est nécessaire de justifier les concepts inconnus de l'utilisateur* représentent des principes explicatifs.

- **Les connaissances du domaine:** qui sont utiles à l'explication. Nous en citons par exemple les concepts et définitions relatives à la simulation qualitative en général et l'algorithme QSIM, objet de notre étude, en particulier.
- **Les connaissances élaborées au cours du raisonnement explicatif:** comme les textes explicatifs intermédiaires, et l'historique des échanges entre le système et l'utilisateur. .
- **Les connaissances de coopération:** qui permettent de prendre en considération les spécificités du système et l'utilisateur, les deux agents du processus coopératif qu'est l'explication dans DIABET. Le texte *L'utilisateur est un spécialiste de QSIM*, en est un exemple.
- **Les connaissances de contrôle:** composées de contraintes et de connaissances d'évaluation servant à choisir entre différentes stratégies explicatives ou différents principes explicatifs. Le texte *Il est préférable de détailler un concept mal maîtrisé par l'utilisateur* en est un exemple.
- **Les connaissances linguistiques:** nécessaires pour la génération en langage naturel du texte explicatif.

Les types de connaissances explicatives précédemment cités peuvent être regroupés en différentes classes selon le rôle joué par chacun d'eux dans l'élaboration du discours explicatif. Ainsi, on distingue:

- **Les connaissances contextuelles:** qui bien que n'intervenant pas directement dans la construction d'une explication, y restent d'un apport considérable quant à l'efficacité des connaissances d'autres classes. Il s'agit notamment de la table des états qualitatifs inférés, et de l'historique de l'échange outil explicatif -utilisateur final.
- **Les connaissances constructives:** qui, en s'appuyant sur les connaissances contextuelles, participent activement à la construction d'une explication. Il



s'agit des stratégies explicatives, des principes explicatifs et des connaissances de contrôle.

- **Les connaissances génératrices:** qui servent à la génération en langage naturel du texte de l'explication construite. Il s'agit des connaissances linguistiques en plus des textes explicatifs intermédiaires.
- **Les connaissances contextualisées:** ce sont les connaissances ayant été utilisées à une étape antérieure du processus d'explication. Il s'agit notamment des connaissances du domaine de la simulation qualitative ou de l'algorithme QSIM, utiles à l'explication.
- **Les connaissances de coopération:** qui permettent de déterminer pour le système et l'utilisateur, le rôle de chacun dans l'élaboration de l'explication.

Tenant compte des connaissances recensées précédemment, et le rôle revenant à chacune d'elles dans la production d'une explication, le modèle des connaissances suivant, structuré en trois couches, peut être construit.

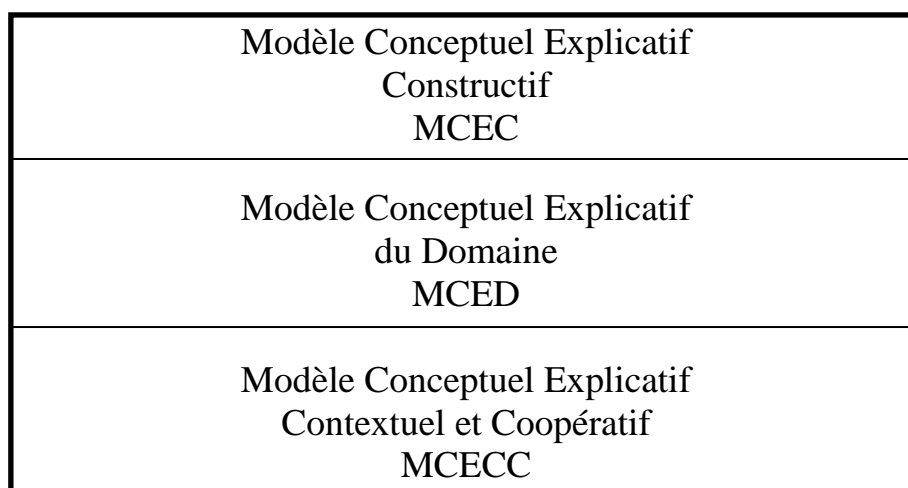


Figure 5.5 Modèle conceptuel des connaissances explicatives

Le modèle représenté dans la figure précédente est inspiré du modèle en trois couches de la méthodologie de conception KADS (Knowledge Acquisition and Structure Design), développée à l'université d'Amsterdam [Wielinga 92].

## 5.4 Modélisation d'un texte explicatif

Le modèle des graphes conceptuels de Sowa [Sowa 84] a montré son adaptabilité et ses preuves dans plusieurs domaines. Sowa proposait d'ailleurs que sa théorie soit un langage universel de représentation des connaissances pour tout système intelligent [Sowa 92]. Nous proposons alors de l'utiliser pour modéliser un texte explicatif dans l'outil explicatif projeté. Commençons alors par rappeler brièvement la notion de graphes conceptuels.

Les graphes conceptuels ont été conçus pour représenter la sémantique du langage naturel; ils ont évolué pour devenir des systèmes complets au sens de la logique.

De façon générale, un graphe conceptuel est défini comme un graphe fini, connexe et qui a deux sortes de noeuds:

- Les noeuds concepts qui représentent des entités, des attributs, des états, des événements...
- Les noeuds relations conceptuelles qui symbolisent les liens qui existent entre deux concepts.

En vue de modéliser un texte explicatif dans l'outil explicatif projeté par des graphes conceptuels, nous proposons de passer par sa représentation en utilisant la forme de représentation des textes décrite dans [Bourcier et al 94]. Ainsi, un texte est-il subdivisé en plusieurs propositions reliées par des liens argumentatifs. Soit, par exemple, à représenter dans notre outil explicatif le texte explicatif suivant: *tel comportement n'apparaît pas dans l'arbre des comportements bien que la simulation l'avait prédit, car celle-ci a mal tourné*, qui justifie l'absence d'un comportement prévu dans l'arbre des comportements suite à l'exécution de l'algorithme de simulation qualitative QSIM. Le texte est en premier lieu divisé en les trois propositions P1, P2 et P3 suivantes:

P1 : tel comportement n'apparaît pas dans l'arbre des comportements

P2 : la simulation a prédit ce comportement

P3 : la simulation n'a pas tourné correctement.

En deuxième lieu, les trois propositions sont reliées par les liens argumentatifs *Bien que*, et *Car*.

En utilisant les graphes conceptuels, dont nous utilisons la représentation graphique<sup>1</sup>, nous obtenons dans un premier temps:

- le graphe conceptuel représenté dans la figure suivante, précédé du symbole de la négation, qui correspond à la proposition P1:

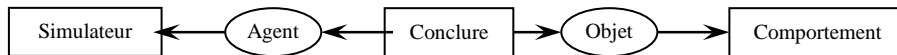


Figure 5.6 graphe conceptuel correspondant à la proposition P1

Le graphe conceptuel ci-dessus utilise les concepts *Simulateur*, *Conclure* et *Comportement* dans des nœuds rectangulaires, et les relations *Agent* et *Objet* dans des nœuds circulaires.

- le graphe conceptuel représenté dans la figure suivante, qui correspond à la proposition P2:

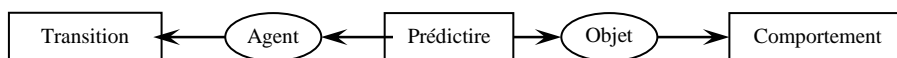


Figure 5.7 graphe conceptuel correspondant à la proposition P2

Le graphe conceptuel ci-dessus utilise les concepts *Transition*, *Prédire* et *Comportement* dans des nœuds rectangulaires, et les relations *Agent* et *Objet* dans des nœuds circulaires.

- le graphe conceptuel représenté dans la figure suivante, précédé du symbole de la négation, qui correspond à la proposition P3:

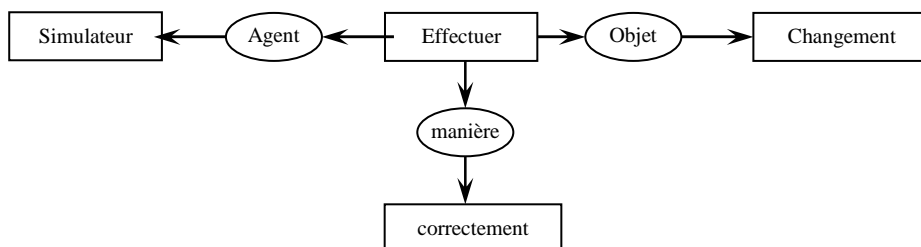


Figure 5.8 graphe conceptuel correspondant à la proposition P3

<sup>1</sup> Il existe en fait deux types de notations pour les graphes conceptuels: la notation graphique, de lisibilité simple, et la notation linéaire proche de l'implantation en logique du premier ordre.

Le graphe conceptuel ci-dessus utilise les concepts *Simulateur*, *Effectuer*, *Changement* et *Comportement* dans des nœuds rectangulaires, et les relations *Agent*, *Objet* et *Manière* dans des nœuds circulaires.

Les trois graphes ci-dessus obtenus, nous opérons, dans un deuxième temps, à leur association au travers d'un réseau sémantique. Il en résulte le réseau sémantique représenté dans la figure suivante.

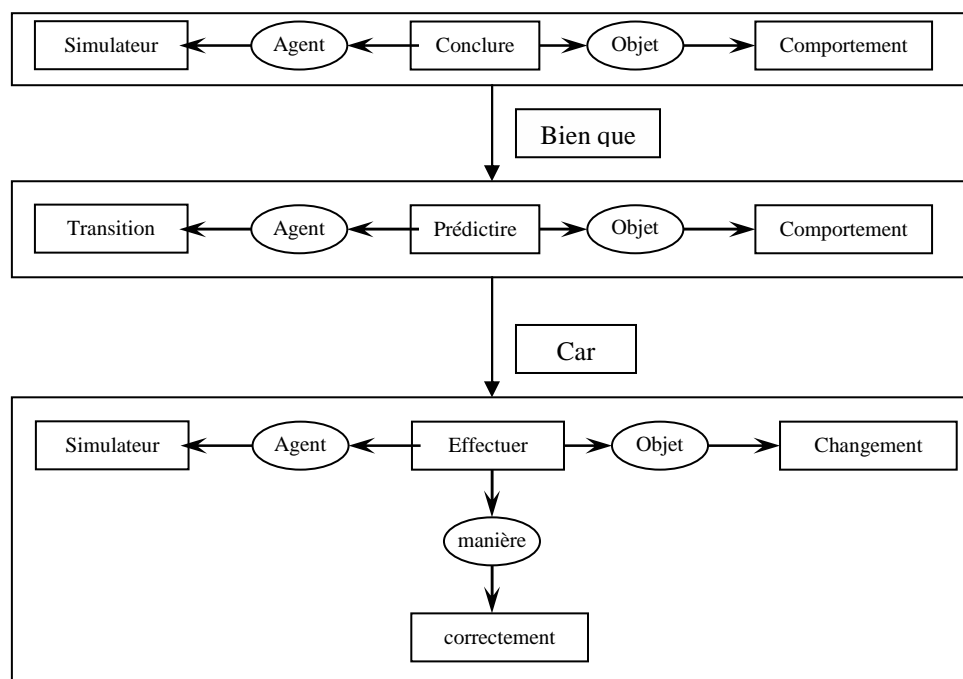


Figure 5.9 Réseau sémantique correspondant au texte explicatif

La modélisation des connaissances explicatives et autre raisonnement explicatif est maintenant achevée. Nous venons alors de répondre à deux des principales préoccupations que nous avons fait nôtres au début de cette thèse. Nous poursuivons la réponse aux autres questionnements, et par la même la conception de notre outil explicatif dans le chapitre suivant.

## Chapitre 6

# DIABET: Un Système Explicatif à Base d'Agents Dialogiques pour la Simulation Qualitative.

*"Toutes choses produites  
par notre propre discours et suffisance,  
autant vraies que fausses,  
sont sujettes à incertitude et à débat."*

Michel de Montaigne

L'objectif principal de notre outil explicatif est maintenant clairement identifié: l'élaboration coopérative avec un utilisateur humain d'une explication demandée par ce dernier, le raisonnement qu'il tient et les connaissances qu'il manipule bien définis, nous proposons dans ce chapitre d'en détailler l'architecture, après la discussion préliminaire suivante qui guidera nos choix.

### 6.1 Discussion

Les modèles du raisonnement explicatif et connaissances explicatives précédents ont révélé des faits très intéressants quant à la modélisation de notre outil explicatif:

1. Certaines tâches explicatives ont pour rôle de chercher des connaissances en provenance de différentes sources. Elles peuvent donc être remplacées par des sous-tâches s'effectuant en simultanéité. C'est particulièrement le cas des tâches *Why-how-know* et *Why-not-know* chargées, rappelons le, de chercher les connaissances nécessaires à la construction de l'explication, qui sont, selon le modèle conceptuel des connaissances construit dans le paragraphe précédent, soit « constructives », soit « du domaine », soit « coopératives et contextuelles ». Nous proposons donc de les subdiviser en trois sous-tâches chacune:

- *Why-how-know-C* (pour chercher les connaissances constructives), *Why-how-know-D* (pour chercher les connaissances du domaine), et *Why-how-know-CC* (pour chercher les connaissances coopératives et contextuelles), dans le cas des requêtes comprenant les questions « pourquoi » ou « comment ».

- *Why-not-know-C* (pour chercher les connaissances constructives), *Why-not-know-D* (pour chercher les connaissances du domaine), et *Why-not-know-CC* (pour chercher les connaissances coopératives et contextuelles), dans le cas des requêtes comprenant la question « pourquoi pas ».

Ce premier fait, décelant clairement une distribution des sous-tâches indiquées, plaide incontestablement pour les confier à des **agents**.

2. D'autres tâches sont effectuées pour assurer l'interaction de notre outil explicatif avec son utilisateur final, dans le cadre, maintes fois rappelé, de leur coopération pour produire la meilleure explication souhaitée. Elles sont donc « garantes » d'un dialogue ininterrompu entre notre outil explicatif et l'utilisateur final. C'est le cas des tâches *Analque*, *Consexp* et *Genexp*, qu'il est alors fortement recommandé d'attribuer à des **agents dialogiques**, dont nous avons révélé les capacités indéniables dans ce domaine, à la fin du troisième chapitre de ce manuscrit.

En somme, nous constatons une dominance quasi-totale de la notion d'agent dans l'architecture de notre outil explicatif. Nous optons alors pour compléter cette dominance en choisissant de confier délibérément les deux tâches restantes, *Why-how-key* et *Why-not-key* à des **agents**. Nous constatons alors qu'en plus de l'aspect « explicatif » qualifiant notre outil, nous pouvons aussi le caractériser d'outil « à base d'agents dialogiques ». Nous choisissons alors de le désigner par l'acronyme DIABET (a **DI**alogical **A**gent-**B**ased **E**xplanatory **T**ool) faisant ressortir ces deux aspects. Dans la suite de ce chapitre, nous utiliserons cet acronyme aussi bien pour désigner l'outil global que chacun de ses agents individuellement.

## 6.2 Modélisation des agents DIABET

Chacune des tâches précédemment décrites est donc dévolue à un agent chargé de son exécution.

### 6.2.1 Identification des agents

Nous identifions donc les agents suivants:

- L'agent *Anque* : pour exécuter la tâche *Analque*.
- L'agent *Whot-key* : pour exécuter la tâche *Why-not-key*.
- L'agent *Whow-key* : pour exécuter la tâche *Why-how-key*.
- L'agent *Conex* : pour exécuter la tâche *Consexp*.
- L'agent *Genex* : pour exécuter la tâche *Genexp*.
- Les trois agents *Whow-know-C*, *Whow-know-D* et *Whow-know-CC* pour exécuter les tâches *Why-how-know-C*, *Why-how-know-D* et *Why-how-know-CC* respectivement.
- Les trois agents *Whot-know-C*, *Whot-know-D* et *Whot-know-CC* pour exécuter les tâches *Why-not-know-C*, *Why-not-know-D* et *Why-not-know-CC* respectivement.

Une description détaillée de chacun de ces agents est donnée dans le paragraphe suivant.

### 6.2.2 Description des agents

Chacun des agents identifiés auparavant est décrit en donnant son nom, son rôle, ses objectifs et ses capacités de raisonnement:

1. L'agent *Anque* :

Nom: *Anque*

Rôle: détecter la nature de l'intervention de l'utilisateur

Buts: transmettre la requête utilisateur à l'agent *Whow-key* ou l'agent *Whot-key*, ou mettre à jour la base de connaissances explicatives.

Capacités de Raisonnement: à la réception de la requête de l'utilisateur, déterminer son type en fonction de son premier mot

2. L'agent *Whow-key*

Nom: *Whow-key*

Rôle: détecter les adverbes interrogatifs dans la requête utilisateur

Buts: préparer le processus de construction de l'explication

Capacités de Raisonnement: identifier les adverbes interrogatifs dans la requête utilisateur

3. L'agent *Whow-know-C*:

Nom: *Whow-know-C*

Rôle: répondre aux requêtes utilisateurs avec les adverbes interrogatifs Pourquoi ou Comment

Buts: préparer le processus de construction de l'explication

Capacités de Raisonnement: retrouver les connaissances constructives nécessaires à la construction de l'explication.

4. L'agent *Whow-know-D*:

Nom: *Whow-know-D*

Rôle: répondre aux requêtes utilisateurs avec les adverbes interrogatifs Pourquoi ou Comment

Buts: préparer le processus de construction de l'explication

Capacités de Raisonnement: retrouver les connaissances du domaine nécessaires à la construction de l'explication.

5. L'agent *Whow-know-CC*:

Nom: *Whow-know-CC*

Rôle: répondre aux requêtes utilisateurs avec les adverbes interrogatifs Pourquoi ou Comment

Buts: préparer le processus de construction de l'explication

Capacités de Raisonnement: retrouver les connaissances coopératives et contextuelles nécessaires à la construction de l'explication.

6. L'agent *Whot-key*:

Nom: *Whot-key*

Rôle: détecter l'adverbe interro-négatif dans la requête utilisateur



Buts: préparer le processus de construction de l'explication

Capacités de Raisonnement: identifier l'adverbe interro-négatif dans la requête utilisateur

7. L'agent *Whot-know-C*:

Nom: *Whot-know-C*

Rôle: répondre aux requêtes utilisateurs avec l'adverbe interro-négatif Pourquoi pas

Buts: préparer le processus de construction de l'explication

Capacités de Raisonnement: retrouver les connaissances constructives nécessaires à la construction de l'explication.

8. L'agent *Whot-know-D*:

Nom: *Whot-know-D*

Rôle: répondre aux requêtes utilisateurs avec l'adverbe interro-négatif Pourquoi pas

Buts: préparer le processus de construction de l'explication

Capacités de Raisonnement: retrouver les connaissances du domaine nécessaires à la construction de l'explication.

9. L'agent *Whot-know-CC*:

Nom: *Whot-know-CC*

Rôle: répondre aux requêtes utilisateurs avec l'adverbe interro-négatif Pourquoi pas

Buts: préparer le processus de construction de l'explication

Capacités de Raisonnement: retrouver les connaissances coopératives et contextuelles nécessaires à la construction de l'explication.

10. L'agent *Conex*:

Nom: *Conex*

Rôle: construire l'explication intermédiaire.

Buts: fournir à l'utilisateur une explication minimale en réponse à sa question.

Capacités de Raisonnement: construire une explication en utilisant les connaissances retrouvées par les agents *Whow-know* et *Whot-know*.

L'explication intermédiaire produite pouvant ne pas satisfaire l'utilisateur final, ce dernier coopérera avec *Conex* pour produire une explication meilleure.

11.L'agent *Genex*:

Nom: *Genex*

Rôle: générer le texte explicatif final

Buts: fournir à l'utilisateur la meilleure explication dans sa meilleure forme

Capacités de Raisonnement: générer l'explication finale.

L'explication finale est transmise à l'utilisateur final par l'agent *Genex*.

La figure suivante représente l'ensemble des agents décrits ci-dessus avec, pour des commodités de représentation, un regroupement des agents *Whow-know-C*, *Whow-know-D* et *Whow-know-CC* au sein de l'agent *Whow-know*, et un regroupement des agents *Whot-know-C*, *Whot-know-D* et *Whot-know-CC* au sein de l'agent *Whot-know*.

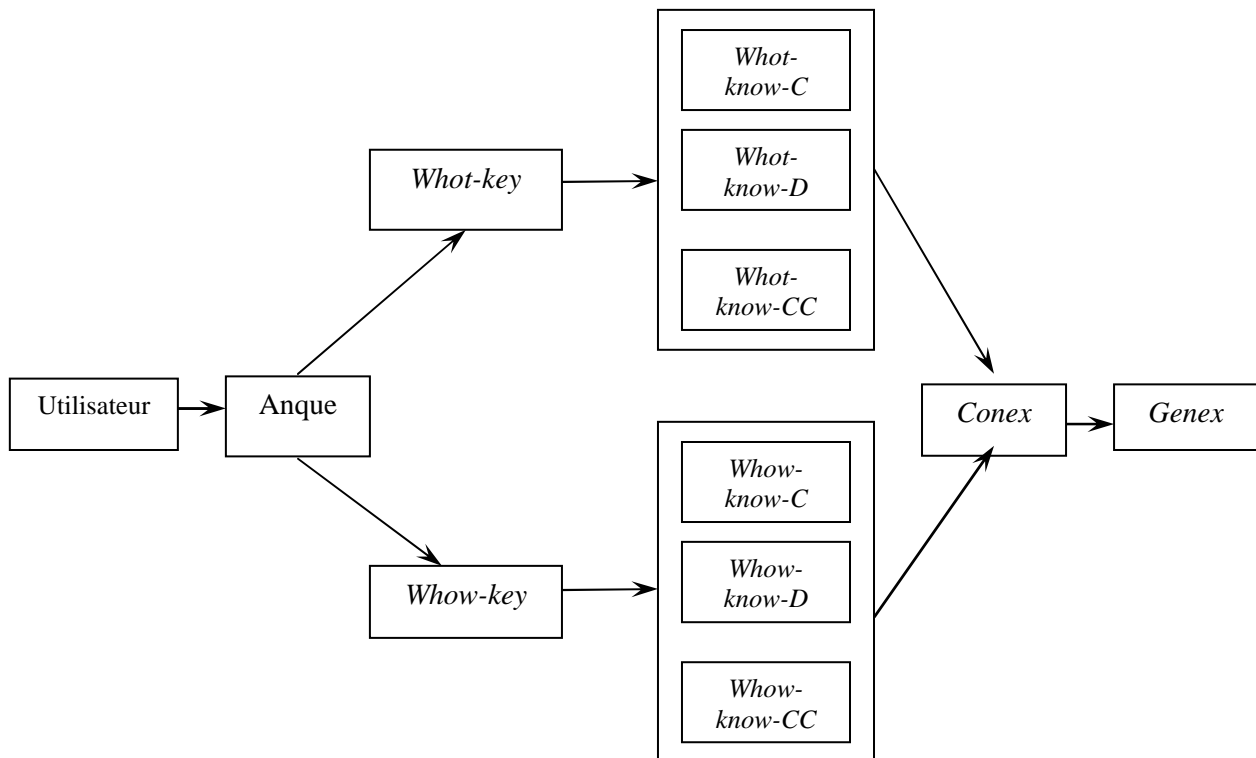


Figure 6.1: Un système à base d'agents dialogiques

Les agents décrits ci-haut sont homogènes dans leur structure et se différencient par leurs connaissances. Nous détaillons l'architecture d'un agent DIABET dans le paragraphe suivant.

### 6.3 Modèle d'agent DIABET

Nous proposons, avant de détailler le modèle d'un agent DIABET, de rappeler le contexte de son fonctionnement.

#### 6.3.1 Scénario prévu

Un utilisateur final ayant observé le déroulement de l'algorithme QSIM sur un phénomène physique particulier, l'étude de la trajectoire d'une balle lancée en l'air<sup>1</sup>, et désireux d'en avoir de plus amples informations, sollicite le système DIABET dont il a appris les capacités explicatives en lui adressant une première requête, en langage naturel. Nous envisageons cette dernière de deux types selon son contenu:

<sup>1</sup> Exemple déjà décrit au niveau du chapitre 2 de ce manuscrit.

- Elle peut porter sur l'arbre des comportements fourni par le simulateur qualitatif, représenté par une table des transitions d'états qualitatifs, semblable à celle de la figure 5.1 du chapitre précédent, si l'utilisateur est initié en simulation qualitative. Elle serait alors du type: « Pourquoi tel état qualitatif apparaît-il après tel nombre de transitions? »
- Elle peut être du type : « Pourquoi la balle change-t-elle de trajectoire à un certain moment? », pour un utilisateur novice en simulation qualitative.

C'est l'agent *Anque* qui initie alors le processus explicatif à la réception de cette requête dont il est chargé de vérifier la validité syntaxique et sémantique. Il détectera ensuite l'interrogation qu'elle porte en identifiant l'adverbe interrogatif ou interro-négatif utilisé, et les connaissances sollicitées. Il passera alors la main aux agents concernés pour:

- d'une part, la confirmation de l'interrogation détectée, où il aura à choisir entre les agents *Whow-key* et *Whot-key*,
- et d'une autre part, l'extraction des connaissances nécessaires à la production du texte explicatif, où il optera pour l'un des agents suivants: *Whow-know-C*, *Whow-know-D* et *Whow-know-CC* ou *Whot-know-C*, *Whot-know-D* et *Whot-know-CC*.

L'interrogation confirmée et les connaissances sollicitées extraites, l'agent *Conex* est alors chargé de construire le texte explicatif qu'il transmettra à l'agent *Genex* chargé de sa génération en langage naturel et sa transmission à l'utilisateur final.

Ce dernier pourrait s'en contenter et le processus explicatif est alors interrompu ou la juger non satisfaisante, et initie un dialogue avec le système en le sollicitant à nouveau par ce que nous avons convenu d'appeler une intervention. L'agent *Anque*, destinataire de cette dernière, agira alors selon la nature de cette intervention. Ainsi, il relancera le processus explicatif tel que décrit précédemment s'il s'agit d'une requête, ou mettra à jour les connaissances explicatives avant de reprendre le processus explicatif dans le cas contraire.

### ***6.3.2 Architecture d'un agent DIABET***

Un agent DIABET est un composant logiciel capable d'interagir à un haut niveau sémantique avec d'autres agents (logiciels ou humains). Pour cela, il doit être capable de se représenter son fonctionnement et de raisonner dessus pour recevoir des requêtes, chercher des connaissances, construire et générer des explications en participant à des dialogues explicatifs. Un agent DIABET est, en outre, un agent coopératif, capable de raisonner sur ses propres compétences et sur les compétences des autres agents en vue de produire l'explication demandée par l'utilisateur et qu'aucun agent n'est capable de produire individuellement.

Pour prendre en compte les processus cognitifs mis en œuvre lors des différentes activités explicatives d'un agent DIABET, nous proposons une architecture d'agent dialogique modulaire comprenant quatre composants essentiels : le composant linguistique, le composant dialogique, le composant cognitif et le composant de communication, comme représenté dans la figure suivante.

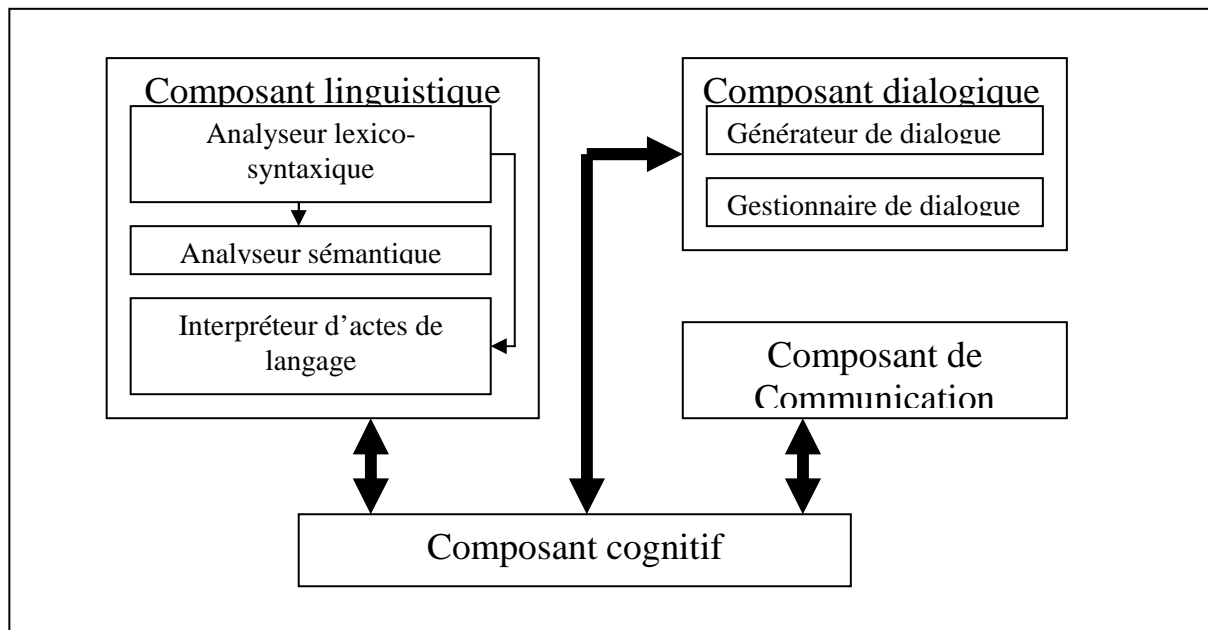


Figure 6.2: Modèle d'agent DIABET

### 6.3.2.1 Composant linguistique

Le composant linguistique reçoit la requête explicative de l'utilisateur sous la forme d'un énoncé en langage naturel sur lequel il effectue alors:

- une analyse lexico-syntaxique décomposant l'énoncé en données lexicales utilisées pour l'analyse sémantique et la conversion en actes de langages. Cette analyse est effectuée par le premier sous-composant linguistique, l'analyseur lexico-syntaxique,
- une analyse sémantique qui distingue une requête d'une information en provenance de l'utilisateur, et reconnaît alors essentiellement les adverbes interrogatifs ou interro-négatifs utilisés et/ou les domaines de connaissances abordés. Cette analyse est à la charge du deuxième sous-composant linguistique, l'analyseur sémantique,
- une conversion en actes de langage qui repose sur les données lexicales résultant de l'analyse lexico-syntaxique, conduite par un interpréteur d'actes de langage, le troisième sous-composant linguistique.

### 6.3.2.2 Composant dialogique

Le composant dialogique comprend:

- un générateur de dialogues qui permet de produire des énoncés explicatifs présentés à l'utilisateur,
- un gestionnaire du dialogue qui gère un historique des interactions échangées entre l'utilisateur et le système et prend en charge les échanges avec l'utilisateur. Cette prise en charge consiste notamment à:
  - dégager les mots clés dans l'information fournie par l'utilisateur, pour extraire les nouvelles connaissances qu'ils engendrent et qui serviront à mettre à jour la base de connaissances explicatives,
  - interrompre un échange infructueux.

### 6.3.2.3 Composant cognitif

Le composant cognitif de l'agent DIABET est d'abord son preneur de décisions. Il décide notamment de l'action à exécuter selon ses compétences, représentées dans une base de connaissances explicatives, et les objectifs qui lui sont assignés et dont il conserve une image en mémoire, une structure de données commune, sorte de tableau noir, partagée par les quatre composants. Il permet particulièrement d'extraire les connaissances nécessaires à la production du texte explicatif ou à sa génération sous sa forme finale. En plus, il veille sur l'intégrité de la base de connaissances explicatives qu'il met à jour suite à une information fournie par l'utilisateur au cours du dialogue explicatif, en décelant d'éventuelles contradictions.

C'est aussi son percepteur qui l'informe sur l'état de son environnement immédiat représenté par les autres agents avec qui il coopère pour la production du texte explicatif.

### 6.3.2.4 Composant de communication

Le composant de communication de l'agent DIABET est chargé de la communication inter-agents, qui coexiste dans DIABET avec la communication intra-agents prise en charge au niveau de chaque composant.

## 6.4 Communication Inter-agents

Une communication inter-agents, à chaque étape du processus explicatif, est incontournable. Il s'agit d'une communication sélective dans ce sens qu'un agent confie une tâche à l'agent ayant les compétences pour l'exécuter. Cette communication prend la forme d'une interaction dialogique pouvant consister en une suite de requêtes dialogiques formulées en actes de langage. Deux types de requêtes dialogiques peuvent être utilisés:

- la requête *Ask* pour confier l'exécution d'une tâche à l'agent compétent,
- la requête *Inform* pour informer un agent des nouvelles connaissances transmises par l'utilisateur.

L'agent destinataire de la requête y réagit:

- en effectuant l'action appropriée, qui devrait se dérouler en deux étapes à savoir d'abord identifier la connaissance sollicitée puis y accéder, s'il s'agit d'une requête pour l'exécution d'une tâche. Il provoquera alors la poursuite de l'interaction en transmettant à son tour la requête appropriée à l'agent compétent,
- ou alors en mettant à jour ses connaissances si la requête consistait en une information.

Nous présentons dans ce paragraphe les scénarios prototypes d'interaction agent/agent, que nous ferons suivre d'une description de cette interaction à travers quelques exemples en KQML.



### 6.4.1 Scénario prototype

La conversation, à ce niveau est supposée consister en une interaction et sa réponse. Nous utilisons la notation MSC<sup>1</sup> (Message Sequence Charts), pour schématiser une conversation telle que prévue dans le scénario de fonctionnement décrit plus haut. Nous obtenons le diagramme suivant:

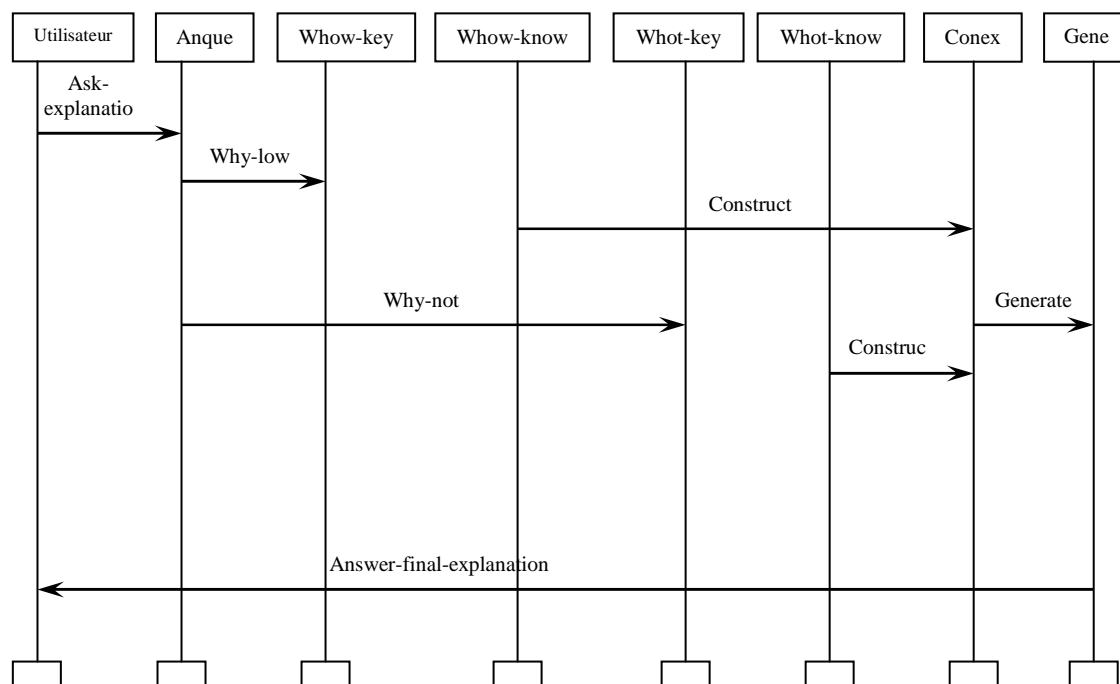


Figure 6.3 Diagramme de cas d'utilisation interne pour une interaction et sa réponse

L'interaction et sa réponse sont représentées par des flèches exprimant chacune la requête transmise. Ainsi, la requête explicative de l'utilisateur est transmise à l'agent *Anque*, qui envoie alors une requête dialogique à l'un des agents *Whow-key* ou *Whot-key* pour confirmer le contenu de la requête explicative, et une requête dialogique à l'un des agents *Whow-know* ou *Whot-know* pour extraire les connaissances sollicitées. Celles-ci sont alors transmises par voie de requête

<sup>1</sup> Les MSC sont utilisés pour la visualisation d'interactions entre les composants d'un système. Ils fournissent une description intuitive de la communication dans un système sous forme de flots de messages. Le langage des MSC a été originellement standardisé en 1993 par L'ITU-T (International Telecommunication Union, secteur des télécommunications).

dialogique à l'agent *Conex*, qui construit le texte explicatif qu'il envoie par voie de requête dialogique à l'agent *Genex* qui se chargera de répondre à l'utilisateur.

### 6.4.2 Description de l'interaction

Nous décrivons finalement chaque interaction échangée en utilisant le langage KQML :

#### 1. description de l'interaction entre les agents *Anque* et *Whow-key*

L'agent *Anque* transmet le performatif identifié par *id00* à l'agent *Whow-key*:

```
(standby
:sender      : Anque
:receiver    : Whow-key
:reply-with  id01
:language   :    internal form
:ontology    : internal form ontology
:content     ( ask-one
               :sender          : Anque
               :receiver       : Whow-key
               :in-reply-to    : not used
               :reply-with     :    not used
               :language       : internal form
               :ontology       : internal form ontology
               :content        : user question ) )
```

L'agent *Whow-key* répond en transmettant le performatif suivant, identifié par *id01*:

```
(ready
:sender      : Whow-key
:receiver    : Anque
:in-reply-to : id00
reply-with  : id01)
```

#### 2. Description de l'interaction entre les agents *Whow-know* et *Conex*

L'agent *Whow-know* transmet le performatif suivant, identifié par *id02*, à l'agent *Conex*:

```
(standby
:sender      : Whow-know
:receiver    : Conex
:reply-with  : id03)
```

```

:language : KQML
:ontology : KQML ontology
:content : ( ask-one
            :sender      : Conex
            :receiver    : Whow-know
:          :in-reply-to : not used
            :reply-with  : not used
            :language    : KQML
            :ontology    : KQML ontology
            :content     : Final explanation ) )

```

L'agent *Genex* répond alors en transmettant le performatif suivant identifié par id03:

```

(ready
 :sender : Genex
 :receiver : Conex
 :in-reply-to : id02
 :reply-with : id03 )

```

### 3. Description de l'interaction entre les agents *Conex* et *Genex*

L'agent *Conex* transmet le performatif suivant, identifié par id04, à l'agent *Genex*:

```

(standby
 :sender      : Conex
 :receiver    : Genex
 :reply-with  : id05
 :language    : KQML
 :ontology    : KQML ontology
 :content     : ( ask-one
                  :sender      : Conex
                  :receiver    : Genex
:                :in-reply-to : not used
                  :reply-with  : not used
                  :language    : KQML
                  :ontology    : KQML ontology
                  :content     : Final explanation ) )

```

L'agent *Genex* répond alors en transmettant le performatif suivant identifié par id05:

```
(ready
  :sender : Genex
  :receiver : Conex
  :in-reply-to : id04
  :reply-with : id05 )
```

## 6.5 Communication Intra-agents

La communication intra-agents consiste pour les quatre composants d'un agent DIABET à échanger des messages de synchronisation en utilisant des primitives de communication intra-agents, comme le schématise la figure suivante:

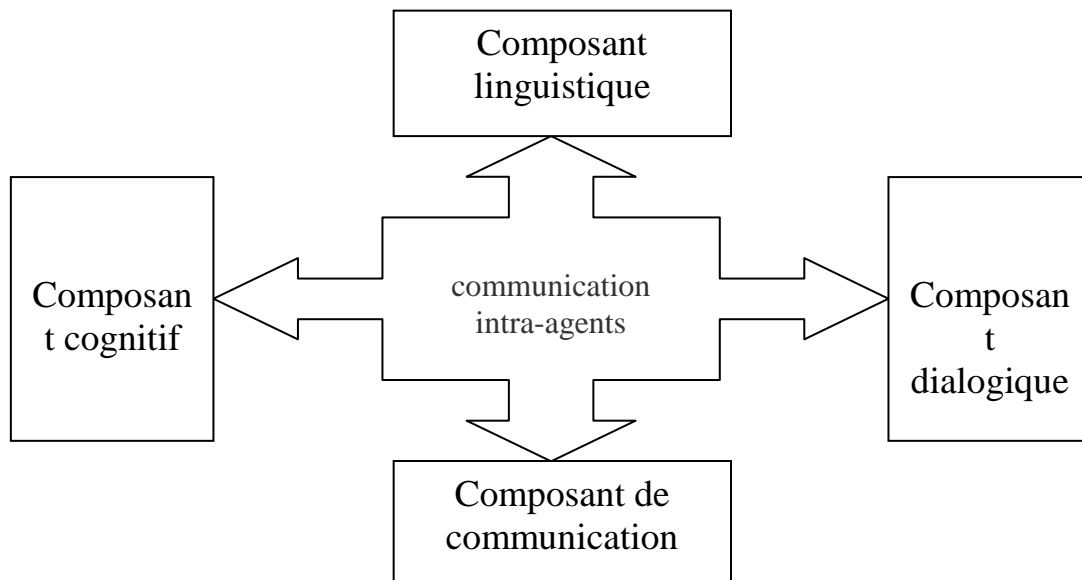


Figure 6.4: Schéma de communication intra-agents

## 6.6 Communication utilisateur-agents

La communication entre l'utilisateur et les agents DIABET s'effectue comme une interaction dialogique globale à base de requêtes dialogiques. L'utilisateur formule son intervention en langage naturel, que l'agent DIABET *Anque* convertit en requête dialogique exprimée en acte de langage et transmet à l'agent DIABET compétent pour la traiter. A la fin de ce traitement, l'agent DIABET *Genex* transmet la réponse, l'explication attendue par l'utilisateur en l'occurrence, à ce dernier, en langage naturel. Notons que la conversion langage

---

naturel-acte de langage, dans les deux sens, est à la charge de l'interpréteur d'actes de langage, un sous-composant linguistique de l'agent DIABET.

Nous venons ainsi de détailler, dans ce chapitre, l'architecture de l'outil DIABET et les mécanismes de communication entre ses agents d'une part, et avec l'utilisateur final d'une autre part. Nous estimons complètes nos réponses aux interrogations que nous nous sommes posés au début de ce manuscrit, et jugeons conçu l'outil explicatif DIABET, un système multi-agents dialogiques, capable de coopérer avec un utilisateur humain, novice ou confirmé, pour produire des explications concernant le déroulement du plus populaire des algorithmes de simulation qualitative, l'algorithme QSIM.

## Chapitre 7

# Bilan et Perspectives

*"Ce qu'on n'a jamais mis en question  
n'a point été prouvé."*

Denis Diderot

Voici donc venue l'heure du bilan. Enfin, dirions-nous! En effet, et bien que ce soit aussi l'heure de nous rendre à l'évidence et affronter les limites de notre travail, encore perfectible - n'est-ce pas un travail de recherche - c'est quand même l'heure de nous dire qu'il ne nous reste à rédiger que quelques pages...peut-être une ou deux, ou même trois, mais pas plus que quatre! En fait, juste ce qu'il faut pour rappeler notre contribution dans cette thèse, compter les imperfections et les perspectives de les combler et enfin conclure.

### 7.1 Contribution

La production d'explications sur les résultats de la simulation qualitative, en coopération entre le système explicatif et l'utilisateur auquel une explication est destinée, est la principale contribution de cette thèse.

Nous avons mené notre thèse, dans toutes ses étapes, avec une progression - sans cesse mise à épreuve à travers nos publications dans les actes de conférences et workshops internationaux plus ou moins spécialisés et une revue non moins internationale, que nous avons joint à la liste des références bibliographiques à la fin de ce manuscrit- qui nous a permis de mettre en place un système à base d'agents doté de capacités d'explication et de dialogue, mises au profit d'un domaine qui, était plutôt sollicité pour ...expliquer d'autres phénomènes! La simulation qualitative, source d'explication par excellence, est maintenant expliquée pour ses utilisateurs dans les conditions souhaitées par ces derniers. Ses résultats n'en sont que plus performants.

Revenons, pour mieux mettre en valeur cette contribution, sur l'histoire de notre thèse, dont deux petits mots étaient à l'origine : Raisonnement et Qualitatif.

Il y a bientôt une huitaine d'années -n'est-ce pas que cette thèse a assez duré- nous connaissions le premier mot (raisonnement) et un certain thème de recherche dit « raisonnement dans les systèmes à base de connaissances ». D'ailleurs, nous achevions un mémoire de magister sur ce thème, durant la rédaction duquel nous croyions avoir tout connu sur le raisonnement, mais voilà que nous découvrons le deuxième (qualitatif) qui, s'avérait-il, qualifiait aussi un type de raisonnement! Aussi pensions-nous l'explorer et pourquoi pas l'expliquer!

C'était le début avec cette thèse! Les premières lectures, qui en ont appelé tant d'autres, vu la pluridisciplinarité de notre thèse, étaient déjà bien bénéfiques. Une première idée germait: intégrer, en simulation, un module explicatif tel que nous l'avions connu dans le domaine des systèmes à bases de connaissances. Elle était déjà bien accueillie parmi les « gens du domaine » [Laraba 99].

Cependant, le vrai départ de cette thèse était l'acceptation de l'idée, d'expliquer les résultats d'un algorithme de simulation qualitative, QSIM en l'occurrence, parmi la communauté du raisonnement qualitatif réunie annuellement en workshop[Laraba et al 02b]. C'était pour nous une sorte de « certificat de faisabilité » qui constituait un vrai coup de pouce pour cette thèse. La faisabilité validée, nous avons fait nôtres un certain nombre de préoccupations, et avons œuvré à y répondre les unes après les autres. Ainsi, avons-nous destiné notre système explicatif à tout utilisateur humain, novice ou confirmé en simulation qualitative qui, ayant observé le déroulement de l'algorithme QSIM sur un phénomène précis<sup>1</sup>, pouvait demander des explications sur les résultats obtenus et visualisés à travers l'arbre des comportements.

Notre option ayant toujours été pour un processus explicatif contextuel mené en coopération entre le système explicatif et l'utilisateur final, nous devons mettre en place, pour notre système explicatif, l'architecture la mieux adaptée. L'étude, d'une part, du raisonnement explicatif avec les tâches explicatives

---

<sup>1</sup> Nous avons choisi l'exemple de la trajectoire d'une balle lancée en l'air connu dans la littérature.

dégagées et leurs caractéristiques mises en évidence, et, d'une autre part, des connaissances nécessaires au déroulement de ce raisonnement, a abouti à l'architecture à base d'agents dialogiques dont nous avons détaillé, pour chaque agent, les possibilités de raisonnement et les mécanismes de communication avec les autres agents, et l'interaction mise en place avec l'utilisateur final depuis la production de la première réponse explicative jusqu'à la génération de l'explication finale.

## 7.2 Limites et perspectives

Nous reconnaissons un déséquilibre entre l'apport théorique et la contribution pratique de notre thèse. Ce déséquilibre est d'autant plus sensible que notre thèse a abordé des techniques issues de différents champs disciplinaires, insistant plus sur certains, le raisonnement qualitatif, l'explication et les systèmes multi-agents, que sur d'autres, l'interaction Homme-Machine ou la communication directe en langage naturel.

On ne manquera particulièrement pas de nous reprocher une carence implémentatoire. Nous le concédons volontiers, et soulignons que « *ce qui importe, ce n'est pas d'arriver, mais d'aller vers* »<sup>1</sup>. Nous estimons, d'ailleurs, que les essais, certes souvent timides -en l'occurrence des travaux menés par des étudiants de fin de cycle de graduation sous notre direction- [Djerida et al 04] [Benchiheb et al 04] [Barabi et al 05] [Ghilassi et al 05] sont une preuve que même si la bâtisse n'est pas encore finie, nous avons bien dépassé le cap du tas de pierres, et qu'un DIABET qui explique, en dialoguant avec un utilisateur humain n'est pas une simple illusion, mais une réelle perspective.

Nous pensons, à cet effet, que cela devrait passer par une bonne expérimentation de ce que pourrait être une communication directe en langue naturelle. L'étude et l'analyse d'un corpus de dialogue explicatif, dont la construction permettrait

---

<sup>1</sup> Antoine de Saint-Exupéry



de dégager des éventuelles requêtes vagues d'un utilisateur humain, ou des explications du système probablement mal interprétées, sont alors envisageables.

### **7.3 Conclusion**

La finalité de la recherche que nous avons engagée dans le cadre de cette thèse a consisté à améliorer la compréhension des résultats de la simulation qualitative par un utilisateur final. Nous avons alors fait plusieurs choix que nous avons recensés en rappelant notre contribution mais des questions demeurent suspendues.

Le travail de longue haleine, que nous avons mené dans le cadre de cette thèse de doctorat, arrive alors à son terme, grâce au bon dieu dans son ciel, qu'il en soit loué, à certains de ses serviteurs sur terre, nous leur réitérons l'expression de toute notre reconnaissance, mais aussi aux efforts que nous n'avons pas manqué de déployer surtout par certains moments où, bien que nous ne disposions que d'un marteau, nous ne sommes jamais contents de faire en sorte que notre recherche ait une apparence d'un clou.

## Références Bibliographiques

- [Austin 62]Austin, J-L. 1962. *How to do things with words*, Oxford university press. Traduction française: *Quand Dire, C'est Faire*. Points. Seuil.
- [Abul Hossain et al 97]Abul Hossain, Ray, Kumar S. 1997. *An extension of Qsim with qualitative curvature*, Artificial Intelligence 96, pp303-350.
- [Alexis et al 96]Alexis-Girault, K., Palies, O., Safar, B. 1996. *Modèles de résolution et d'explication au bridge*, Rapport interne LAFORIA.
- [Alliot et al 02]Alliot, J.M., Shiex, T. 2002. *Intelligence Artificielle et Informatique Théorique*, Deuxième Edition, Editions Cépadues, ISBN: 2-85428-578-6.
- [André et al 98]André, E., Rist, T., Müller., J. 1998. *Webpersona: A lifelike presentation agent for the world-wide web*. Knowledge-based Systems 11(1):25–36.
- [André et al 00]André, E., Rist, S., van Mulken, T., Klesen, M., Baldes. S. 2000. *The automated design of believable dialogues for animated presentation teams*. In S. Prevost J. Cassell, J. Sullivan and E. Churchill, editors, Embodied Conversational Characters. MIT press, Cambridge, MA.
- [Balacheff et al 96]Balacheff, N., Soury-Lavergne, S. 1996. *Explication et Préceptorat, à propos d'une étude de cas dans TéléCabri*, In Baron M. (ed.) Explication et EIAO Rap. LAFORIA 96/33,37-50. Paris: Université Blaise Pascal.
- [Barabi et al 05]Barabi K., Boudemagh, A., Bourebouna, K. 2005. *Un composant dialogique pour l'interaction dialogique, Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en informatique, Département d'informatique, Université Mentouri de Constantine*.
- [Benchiheub et al 04]Benchiheub H., Talbi H. 2004. *Communication d'agents explicatifs pour la simulation qualitative*. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en informatique, Département d'informatique, Université Mentouri de Constantine.
- [Bisognin et al 04]Bisognin, L. Pesty, S. 2004. *Prototype d'agent émotionnel pour le dialogue*, Journées Francophones sur les Systèmes Mutli-Agents, Paris, France.

[**Bouchet 06**]Bouchet, F. 2006. *Conception d'un langage de requêtes pour un agent conversationnel assistant*, Rapport M2R Informatique, Université de Paris XI.

[**Boufaïda 95**]Boufaïda, M. 1995. *Méthodes et outils pour la génération d'interfaces, la conduite du dialogue pédagogique et la mise e oeuvre du diagnostic*. Thèse de doctorat d'état de l'université Mentouri. de Constantine, Constantine.

[**Bourcier et al 94**]Bourcier, F., Gréboval, M.H., Kassel, G., Trigano P. 1994. *Construction d'une explication et génération en langage naturel: une étude de cas*, Actes de RFIA'94, 9ème congrès de Reconnaissance des formes et Intelligence Artificielle.

[**Boutouhami et al 06**]Boutouhami, S., Mokhtari, A. 2006. *Possibilistic Explanation*. International Journal of Computer Science and Applications, Vol 3, No 2, pp 57-73, ISSN: 0972-9038.

[**Bouwer et al 99**]Bouwer, A., Bredeweg, B. 1999. *Explanation and Qualitative Reasoning*, In Price, C. (ed.), Proc. of QR'99 Int. Workshop on Qualitative Reasoning, Loch Awe, Scotland, June 6-9 1999, pp. 27-31.

[**Bouwer 05**]Bouwer, A. 2005 *Explaining Behaviour – Using Qualitative Simulation in Interactive Learning Environments*, thèse de Ph.D., Université d'Amsterdam, Amsterdam, Hollande.

[**Brajnik & al 97**]Brajnik, G., Lines, M. 1998. *Qualitative modeling and simulation of socio-economic phenomena*, Journal of Artificial Societies and Social Simulation vol. 1, no. 1.

[**Bredeweg 92**]Bredeweg, B. 1992. *Expertise in Qualitative Prediction of Behaviour*, Thèse de PhD de l'université d'Amsterdam, Amsterdam, Hollande.

[**Brézillon 92a**]Brézillon, P. 1992. *Users intervention in cooperative explanation*, AARI'92 Workshop on Explanation.

[**Brézillon 92b**]Brézillon, P. 1992. *Architectural and contextual factors in explanation construction*, ECAI-92 Workshop on Explanation, Austria.

[**Brézillon 93**]Brézillon, P. 1993. *Explication et contexte*, Journée d'étude Explication et Coopération homme-machine, CNAM, Paris.

[Brézillon et al 94]Brézillon, P. 1994. *Context needs in cooperative building of explanations*, Rapport interne, LAFORIA.

[Brézillon et al 95a]Brézillon, P., Abu Hakima, S. 1995. *Using knowledge in its context*, IJCAI93 Workshop , LAFORIA.

[Brézillon et al 95b]Brézillon, P. Karsenty, K. 1995. *Cooperative problem solving and explanation*, Intrenational journées Expert Systems with Applications.

[Brooks 91]Brooks. R. A. 1991. *Intelligence without reasoning*, Proceedings of the Twelfth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-91), pp.569-595.

[Buchanan et al 84]Buchanan BG, Shortliffe EH. 1984. *Rule based expert systems: The MYCIN experiments of the Stanford Heuristic Programming Project*, Addison-Wesley, Reading, MA.

[Buisine 05]Buisine, S. 2005. *Conception et Evaluation d'Agents Conversationnels Multimodaux Bidirectionnels*, Thèse de doctorat de l'Université Paris 5.

[Buisine et al 06]Buisine, S., Abrilian, S., Niewiadomski, R., Martin, J.-C., Devillers L. , Pelachaud, C. 2006. *Perception of blended emotions : From video corpus to expressive agent*. In J. Gratch, M. Young, R. Aylett, D. Ballin et P. Olivier, eds : Proceedings of IVA 2006, vol. 4133 de Lecture Notes in Computer Science, pp. 93-106. Springer.

[Caroll 02]Caroll, J.M. 2002. *Human-Computer Interaction in the New Millennium*, Addison-Wesley, ISBN: 0-201-70447-1.

[Cawsey 91]Cawsey, A. 1991. *Generating interactive explanations*. In Proceedings of the ninth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-91), 86–91.

[Coen 94]Coen, M. 1994. *SodaBot: A Software Agent Environment and Construction Syste*, MIT AI Lab Technical Report 1493.

[Chicoisne 02]Chicoisne, G. 2002. *Dialogue entre Agents Naturels et Agents Artificiels*, Thèse de doctorat de l'INPG, Grenoble.

[Chaib-draa et al, 01]Chaib-draa, B., Jerras, I., Moulin, B. 2001. *Systèmes Multi-agents : Principes Généraux et Applications*, Paris : Jean-Pierrs Briot et Yves Demazeau, eds, Hermès.

[**Chandrasekaran et al 89**]Chandrasekaran B, Tanner MC, Josephson, JR. 1989. *Explaining control strategies in problem solving*, IEEE Expert, 4(1), 9–24.

[**Clancy et al 97a**]Clancy, D.J., Brajnik, G., Kay, H. 1997. *Model Revision: Techniques and Tools for Analyzing Simulation Results and Revising Models*, QR-97, 53-66.

[**Clancy et al 97b**]Clancy, D.J., Kuipers, B. 1997. *Dynamic Chatter Abstraction: A Scalable Technique for Avoiding Irrelevant Distinctions During Qualitative Simulation*, QR-97 Workshop.

[**D'Ambrosio 87**]D'Ambrosio, B. 1987. *Extending the mathematics in qualitative process theory*. In Proceedings of the National Conference of the American Association for Artificial Intelligence, pages 595-599.

[**Dague et al 04a**]Dague, P., Travé-Massuyès, L., 2004. *Raisonnement causal en physique qualitative*, Rapport LAAS 04332.

[**Dague et al 04b**]Dague, P., Kayser, D., Levy, F., Nazarenko, A., 2004. *Raisonnement causal*, Revue Intellectica, 1(38), pp 7-14.

[**Dauphin-Tanguy 00**]Dauphin-Tanguy, G. 2000. *Les bond graphs*, Traité IC2, Hermès.

[**De Coste 91**]De Coste, D., 1991. *Dynamic Across-Time Measurement Interpretation*. Artificial Intelligence, 51. pp 273-341.

[**De Kleer 77**]De Kleer, J. 1977. *Multiple representations of knowledge in a mechanics problem solver*, In Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence, pages 299-304.

[**De Kleer 79**]De Kleer, J. 1979. *Qualitative and quantitative reasoning in classical mechanics*. In P H Winston and R H Brown, editors, *Artificial Intelligence: An MIT Perspective*. MIT Press.

[**De Kleer et al 84**]De Kleer, J, Brown, J.S, 1984. *A qualitative physics based on confluences*. Artificial Intelligence, 24, pp 1-3.

[**Demazeau 97**]Demazeau, Y. 1997. *Steps Toward Multi-Agent Programming*, Proceedings of International Workshop on Multi-Agent Systems.

- [Demazeau et al 90] Demazeau, Y., Müller J.-P., 1990. *Decentralized A.I.* Proceedings of the First European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World (MAAMAW' 89), North-Holland.
- [Demazeau et al 91] Demazeau, Y., Müller J.-P., 1991. *Decentralized A.I.2*, Proceedings of the Second European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World (MAAMAW' 90), North-Holland.
- [Djerida et al 04] Djerida H., Friekh D., Kaouane M. 2004. *Un système multi-agents pour l'explication d'un algorithme de simulation qualitative: conception et réalisation*, Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en informatique, Département d'informatique, Université Mentouri de Constantine.
- [Dubois et al 03] Dubois, D., Prade, H. 2003. *Liens causaux et explications. Problèmes de modélisation: une discussion préliminaire*, Journées Nationales sur les Modèles de Raisonnement JNMR'03, Paris.
- [Duong 05] Duong, M.H., 2005. *Sur « Qualitative Reasoning de B.Kuipers »*, In site web du CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement), Rubrique « critique ».
- [Drabble 93] Drabble, B., 1993. *Excalibur: A Program for Planning and Reasoning with Processes*. Artificial Intelligence, 62(1), pp 1-40.
- [Drogoul 05] Drogoul, A. 2005. *Systèmes multi-agents*, In *L'intelligence*, Hermès, Paris, France.
- [Ferber 95] Ferber, J., 1995. *Les Systèmes Multi-Agents : Vers une intelligence collective*, InterEdition.
- [Ferber 05] Ferber, J., 2005. *Introduction aux systèmes multi-agents: un point de vue intégral*, Cours du LIRMM, Université Montpellier II.
- [Finin et al 94] Finin, T., Weber, J., Wiederhold, G., Genesereth, M., Fritzson, R., Mc-Guire, J., Shapiro S., Beck, C.. 1994. *Specification of the KQML Agent Communication Language*. Rapport technique, DARPA Knowledge Sharing Initiative, External Interface Working Group.
- [FIPA 97a] FIPA. 1997. *Agent Management*. Rapport technique OC00003, FIPA [www.fipa.org/specs/fipa00023/SC00023.pdf](http://www.fipa.org/specs/fipa00023/SC00023.pdf).
- [FIPA 97b] FIPA. 1997. *Agent Communication Language*. Rapport technique OC00003, FIPA [www.fipa.org/specs/fipa00003/OC00003.pdf](http://www.fipa.org/specs/fipa00003/OC00003.pdf).

[**Falkenhainer et al 90**]Falkenhainer, B., Forbus, K. 1990. *Self-explanatory simulation, An integration of qualitative and quantitative knowledge*, AAAI-90, 380-387.

[**Falkenhainer et al 92**]Falkenhainer, B., Forbus, K. 1992. *Self-explanatory simulation, Scaling up to large models*, AAAI-92, 685-690.

[**Forbus 84**]Forbus, K. 1984. *Qualitative process theory*, Artificial intelligence, 24, pp 85-168.

[**Forbus 89**]Forbus, K. 1989. *Introducing Actions into Qualitative Simulation*. Proceedings of IJCAI-89. pp1273-1278.

[**Forbus 96**]Forbus, K. 1996. *Qualitative Reasoning*, CRC Handbook of Computer Science and Engineering.

[**Forbus 04**]Forbus, K. 2004. *Jitter in Self-Explanatory Simulation*, 18th International Workshop on Qualitative Reasoning, August 2-4, 2004, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA pp 195 – 202.

[**Forbus et al 05**]Forbus, K., Kuehne Sven E. 2005. *Towards a Qualitative Model of Everyday Political Reasoning*, 19th International Workshop on Qualitative Reasoning, July 18-20, 2005, Graz, Autriche.

[**Franklin 96**]Franklin, S. 1996. *Artificial Minds*, Cambridge, MA: MIT Press.

[**Gautier et al 93a**]Gautier, P.O., Gruber, T.R. 1993. *Generating Explanations of Device Behavior Using Compositional Modeling and Causal Ordering*, AAAI-93, 264-270.

[**Gautier et al 93b**]Gautier, P.O., Gruber, T.R. 1993. *Machine-Generated Explanation of Engineering Models: A compositional Modeling Approach*, IJCAI-93, 1502-1508.

[**Ghilassi et al 05**]Ghilassi A., Kemidi, H., 2005. *Un médiateur pour l'interaction dialogique*, Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en informatique, Département d'informatique, Université Mentouri de Constantine.

[**Groupe  $\lambda$ -1 75**]Groupe  $\lambda$ -1, 1975. *Car, parce que, puisque*. Revue Romane, 10(2), pp. 248-280.

[**Hachette 01**]Hachette 2001. *Dictionnaire encyclopédique*, Edition 2001.

- [Halpern et al 0] Halpern, J.Y., Pearl, J. 2001. *Causes and Explanations: “A Structural-model Approach”*. PartI: Causes, in: Proceedings of the Seventeenth Conference in Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-01), Seattle, WA, pp. 194–202,
- [Hartley et al 06]Hartley, S., Cavazza, M. 2006. *A Qualitative Reasoning System for Behaviours in Interactive Systems*, 20th International Workshop on Qualitative Reasoning, July 10-12, 2006, Hanover, New Hampshire, USA.
- [Hayes 78]Hayes, P. J. 1978 *The naive physics manifesto*,In D. Michie, editor, *Expert Systems in the Micro-Electronic Age*. Edinburgh University Press.
- [Hogge 87]Hogge, J.C., 1987. *Compiling Plan Operators from Domains Expressed in Qualitative Process Theory*, Proceedings of IJCAI-87. pp 229-233.
- [Iwasaki 88]Iwasaki, Y., 1988. *Causal ordering in a mixed structure*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> National Conference on Artificial intelligence AAAI-88, Saint Paul, Minnesota, pp313-318.
- [Iwasaki et al 86a]Iwasaki, Y., Simon, H., 1986. *Causality in device behavior*. Artificial Intelligence 29, pp 3-32.
- [Iwasaki et al 86b]Iwasaki, Y., Simon, H., 1986. *Theories of causal ordering; reply to de Kleer and Brown*, Artificial Intelligence 29, pp 63-68.
- [Iwasaki et al 94]Iwasaki, Y., Simon, H., 1994. *Causality and model abstraction*, Artificial Intelligence 67, pp 143-194.
- [Jars 02]Jars, I. 2002. *Contribution des sciences sociales dans le domaine de l’intelligence artificielle distribuée: ALONE, un modèle hybride d’agent apprenant*, thèse de doctorat de l’université Claude Bernard Lyon 1.
- [Jamont 05]Jamont, J.P. 2005. *DIAMOND: Une Approche pour La Conception de Systèmes Multi-agents Embarqués*, Thèse de doctorat de l’INPG, Grenoble.
- [Jimenez 92]Jimenez, C.D. 1992. *L’explicitation des connaissances de contrôle et de stratégie en vue de l’explication*, Rapport de recherche, LAFORIA.



[**Jones 97**]Jones., Q. 1997. *Virtual-Communities, Virtual-Settlements & Cyber-Archaeology : A Theoretical Outline*. Journal of Computer Mediated Communication, tome 3, no 3.

[**Karsenty et al 96**]Karsenty, L., 1996. *Une définition psychologique de l'explication*, Intellectica, 1996/2, 23, pp. 327-345.

[**Kayser et al 98**]Kayser, D., Mokhtari, A. 1998. *Time in a causal theory*. AMAI. Journal, Vol 22, pp 117-138.

[**Khan et al 97**]Khan, T. M., Brown, K. E, Leitch, R. R. 1997. *Didactic and informational explanation in simulations with multiple models*. In Artificial Intelligence in Education: Knowledge and Media in Learning Systems. Proceedings of AI-ED 97 World Conference on Artificial Intelligence in Education, 355–362.

[**King et al 03**]King, S.A., Knott, A. McCane., B. 2003. *Language-driven nonverbal communication in a bilingual conversational agent*. Proceedings of CASA 2003, pp 17-22.

[**Kolski 01**]Kolski, C. 2001. *Analyse et conception de l'IHM, Interaction homme-machine pour les Systèmes d'Information*, Editions Hermès.

[**Kolski et al 04**]Kolski, C., Grislin-Le Strugeon, E., Adam, E., Mathieu, P. 2004. *Conception des systèmes multi-agents : pistes de réflexion en vue de futures coopérations entre ergonomes et informaticiens*, Actes de la conférence ERGO'IA 2004, Biarritz, France.

[**Kshirsagar et al 01**]Kshirsagar, S., Joslin, C., Lee, W., Magnenat-Thalmann., N. 2001. *Personalized face and speech communication over the internet*. Proceedings of IEEE Virtual Reality, pp 37–44, Tokyo, Japan.

[**Kuipers 86**]Kuipers, B.J. 1986. *Qualitative simulation*, Artificial Intelligence, 32, pp 289-338.

[**Kuipers 94**]Kuipers, B.J. 1994. *Qualitative reasoning: Modeling and simulation with incomplete knowledge*. Cambridge, Mass.: MIT Press.

[**Kuipers 97**]Kuipers, B.J. 1997. *Using qualitative reasoning*, IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications, vol. 12, no. 3, pp. 94-97.

[**Kuipers 01**]Kuipers, B.J. 2001. *Qualitative simulation*, In “Encyclopedia of Physical Science and Technology”, Troisième Edition, NY: Academic Press, p Thèse de doctorat de l’Université du Texas à Austin. pp 287-300.

[**Laraba 98**]Laraba, M.E.H. 1998. *Sur les explications dans les systèmes à bases de connaissances, le système COCONTEX*, Thèse de Magister, Département d’informatique, Université de Constantine.

[**Laraba 99**]Laraba, M.E.H. 1999. *SIMEX une architecture de tâches pour un simulateur explicatif*, dans les actes de la conférence MOSIM’99, Annecy, France.

[**Laraba et al 00**]Laraba, M.E.H., Sahnoun, Z. 2000. *An Approach for integrating reasoning in qualitative simulation*, dans les actes de la conférence européenne de simulation et modélisation ESM2000, Ghent, Belgique.

[**Laraba et al 02a**]Laraba, M.E.H., Sahnoun, Z. 2002. *Representing knowledge in an explanatory qualitative simulation environment*, dans les actes de la conférence européenne de simulation et modélisation ESM2002, Allemagne.

[**Laraba et al 02b**]Laraba, M.E.H., Sahnoun, Z. 2002. *Towards a framework for enhancing qualitative simulation with explanation*, dans les actes du workshop sur le raisonnement qualitatif QR 2002, Sitges, Espagne.

[**Laraba et al 04a**]Laraba, M.E.H., Sahnoun, Z. 2004. *A multi-agent system for explaining qualitative simulation*, dans les actes de la conférence ISIICT 2004, Amman, Jordanie.

[**Laraba et al 04b**]Laraba, M.E.H., Sahnoun, Z. 2004. *Explanatory dialogical agents for qualitative simulation*, dans les actes de la conférence ACIT 2004, Constantine, Algérie.

[**Laraba et al 06a**]Laraba, M.E.H., Sahnoun, Z. 2006. *Bricks in Designing a Dialogical Interaction-Based Explanation Tool for Qualitative Simulation*, dans les actes de la conférence Internationale de l’intelligence artificielle ICAI 2006, Las Vegas, USA.

[**Laraba et al 06b**]Laraba, M.E.H., Sahnoun, Z. 2006. *A Dialogical Agent-based Framework for Explaining the Results of QSIM Algorithm to the End-User*, dans les actes du workshop sur le raisonnement qualitatif QR 2006, Hannover, USA, 2006.

[**Laraba et al 06c**]Laraba, M.E.H., Sahnoun, Z. 2006. *Towards Dialogical Human Computer Interaction: A Case Study in Qualitative Simulation*, Revue internationale Information Technology Journal, 5(5), pp792-802. ISSN 1812-5638.

[**Lemaire et al 92**]Lemaire, B., Safar, B. 1991. ESMERALDA : une architecture pour construire une explication par coopération de connaissances. Actes du Congrès " Les systèmes Experts et leurs applications ", pp 81-94, Avignon.

[**Maes 95**]Maes, P. 1995. *Artificial Life Meets Entertainment: Life like Autonomous Agents*, Communications ACM, 38, 11, pp 108-114.

[**Mallory 98**]Mallory, R.S. 1998. *Tools for explaining complex qualitative simulations*, Thèse de doctorat de l'Université du Texas à Austin.

[**Milne et al 93**]Milne, R., Travé-Massuyès, L., 1993. *Application oriented qualitative reasoning*, 7th International Workshop on Qualitative Reasoning, Orcas island, W.A, USA.

[**Minsky 85**]Minsky, M. 1985, *The Society of Mind*, New York: Simon and Schuster.

[**Moore 95**]Moore, J. D. 1995. *Participating in Explanatory Dialogues. Interpreting and Responding to Questions in Context*. Cambridge, Massachusetts / London, England: MIT Press.

[**Mokhtari 97**]Mokhtari, A. 1997. *Action-Based Causal Reasoning*, Applied Intelligence, The International Journal of Artificial Intelligence, Neural Networks, and Complex Problem-Solving Technologies. Volume 7, Number 2, pp 99-112.

[**Nomura 03**]Nomura, A. 2003. *On qualitative analysis of hybrid systems*, Thèse de master de l'Ecole des sciences de l'information du JAIST, Japon.

[**Palanque et al 95**]Palanque, P., Bastide, R. 1995. *Spécifications formelles pour l'ingénierie des interfaces Homme-Machine*, TSI, vol 14, n° 4, pp 473-500.

[**Paquette 02**]Paquette, G. 2002. *Modélisation des connaissances et des compétences*. Sainte-Foy (Quebec) : Presses de l'Université du Quebec.

[**Pelachaud et al, 04**]Pelachaud, C., Brafford, A., Breton, G., Ech Chafai, N., Gibet, S., Martin, J.C., Maubert, S., Ochs, M., Pelé D., Perrin, A., Raynal, M.,

Réveret, L., Sadek, D. 2004. *Agents Conversationnels: Systèmes d'animation. Modélisation des comportements multimodaux. Applications : agents pédagogiques et agents signeurs*, Rapport de l'Action Spécifique du CNRS Human Virtual, thème 4.

**[Pesty 06]**Pesty, S. 2006. *Agents Conversationnels et Langage de Conversation Expressif*, Ecole Dialogue et Interaction. Autrans.

**[Prendinger et al 04]**Prendinger, H., Ishizuka, M. 2004. *Life-Like Characters: Tools, Affective Functions, and Applications*, Springer.

**[Ricardo et al 06]**De Alcântara, Ricardo M. P., Da Nóbrega, Germana M., Salles, P. 2006, *Towards the Use of Qualitative Reasoning for Supporting Information Technology Management*, 20th International Workshop on Qualitative Reasoning, July 10-12, 2006, Hanover, New Hampshire, USA.

**[Rickel 95]**Rickel, J. 1995. *Automated Modeling of Complex Systems for Answering Prediction Questions*. PhD thesis, Dept CS, Univ Texas at Austin.

**[Ricordel 01]**Ricordel, P.M. 2001. *Programmation Orientée Multi-Agents : Développement et Déploiement de Systèmes Multi-Agents Voyelles*, Thèse de doctorat de l'INPG de Grenoble.

**[Rist et al, 03]**Rist, E., André, S., Baldes, T., Gebhard, P., Klesen, M., Kipp, M., Rist, P., Schmitt, M. 2003. *A Review of the Development of Embodied Presentation Agents and Their Application Fields. Life-Like Characters: Tools, Affective Functions, and Applications*. Prendinger H. and M. Ishizuka, Springer: pp 377-404.

**[Russell 97]**Russell, S.J. 1997. *Rationality and intelligence*, Artificial Intelligence, 94, pp.57-77.

**[Russel et al 95]**Russel, S.J., Norvig, P, 1995. *Artificial intelligence: a modern approach*, Les Séries Prentice-hall en IA.

**[Saadi 01]**Saadi, A. 2001. *Une approche pour le raisonnement sur les relations d'ordre de grandeur basée sur l'approximation linguistique*, Thèse de Magister de l'Université Mentouri de Constantine, Algérie.

**[Saadi et al 02]**Saadi, A., Sahnoun, Z. 2002. *A linguistic approximation approach for the order of magnitude reasoning*, International Conference on Machine learning and Applications ICMLA 2002, Las Vegas, Nevada, USA.

[**Saadi et al 06**]Saadi, A., Sahnoun, Z. 2006. *Towards intentional agents to manipulate Belief Desire and Commitment degrees*, ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications AICCSA 2006, Dubai, Sharjah.

[**Sabas 01**]Sabas, A. 2001. *Systèmes multi-agents: Une analyse comparative des méthodologies de développement*, Mémoire présenté comme exigence partielle de la Maîtrise en mathématiques et informatique appliquées à l'Université du Québec à Trois-Rivières.

[**Sahnoun et al 90**]Sahnoun, Z., Di Cesare, F., Bonissone, P.P. 1990. *Linguistic Summarization of Fuzzy data*, Information Sciences, 52(02), pp 141-152.

[**Sahnoun et al 97**]Sahnoun, Z., Boufaïda, M., Barril, P. 1997. *Multi-Agent Based Model for the Software Engineering Process*, International Conference on Software Quality Engineering SQE97, Editors: C.Tasso, R.A.Adey, M.Pighin, ISBN: 1 85312 403 6, Computational Mechanics Publications, pp103-112, Udine, Italie.

[**Sahnoun 05**]Sahnoun, Z. 2005. *Communication d'agents*, Cours sur Les Systèmes Multi-agents, Département d'informatique, Université Mentouri de Constantine.

[**Salles et al 97**]Salles, P., Bredeweg, B. 1997. *Building Qualitative Models in Ecology*, In Proceedings of Qualitative Reasoning Workshop QR'97, pp 155-164.

[**Sansonnet 01a**]Sansonnet, J.-P. 2001. *Notes on VDL 0.4*, Rapport Technique, LIMSI-CNRS.

[**Sansonnet 01b**]Sansonnet, J.-P. 2001. *Notes on VDL 0.4*, Rapport Technique, LIMSI-CNRS.

[**Sansonnet et al 02**]Sansonnet, J.-P., Pitel, G., Sabouret, N. 2002. *Un Langage de Description d'Agents dédié à l'Interaction Dialogique*, Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents, .JFIADSMA'02, Lille, France.

[**Sansonnet 04**]Sansonnet, J.-P. 2004. *Composants dialogiques génériques: perspectives et méthodes pour une approche intégrée des outils assistants langagiers et de la programmation objet*, Conférence "Langages et Modèles à Objets", LMO 04, Lille, France.

- [**Sansonnet et al 05**]Sansonnet, J.-P., Leguern, K., Martin, J-C. 2005. *Une architecture médiateur pour des agents conversationnels animés*, Workshop WACA sur les Agents Conversationnels Animés, Grenoble, France.
- [**Searle 69**]Searle, J.R. 1969 *Speech Acts*. Cambridge University Press.
- [**Searle et al 85**]Searle, J.R., Vanderveken, D. 1985. *Foundations of Illocutionary Logic*. Cambridge University Press.
- [**Shen et al 93**]Shen, Q., Leitch, R. 1993. *Fuzzy Qualitative Simulation*, IEEE Transactions on Systems, Mans, and Cybernetics, 23(4): pp1038-1061.
- [**Shoham 93**]Shoham, Y., 1993. *Agent-oriented programming*, Artificial Life 60, pp 139..159.
- [**Smith et al 94**]Smith, D. C., Cypher, A. Spohrer, A. 1994, *KidSim: Programming Agents Without a Programming Language*, Communications ACM, 37, 7, pp55-67.
- [**Sormo et al 05**]Sormo, F., Cassens, J., Aamodt, A. 2005. *Explanation in Case-Based Reasoning—Perspectives and Goals*, Artificial Intelligence Review 24, pp 109–143.
- [**Sowa 84**]Sowa, J.F. eds 1984. *Conceptual Structures Information processing in mind and machine*. Addison Wesley, Reading mass.
- [**Sowa 92**]Sowa J.F., 1992. *Conceptuel Graphs as A Universal Knowledge Representation*, Computers Math. Applic., Vol. 23, N° 2-5, pp. 75-93.
- [**Swartout 83**]Swartout WR. 1983. *XPLAIN: A system for creating and explaining expert consulting programs*, Artificial Intelligence, 21(3), 285–325.
- [**Turing et al 00**]Turing, A., Girard, J.Y. 2000. *La Machine de Turing*, Deuxième Edition, Editions du Seuil, ISBN 2-02-036928.
- [**Top et al 91**]Top, J., Akkermans, H. 1991. *Computational and physical causality*, Proceedings of IJCAI'91, Sydney, Australie, pp 1171-1176.
- [**UPB 03**]Loiret, P.J. 2003. *Agents intelligents*, Cours de l'université polytechnique de Bucarest, Roumanie.
- [**Valencia 00**]Valencia, E. 2000. [\*Gestion de l'hétérogénéité sémantique entre agents dialogiques à l'aide d'outils de topologie algébrique\*](#). Thèse de doctorat de l'université Paris XI, France.

- [**Vanderveken 88**]Vanderveken, D. 1988. *Les Actes de Discours*. Pierre Mardaga, Liège.
- [**Vanderveken 90a**]Vanderveken, D. 1990. *Meaning and Speech Acts*, tome 1 (Principles of Language Use). Cambridge.
- [**Vanderveken 90b**]Vanderveken, D. 1990. *Meaning and Speech Acts*, tome 2 (Formal semantics of success and satisfaction). Cambridge.
- [**Weiss 99**]Weiss, G. 1999. *Multiagent Systems a Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, MIT Press, Massachusetts, Lo,don, England.
- [**Wick 92**]Wick, MR. 1992. *Expert system explanation in retrospect: A Case Study in the Evolution of Expert System Explanation*, Journal of Systems and Software, 19(2) ,159–69.
- [**Wielinga 92**]Wielinga, B.J., Shreiber, A.Th, Breuker., J.A. 1992.*KADS: A Modelling Approach to Knowledge Engineering*, Knowledge Acquisition V4(1).
- [**Winkels 92**]Winkels, R. G. F. 1992. *Explorations in Intelligent Tutoring and Help*. Amsterdam, The Netherlands: IOS.
- [**Wooldridge et al, 95**]Wooldridge, M., Jennings., N.R. 1995. *Agent theories, architectures, and languages*. Wooldridge, Jennings (ed), Intelligent Agents, Springer Verlag, pp.1-22.
- [**Yan & al 04**]Yan, Y., Lemire D., and Brooks, M.. 2004. *Monotone pieces analysis for qualitative modeling*. In 16th European Conference on Artificial Intelligence Workshop 28: MONET Workshop on Model-Based Systems, ECAI'04, August 23-27, Valencia, Spain, pp. 39-44.
- [**Zabkar et al 05**]Zabkar, J., Zabkar, R., Vladusic, D., Cemas, D., Suc, D., Bratko, I. 2005. *Using Qualitative Constraints In Ozone Prediction*, 19th International Workshop on Qualitative Reasoning, July 18-20, 2005, Graz, Autriche.
- [**Zadeh 79**]Zadeh, L.A. 1979. *A theory of approximate reasoning*, In J.E. Hayes, D. Michie, and L.I. Mikulich, editors, Machine Intelligence 9, chapter 7. Ellis Horwood.

---

[Zadeh 01]Zadeh, L.A. 2001. *Causality is undefinable*. Séminaire, Université de Californie, Berkeley.



## Postface

*Un lecteur de rêves khazar, encore élève dans un monastère, reçut en cadeau un vase qu'il rangea dans sa cellule. Le soir il y déposa sa bague. Mais lorsqu'il voulut la reprendre le lendemain matin, elle n'y était plus. Vainement il enfonçait son bras dans le vase, il n'arrivait pas à en toucher le fond. Cela le surprit car le récipient semblait moins haut que son bras n'était long. Il le souleva mais, dessous, le sol était plat, et il n'y avait aucune ouverture dans le vase, pas plus que dans n'importe quel autre. Il prit un bâton et essaya d'atteindre le fond, mais toujours sans succès ; le fond du vase semblait se dérober. Il se dit "Là où je suis, là est ma limite" et il s'adressa à son maître Mokadasa Al Safer, lui demandant d'expliquer ce que signifiait un tel phénomène. Le maître prit un caillou, le jeta dans le vase, et compta. Lorsqu'il arriva à 70 on entendit à l'intérieur du récipient un bruit de plongeon, comme si un objet était tombé dans l'eau et le maître dit :*

*« Je pourrais t'expliquer ce que représente ton vase, mais demande-toi d'abord si c'est bien utile. Dès que je t'aurai dit ce qu'il en est, le vase prendra, pour toi et les autres, une valeur inférieure à celle qu'il a maintenant. En effet, quelle que soit sa valeur, elle ne peut être supérieure à celle du tout. Et dès que je t'aurai dit ce qu'il est, il ne sera plus tout ce qu'il n'est pas, et donc plus ce qu'il est encore maintenant.»*

*L'élève fut d'accord avec son maître. Mais ce dernier prit un bâton et cassa le vase. Stupéfait, le jeune homme lui demanda le motif de ce dommage et le maître répliqua : « Le dommage aurait consisté à te dire à quoi servait ce vase avant de le casser. Mais puisque tu ne connais pas son usage, le dommage n'existe pas, car le vase te servira toujours, comme s'il n'était pas cassé... »*

*En effet, le vase khazar sert encore, bien qu'il n'existe plus depuis longtemps.*

Milorad Pavi, Le Dictionnaire Khazar