

Modélisation de l'activité humaine pour la scénarisation adaptative d'environnements virtuels complexes : Des comportements cognitifs aux comportements erronés en situation dégradée

Domitile Lourdeaux

▶ **To cite this version:**

Domitile Lourdeaux. Modélisation de l'activité humaine pour la scénarisation adaptative d'environnements virtuels complexes : Des comportements cognitifs aux comportements erronés en situation dégradée. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université de technologie de Compiègne, 2012. tel-02191067

HAL Id: tel-02191067
https://hal.science/tel-02191067

Submitted on 24 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° attribué par la bibliothèque

|__/__/__/__/__/__/__/__/__/__/

Mémoire présenté pour obtenir une

Habilitation à Diriger des Recherches

par
Domitile LOURDEAUX

le 10 juillet 2012

Titre :

Modélisation de l'activité humaine pour la scénarisation adaptative d'environnements virtuels complexes :

Des comportements cognitifs aux comportements erronés en situation dégradée

Stéphane Donikian -DR Inria	Rapporteur
Monique Grandbastien – Pr	Rapporteure
René Mandiau – Pr	Rapporteur
Indira Thouvenin – ECC (HDR)	Examinatrice
Jean-Paul Barthès – ECC (HDR)	Examinateur
Dominique Lenne – Pr	Examinateur
Vanda Luengo – HDR MCF	Examinatrice
Jacques Marc – Dr	Examinateur

« Toute la foi et la bonne foi occidentale se sont engagées dans ce pari de la représentation : qu'un signe puisse renvoyer à la profondeur du sens, qu'un signe puisse s'échanger contre du sens, et que quelque chose serve de caution à cet échange – Dieu bien sûr. Mais si Dieu lui-même peut être simulé, c'est-à-dire se réduire aux signes qui en font foi ? Alors tout le système passe en apesanteur, il n'est plus lui-même qu'un gigantesque simulacre – non pas irréel, mais simulacre, c'est-à-dire ne s'échangeant plus jamais contre du réel mais s'échangeant en lui-même, dans un circuit ininterrompu dont ni la référence ni la circonférence ne sont nulle part. »

Jean Baudrillard, *Simulacres et Simulation*

« Il est en effet possible pour une entité de se présenter comme quelque chose qu'en soi elle n'est pas. »

Martin Heidegger

Citations tirées du roman « *La fin des mystères* de Scarlett Thomas

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION 5

1 Problématique de recherche 5
1.1 Quels contenus proposer et quelles connaissances représenter ? 5
1.2 Comment adapter les contenus dynamiquement ? 6
1.3 Comment permettre des co-activité avec des personnages virtuels ? 6
1.4 Comment représenter les connaissances et quels outils auteur proposer aux experts ? 7
1.5 Comment donner une sémantique aux traces utilisateurs 8
1.6 En résumé 8
2 Verrous 9
3 Approche et positionnement 9
3.1 Représentation des connaissances 10
3.2 Modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes 11
3.3 Scénarisation adaptative des environnements virtuels pour l'apprentissage humain 13
4 Parcours et projets 14
5 Plan du mémoire 14

II. REPRESENTATION DES CONNAISSANCES POUR LA MODELISATION DE L'ACTIVITE HUMAINE EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL 15

1 Comment décrire l'activité humaine en situation normale ? 15
1.1 Finalités de la modélisation de l'activité humaine 15
1.2 Objectif 15
1.3 Etat de l'art 16
1.4 Vers une chaîne de modélisation de l'activité finalisée à partir d'analyse de l'activité des opérateurs 23
1.5 Notre approche 24
1.6 Conclusion 30
2 Comment décrire l'activité en situation dégradée ? 31
2.1 Définitions 31
2.2 Etat de l'art : les Activités et Conditions Limites Tolérées par l'Usage 31
2.3 Positionnement de notre approche 32
2.4 Notre approche : intégration des ALU et des CLU dans HAWAI-DL 32
2.5 Conclusion 33
3 Comment formaliser les aspects risques ? 33
3.1 Définitions 33
3.2 Etat de l'art 35
3.3 Notre approche 39
4 Comment formaliser les connaissances sur le domaine ? 42
4.1 Définitions 42
4.2 Etat de l'art 43
4.3 Positionnement de notre approche 44

4.4 Notre approche 44
CODE 1: REGLE D'EXECUTION (MOSS) 47
CODE 2 : REGLE DE TRANSITION (MOSS) 47
5 Conclusion 49
III. MODELISATION DECISIONNELLE DE PERSONNAGES VIRTUELS AUTONOMES 51
1 Objectifs 51
2 Etat de l'art 51
2.1 Définitions 51
2.2 Modèles numériques 52
2.3 Modèles cognitifs 53
2.4 Modèles de la cognition humaine : approche cognitiviste vs située 60
2.5 Sélection d'action et planification 65
3 Nos approches 67
3.1 Comportements réactifs en situation d'urgence 67
3.2 Comportements décisionnels individuels : co-activités et risques 68
3.3 Emergence de comportements collectifs en situation de crise**Erreur ! Signet non défini.**
3.4 Conclusion 89
IV. SCENARISATION ADAPTATIVE DANS LES ENVIRONNEMENTS VIRTUELS POUR L'APPRENTISSAGE HUMAIN 91
1 Objectifs 91
2 Etat de l'art 91
2.1 Théories de l'apprentissage, pédagogie, didactique 91
2.2 Statut et traitement de l'erreur 93
2.3 Etat des recherches sur les environnements virtuels pour l'apprentissage humain 99
2.4 Scénarisation dynamique des situations d'apprentissage 102
3 Positionnement de nos approches 107
3.1 Approches adaptation de rétroactions et traces : exploitation des fonctionnalités de la réalité virtuelle 107
3.2 Approche scénarisation adaptative et apprentissage par essai-erreur (visualisation des conséquences) 112
3.3 Approche scénarisation aptaptive pour un équilibre entre cohérence, contrôle et émergence intégrant des personnages autonomes cognitifs 126
3.4 CONCLUSION 133
V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES 134
1 Bilan 134
2 Vers l'architecture HUMANS 135
2.1 Modèles et modules 135
2.2 Organisation générale de HUMANS 136
3 Perspectives.....137
3.1 Conclusion 139
VI. ANNEXE 140
1 Positionnement détaillé d'HAWAI-DL 140
VII. FICHE D'ACTIVITÉ 144

1 Production scientifique : 144
1.1 Chapitres de livre 144
1.2 Revues internationales avec comité de lecture 144
1.3 Revues nationales avec comité de lecture 145
1.4 Conférences internationales sélectives (< 30%) 145
1.5 Conférences internationales (selection >30% ou inconnue) 146
1.6 Conférences nationales (avec comité de lecture) 147
1.7 Conférences nationales (avec comité de lecture) 148
1.8 Articles de vulgarisation 148
2 Projets 148
3 Encadrements 152
3.1 Encadrement de thèses 152
3.2 Suivi scientifique de thèses 152
3.3 Encadrement de postdoctorants et ingénieurs de recherche 152
3.4 Encadrement stages master et/ou fin d'études 153
4 Rayonnement....153
4.1 Comités scientifiques 153
4.2 Groupes de recherche 153
5 Responsabilités scientifiques et adminstratives 153
5.1 Responsabilités et animations scientifiques 153
5.2 Responsabilités administratives 154
5.3 Responsabilités enseignements 154
6 Enseignement 154
VIII. BIBLIO 155
IX. GLOSSAIRE 171

I. Introduction

La **réalité virtuelle** permet aujourd'hui de modéliser des environnements performants et de résoudre des problèmes de **formation et d'aide à la décision.** Toutefois, les approches existantes permettent de gérer des environnements soit peu interactifs, soit peu adaptables, soit peu explicables, soit peu complexes, soit peu centrés apprentissage ou encore intégrant peu les aspects collectifs. Or nous souhaitons considérer tous ces aspects à la fois et permettre aux utilisateurs de **voir l'impact de leurs décisions sur des systèmes** techniques, organisationnels et humains auxquels ils prennent part et dont ils ont pour partie, individuellement et collectivement, la charge et donc de maîtriser ces systèmes **complexes**. Pour aborder tous ces aspects et concevoir des environnements virtuels pertinents, adaptables, efficaces, explicables et cohérents, nous proposons de centrer nos travaux sur la composante facteur humain. Notre objectif est donc de **modéliser l'activité humaine et sociale pour la scénarisation adaptative** d'environnements virtuels. Notre approche consiste à coupler ces environnements virtuels à des techniques **d'intelligence artificielle** et des **modèles issus de travaux en psychologie cognitive**. Aussi, notre défi est de proposer des **modèles cognitifs computationnels** pour **scénariser des environnements hautement interactifs et des situations complexes et dégradées à forte dimension cognitive.**

Dans ce mémoire, nous allons montrer en quoi cette approche permet de répondre à cet objectif mais surtout nous allons montrer en quoi l'opérationnalisation de modèles issus de travaux en psychologie cognitive est un problème difficile et comment nous avons pu les rendre computationnels.

1 Problématique de recherche

En réalité virtuelle, le système technique est souvent mis au cœur des recherches. Toutefois, l'humain présent dans la boucle est peu, voire pas pris en compte, alors que son rôle est primordial.

Nos recherches visent à **modéliser l'activité humaine pour la scénarisation d'environnements virtuels complexes qui soient à la fois pertinents, efficaces et cohérents**. Le domaine d'application choisi est celui de la **sécurité**, de la **prévention et de la maîtrise des risques**. En effet, il s'agit de systèmes socio-techniques complexes avec un fort enjeu pour la compréhension des facteurs humains, organisationnels et technologiques, de leur impact sur les processus décisionnels et la régulation de l'activité, ainsi que sur la sécurité. Ces systèmes sont d'autant plus complexes lorsqu'ils impliquent plusieurs personnes et des activités sociales. Plus particulièrement, la **formation** dans de tels environnements est au centre de nos recherches. Nous nous intéressons ainsi à l'émergence de la connaissance et donc des apprentissages. Dans ce cadre, que ce soit pour modéliser l'activité de l'apprenant ou de personnages virtuels partageant l'environnement avec lui, l'activité humaine est souvent vue comme un système technique que l'on cherche à modéliser comme un système sûr avec des modèles informatiques. Or cette centration technique ne permet pas de prendre en compte ou de rendre compte de toute la dimension facteur humain. Aussi notre hypothèse est que l'opérationnalisation de modèles issus de travaux en psychologie cognitive permet alors de proposer des situations d'apprentissage pertinentes et originales reflétant cette dimension humaine.

Cette problématique soulève une question scientifique : **comment construire et adapter dynamiquement les environnements support de l'activité de façon pertinente avec les objectifs d'apprentissage visés** ? Ou encore comment scénariser des environnements virtuels à la fois cohérents en regard des comportements attendus, dotés de contenus didactiques et intégrant des aspects motivants pour faciliter l'engagement de l'apprenant dans ses apprentissages ? Cette question en entraîne d'autres que nous allons détailler afin de comprendre ce qui nous amene à nous intéresser aux propositions que nous détaillerons par la suite.

1.1 Quels contenus proposer et quelles connaissances représenter ?

L'intérêt pour la réalité virtuelle dans le cadre de la formation professionnelle s'est considérablement développé ces dernières années avec des exigences qui soulèvent un grand nombre de problèmes. Parmi ces principaux problèmes, on note la question du passage des modèles et des concepts des sciences cognitives à leur mise œuvre dans des dispositifs informatiques et la question de l'ingénierie des situations permettant les apprentissages [Tchounikine, 2009]. Les applications actuelles de la réalité

virtuelle pour la formation se sont concentrées essentiellement sur l'apprentissage de gestes techniques ou de procédures très formalisées. Si la réalité virtuelle a été considérée comme une alternative intéressante pour pallier des difficultés à organiser des formations sur terrain ou pour minimiser les risques engendrés en situation réelle, les recherches menées dans ce domaine n'ont pas encore permis d'exploiter toutes les possibilités en termes d'usage et de situations d'apprentissage. La réalité virtuelle est une technologie très riche pour proposer des interactions complexes et mettre les apprenants dans des situations très proches de la réalité. Cependant, pour des raisons de difficultés de modélisation (variabilité des comportements, modèles imprécis de l'activité, du domaine et du fonctionnement du système) et d'analyses terrain sous-estimées (temps, habiletés peu explicites, difficultés d'accès au terrain et à des situations réelles d'activité, etc.), il n'est pas toujours possible de permettre à l'apprenant de vivre ces situations pleinement. En effet, comme il est difficile d'envisager toutes les libertés possibles, l'apprenant en environnement virtuel est souvent limité et contraint de trouver la bonne action s'il veut poursuivre son activité. L'apprentissage par l'erreur et la construction de ses propres représentations grâce à une interaction libre est encore un challenge pour la conception d'environnements virtuels pour la formation professionnelle, alors que dans le domaine des environnements informatiques pour l'apprentissage humain (EIAH), ces méthodes pédagogiques ont largement été exploitées. Toutefois, la réalité virtuelle permet de modéliser des environnements beaucoup plus complexes que ceux généralement modélisés par les EIAH et offrir une totale liberté d'action dans des systèmes complexes ne permet pas de contrôler et garantir des apprentissages précis. Il serait donc intéressant de proposer des environnements très flexibles et hautement interactifs mais contrôlés pour permettre à l'apprenant d'expérimenter plusieurs stratégies et voir les conséquences de ses décisions et de ses erreurs. Par ailleurs, si entraîner à la tâche prescrite ou à des cas d'école permet d'acquérir des connaissances et des compétences de base, il est aussi intéressant de pouvoir former à des situations de terrain (écarts observés sur le terrain, conditions dégradées, situations rares, stress, etc.). *Les questions du contenu pédagogique, des situations d'apprentissage, des connaissances à représenter et du raisonnement sur les connaissances métier se posent alors.*

1.2 Comment adapter les contenus dynamiquement ?

Si les systèmes sont peu complexes, le formateur peut exercer un contrôle sur le déroulement des événements dans l'environnement virtuel et guider les actions de l'apprenant pour provoquer des situations d'apprentissage pertinentes (déclenchement d'un incendie, éléments perturbateurs, etc.). Mais il est difficile pour le formateur de contrôler des situations complexes et critiques et de traiter les cas où l'on veut apprendre à l'utilisateur à réagir vite et bien à des situations exceptionnelles, que ce soit des configurations rares ou des situations de stress. Il est donc nécessaire de prévoir une adaptation dynamique des contenus.

Par ailleurs, il est intéressant de réguler de manière automatique les situations d'apprentissage, telles que le déclenchement de rétroactions et de conséquences selon le diagnostic des comportements de l'apprenant et selon son profil. Par exemple, des perturbations, des difficultés ou des conséquences probables à des comportements erronés devraient être déclenchées seulement s'il est à l'aise avec sa tâche nominale ou si l'on souhaite ajouter des éléments de stress. Si au contraire, l'apprenant est confronté à une situation difficile, il est alors préférable de ne pas trop surcharger les situations d'apprentissage. Trop de perturbations, conséquences, difficultés peuvent aussi démotiver l'apprenant dans ses apprentissages ou rendre le scénario non crédible si elles sont peu probables par rapport à la réalité. Une scénarisation adaptative pertinente permettrait aussi de proposer des scénarios inédits, non-déterministes et donc motivants. Nos travaux visent à proposer de telles scénarisations qui soient cohérentes et pertinentes.

Or, pour permettre ces interactions et l'émergence de la connaissance et donc des apprentissages, il est nécessaire de modéliser et scénariser le fonctionnement complexe de ces systèmes humains et techniques en lien avec les objectifs visés. *La question est donc comment proposer une adaptation dynamique cohérente et contrôlée du scénario selon le diagnostic des comportements de l'apprenant (comportements erronés, réussites, historique, etc.), de son profil (niveau, préférences, etc.), des objectifs de formation, de l'évaluation de la situation (tension dramatique, rythme, complexité de la situation, etc.).*

1.3 Comment permettre des co-activités avec des personnages virtuels ?

La réalité virtuelle permet d'envisager des environnements de plus en plus crédibles pour l'interaction d'un utilisateur avec son environnement mais aussi pour des interactions collaboratives et coopératives entre plusieurs utilisateurs « *réels* ». Aujourd'hui, les recherches s'intéressent à l'interaction d'un ou plusieurs utilisateurs avec des personnages virtuels autonomes. En effet, les besoins en termes d'application pour ce type d'interaction sont vastes. L'introduction de personnages virtuels autonomes permet de limiter le nombre d'intervenants réels. Cependant, modéliser de manière crédible des comportements « *humanisés* » reste un problème difficile, auquel l'intelligence artificielle se heurte depuis de nombreuses années. Plus qu'une crédibilité, nous visons à proposer des comportements cohérents et pertinents. Prévoir tous les comportements possibles et adapter le comportement des personnages virtuels de façon cohérente est souvent long et fastidieux dès que les systèmes deviennent complexes. Pour permettre cette cohérence et faciliter ce travail, les environnements virtuels peuvent être peuplés d'entités capables de percevoir, de décider et d'agir de manière autonome. Elles doivent réagir aux événements, interagir avec un utilisateur dont les comportements sont parfois complexes à analyser et s'adapter aux évolutions de l'environnement de manière cohérente. Par ailleurs, ces entités doivent être capables de créer des situations intéressantes pour mener l'utilisateur à des situations d'apprentissage dotées de sens. Notamment, en formation, il est primordial que ces entités servent un scénario amenant l'apprenant à réfléchir, se questionner et apprendre. De même, dans des systèmes d'aide à la décision, il est intéressant d'amener des décideurs ou experts à remettre en question certaines pratiques.

Dans notre travail, nous nous intéressons à la collaboration ou co-activité entre des humains réels (utilisateurs) et des personnages virtuels autonomes qui font sens par rapport aux objectifs visés par l'application. Puisque nous nous intéressons à des domaines d'application touchant aux domaines de la prévention des risques, les aspects humains avec tout ce qu'ils englobent (erreurs, doutes, dimension émotionnelle, etc.) sont des aspects majeurs qu'il n'est pas simple de simuler. Qu'il s'agisse d'activités collaboratives entre opérateurs (e.g. maintenance industrielle), de management d'équipes, de surveillance d'autres personnes (e.g. formation à la garde d'enfants) ou de gestion de crise (gestion de victimes), il est parfois intéressant de pouvoir modéliser l'impact physiologique, émotionnel ou physique de l'environnement ou des comportements de l'utilisateur sur de telles entités. A l'inverse, il peut être également pertinent d'étudier quels comportements de ces entités pourraient créer un impact émotionnel sur l'utilisateur (e.g. situation de stress). De même que l'activité humaine n'est pas parfaite, il peut être intéressant de simuler des personnages virtuels autonomes qui commettent des erreurs. Plus particulièrement, nous cherchons à rendre compte de comportements humains variables en situation normale ou dégradée (manque de temps, comportement imprudent, expertise). De telles modélisations n'ont de sens que s'il est possible d'expliquer quels phénomènes ont amené ces entités autonomes à de tels comportements. Nos travaux ne visent pas à modéliser le comportement humain exact mais à rendre compte de certains processus décisionnels variables et à pouvoir expliquer en partie les liens de cause à effet. *Les questions que nous posons alors sont comment simuler à un haut niveau les interdépendances entre les facteurs entrant en jeu dans la décision comportementale, de façon à pouvoir expliquer les séquences d'événements menant aux situations observées et comment intégrer dans des architectures informatiques de tels processus cognitifs complexes ?*

Les travaux menés en sciences cognitives sur la cognition et les processus cognitifs apportent des réponses à ces questions, mais alors la question du passage à leur opérationnalisation se pose.

1.4 Comment représenter les connaissances et quels outils auteur proposer aux experts ?

La conception d'environnements virtuels pour la formation requiert l'expertise de différents champs disciplinaires (ergonomie cognitive pour la modélisation de l'activité, experts du domaine, pédagogues, didacticiens, formateurs, etc.). Plus qu'une simple conception d'environnements virtuels pour répondre à des besoins particuliers de formation et d'aide à la décision, nous visons des systèmes capables de s'adapter dynamiquement. Nos modules décisionnels doivent pouvoir raisonner sur des connaissances sous-tendant le fonctionnement du système, le comportement humain, etc. L'informaticien est souvent amené à faire l'interface avec ces différents experts pour implémenter les comportements attendus. Chaque domaine a ses codes, ses formalismes qui ne sont pas forcément compatibles avec ceux utilisés en informatique. Et l'environnement virtuel ainsi conçu ne répond pas toujours aux besoins de chacun.

L'idée des outils auteur est de permettre aux experts non-informaticiens de construire eux-mêmes ces environnements virtuels, correspondant à leur expertise et à leurs besoins. Il s'agit alors de permettre aux experts de fournir des modèles correspondant à leur expertise et aux modules décisionnels de scénariser les contenus adéquats et de tracer tous les liens de cause à effet selon des catégorisations à définir (risques organisationnels, humains, techniques). *La question est donc de savoir quels modèles/formalismes et outils auteurs permettent à ces experts d'exprimer leurs connaissances et à nos modules décisionnels de les traiter de manière automatique.*

1.5 Comment donner une sémantique aux traces utilisateurs

Que ce soit pour des outils d'aide à la décision ou pour la formation, il est intéressant, comme nous venons de le dire de créer des situations qui font sens et amènent l'utilisateur à réfléchir. En effet, nous souhaitons pouvoir générer des situations d'apprentissage ou didactiques intéressantes pour mener l'utilisateur à des réflexions et favoriser des apprentissages. Pour générer de telles situations et fournir des éléments de discussion, il est utile de pouvoir expliquer pourquoi ces situations surviennent et de fournir des éléments d'évaluation voire d'autoévaluation aux utilisateurs pour comprendre les comportements ou événements qui ont amené à ces situations. Lorsqu'il s'agit de situations fortement complexes faisant intervenir des aspects humains, techniques et organisationnels avec des causes diverses et parfois décalées dans le temps, un système de traçage permet alors d'aider à mieux analyser les situations. De tels systèmes peuvent permettre au formateur de suivre l'activité des apprenants. Il est donc possible de proposer des traces sémantiques et des indicateurs de performances « on-line » (pendant la session) ou « off-line » pour des activités réflexives. Le retour sur l'apprentissage et les activités réflexives sont essentielles pour la prise de conscience des acquisitions et des erreurs par l'apprenant [Burkhardt, 2006]. Cette étape de la séquence consiste à guider l'apprenant dans l'analyse de la tâche réalisée et l'explicitation de ce qu'il a retenu au travers de son expérience de la séquence de formation. A l'instar de la simulation, les environnements virtuels peuvent, par exemple, intégrer les fonctionnalités de type rejeu (actif, passif, conditionnel) et des traces de l'activité particulièrement intéressantes dans cette perspective. Pour générer des traces, l'environnement virtuel peut être doté d'un système de suivi de l'apprenant ou d'un tuteur intelligent qui va s'intéresser aux actions et aux résultats des actions de l'apprenant et des autres entités virtuelles autonomes présentes dans l'environnement virtuel. *La question est donc de savoir comment attribuer une sémantique aux traces laissées par l'utilisateur.*

1.6 En résumé

Pour atteindre ces objectifs, nous avons cherché à :

- Rendre compte ou former à des situations écologiques en concevant des environnements virtuels et des scénarios s'appuyant sur des analyses terrains prenant en compte des aspects facteurs humains (didactique professionnelle, activité finalisée versus activité prescrite, etc.) ;
- Introduire des mécanismes de contrôle des interactions avec des systèmes complexes sur le plan technique, organisationnel et humain. Ces mécanismes doivent rendre compte du fonctionnement réel et cohérent du système complexe et proposer des situations, variées, contextualisées et pertinentes du point de vue des apprentissages ;
- Permettre aux utilisateurs (décideurs, apprenants, formateurs) de comprendre tous les liens de cause à effet entre actions et survenue d'événements critiques dans des systèmes très complexes où il n'est pas toujours facile de comprendre ces liens de manière évidente ;
- Permettre des activités complexes avec d'autres personnes pouvant être « jouées » par des personnages autonomes dotés de comportements variables et non-déterministes. Ces personnages peuvent rendre compte de comportements adaptatifs, corrects ou erronés. Nous nous intéressons à la génération de comportements individuels mais aussi à l'émergence de comportements collectifs (sociaux, culturels) à partir de comportements individuels ;
- Permettre à des non-informaticiens, experts de leurs domaines de décrire des modèles de domaine directement interprétables par nos moteurs décisionnels. Nous nous intéressons à des

modèles permettant la manipulation de concepts communs mais avec des vues différentes pour chaque domaine.

2 Verrous

Dans ce cadre, les verrous considérés dans nos recherches sont :

1. La **difficulté à proposer des outils auteur et des langages de description suffisamment puissants** pour permettre la scénarisation d'environnements virtuels complexes intégrant des personnages virtuels aux comportements évolués. Il s'agit ici de permettre à des experts de différents domaines de manipuler des connaissances communes avec des formalismes à la fois simples et interprétables informatiquement ;
2. La **difficulté à permettre l'analyse sémantique des traces de l'apprenant**. La difficulté vient du fait qu'il s'agit de trouver des règles d'analyse génériques pour l'interprétation et le diagnostic des activités des apprenants dans l'environnement virtuel pour adapter les scénarios selon le contexte. Là encore, la spécificité des environnements virtuels provient du fait que la liberté d'action de l'apprenant est très grande et souvent difficile à interpréter ;
3. La **difficulté à proposer une scénarisation adaptative et offrir un contrôle pédagogique et/ou narratif sur une simulation fortement complexe sans nuire à sa cohérence/pertinence en regard des comportements attendus**. La difficulté majeure vient du fait qu'il peut y avoir une contradiction entre les différents objectifs visés 1) contrôle de la simulation (pédagogique et scénaristique), 2) liberté d'action de l'apprenant et émergence de situations variées et 3) cohérence des comportements attendus du système technique et des personnages virtuels autonomes ;
4. **L'opérationnalisation dans une architecture informatique des facteurs humains dans les processus décisionnels individuels complexes** (e.g. émotions, personnalité, physiologie). La problématique vient du fait que les modèles issus de travaux en psychologie cognitive sont très complexes et difficiles à mettre en œuvre dans des architectures informatiques. Les modèles issus de la psychologie cognitive n'expliquent pas comment les opérationnaliser ;
5. La **difficulté de l'émergence de comportements collectifs à partir de comportements individuels** résultants de processus cognitifs dans la modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes. La difficulté majeure vient du passage à l'échelle (individu vers plusieurs centaines voire milliers d'individus). La modélisation des émotions, des relations sociales et de l'influence inter-agents nécessite la mise en place de processus cognitifs complexes, et cette difficulté est décuplée par le grand nombre d'agents nécessaire pour constituer une foule ;
6. **L'absence de méthodologie pour la conception d'environnements virtuels pour l'apprentissage humain (EVAH).** Un sixième verrou a été étudié au début de nos travaux et concernait les méthodologies de conception pour ces environnements. A la fin des années 90 début des années 2000, de telles réflexions existaient dans les environnements informatiques pour l'apprentissage humain (EIAH) [Tchounikine, 2002], [Grandbastien et Labat, 2006], mais pas encore dans les EVAH. Aussi, nous avions contribué à cette question, qui a été ensuite traitée par [Mellet d'Huart, 2004]. Bien sûr, nous nous intéressons toujours à des applications de formation et nous veillons à placer la question de l'apprentissage au centre des scénarios.

3 Approche et positionnement

Les travaux sur la scénarisation d'environnements virtuels pour la formation s'intéressent soit :

1) Aux aspects techniques et informatiques pour rendre crédibles ces environnements du point de vue de la réaction du système (rendu graphique très réaliste, physique réaliste, fonctionnement logique, etc.) ;
2) Aux aspects modélisation de comportements de personnages virtuels autonomes (planification de chemins, comportements réactifs, comportements hautement cognitifs) ;

3) Aux aspects serious game et aux ressorts ludiques pour garantir un engagement émotionnel de l'apprenant dans ses apprentissages ;
4) Aux aspects récit interactif pour garantir un récit cohérent ;
5) Aux aspects scénarisation pédagogique pour garantir des apprentissages en s'inspirant de travaux menés dans le cadre des EIAH sur des processus contrôlables et des apprentissages initiaux (procédures simples, gestes techniques, savoirs).

Toutefois, si les deux premiers aspects permettent d'assurer la crédibilité des comportements, ils ne garantissent pas des apprentissages, et si les trois derniers tentent de garantir des apprentissages ou des engagements émotionnels, les contraintes d'interaction ne permettent pas de gérer des apprentissages par l'erreur dans des environnements hautement interactifs et fortement complexes.

Notre projet scientifique vise à allier ces différents aspects pour proposer des environnements hautement interactifs, intégrant des aspects organisationnels, humains et techniques fortement complexes, permettant des apprentissages avancés mais contrôlés par essai-erreur (formation continue, entraînement). L'approche originale que nous proposons pour lever les verrous précédemment cités, s'appuie sur un couplage dans des environnements virtuels de deux champs 1) l'intelligence artificielle avec des systèmes de connaissances et 2) des modèles computationnels fondés sur des théories en psychologie cognitives (modèles cognitifs, architectures cognitives, modèles d'erreurs, modélisation de l'activité humaine). Il s'agit de concevoir des modèles computationnels et des architectures capables de raisonner sur ces modèles : diagnostiquer les comportements de l'utilisateur, exploiter ses traces, modifier les caractéristiques des personnages virtuels autonomes, sélectionner ou planifier les comportements de ces personnages, etc. Pour raisonner sur ces modèles, nous proposons des solutions fondées sur des techniques d'intelligence artificielle telles que les systèmes multi-agents, la reconnaissance de plans, la logique floue et les réseaux bayésiens. Pour simplifier, nous avons regroupé les verrous selon **trois axes scientifiques** :

1) la **représentation des connaissances** (verrou 1),
2) la **modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes** (comportements individuels : verrou 4 et comportements collectifs : verrou 5),
3) **la scénarisation adaptative** (verrou 2 et 3).

3.1 Représentation des connaissances

La scénarisation d'environnements virtuels doit reposer sur une architecture informatique à même de soutenir les besoins et les contraintes fonctionnelles pour l'apprentissage. Dès lors que l'on souhaite introduire dans ces environnements des entités devant interpréter leur environnement, la question du raisonnement sur des connaissances structurées se pose.

Les **connaissances** à représenter et à exploiter de façon synergique dans ces environnements concernent trois domaines fonctionnels :

- Les connaissances sous-tendant la scénarisation pédagogique, le suivi de l'apprenant et le choix des modalités de rétroactions pédagogiques adéquates. Ces connaissances peuvent être classifiées en termes de comportements/résultats d'action ou avoir pour autre fonction de comprendre/déduire quelles connaissances l'apprenant a mises en œuvre pour résoudre la situation-problème au cœur de l'apprentissage ;
- Les connaissances visant à nourrir la génération et la scénarisation des comportements des personnages virtuels autonomes, notamment en termes de planification et sélection d'actions ;
- les connaissances portant sur l'environnement virtuel et les différents objets composant la scène, sur les actions qui y sont possibles et sur les états potentiels ;

Une contrainte forte sur l'architecture réside dans le fait que les connaissances dans ces domaines doivent pouvoir être traitées de façon coordonnée, ce qui implique des représentations et des processus de traitement compatibles qui communiquent ou partagent certaines des données. Par exemple, l'état du monde virtuel et les actions autorisées à un instant constituent des données importantes, à la fois pour permettre aux personnages virtuels d'adapter leur comportement au contexte et pour identifier les

actions entreprises par l'apprenant, que ces actions soient conformes à ce qui est attendu ou au contraire totalement non-planifiables.

Ces connaissances doivent être exprimées par des représentations symboliques sémantiquement interprétables. Nous proposons donc de modéliser ces connaissances sous forme d'**ontologies**.

Pour permettre d'interchanger les rôles entre apprenants et personnages virtuels autonomes, une des originalités de notre travail réside dans l'utilisation des mêmes modèles pour la modélisation des comportements des personnages virtuels et pour le suivi de l'apprenant.

Que ce soit pour diagnostiquer le comportement d'un apprenant ou pour générer le comportement d'un personnage virtuel autonome, il est important de disposer d'un modèle de référence. Souvent, un modèle expert, i.e. de l'activité idéale/correcte est utilisé. Ce modèle est généralement exprimé au moyen d'un **langage informatique**, directement **interprétable** par la machine (e.g. automates, réseaux de Petri, etc.). Seuls les **informaticiens** sont alors capables de renseigner ce modèle d'activité à partir d'analyses réalisées avec des experts du domaine ou des formateurs.

Cependant des écarts existent souvent avec les pratiques réellement opérées sur le terrain et les représentations mentales des opérateurs de terrain. Ces écarts peuvent être observés à partir d'analyse terrain. Ce type d'analyse est une des spécialités de **l'ergonomie** cognitive qui dispose de langages, pour décrire les activités effectives observées sur le terrain (e.g. MAD [Scapin et Bastien, 2001], GTA [van der Veer, 1996]). Cependant, ces modèles ne sont pas **interprétables** directement par la machine.

Aussi, une autre originalité de nos travaux a été de nous orienter sur des langages auteur pour permettre aux ergonomes, spécialistes de l'analyse d'activité, de décrire les activités observées et de pouvoir les interpréter directement par nos modules informatiques. L'une de nos propositions fortes a été de spécifier un modèle computationnel de l'activité humaine qui soit suffisamment 1) intuitif pour que les ergonomes puissent facilement se l'approprier et 2) interprétable et sémantiquement complet pour que nos algorithmes raisonnent directement sur le modèle sans réinterprétation de l'informaticien. Ainsi, nous avons proposé le langage **HAWAI-DL** (Human Activity and Work Analysis for sImulation-Description Language). Et pour prendre en compte les écarts observés entre la tâche prescrite et les activités effectuées par des experts sur le terrain, nous avons adjoint à ce langage un modèle de **Conditions Limites d'Usages Tolérées par l'Usage** [De la Garza, 2005].

Sur le même principe, nous avons souhaité, ne pas fournir un seul modèle et un seul formalisme capable d'unifier toutes les connaissances (domaine, activité, pédagogie, etc.) que seul un informaticien sera capable de renseigner. Nous proposons pour lever le verrou 1 (sur les langages de description) des modèles qui permettent de manipuler des **concepts communs avec des vues différentes** pour chaque domaine (ergonomie cognitive, risque, didactique, pédagogie, fonctionnement technique, etc.). Ces modèles visent une conception collaborative. Chaque expert peut ainsi saisir ses modèles avec le même outil et sur la base du même modèle mais avec des approches différentes et des regards croisés.

3.2 Modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes

Concernant la **modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes**, notre approche consiste à rendre compte de la variabilité des comportements humains, des processus décisionnels en situation normale et dégradée, de comportements erronés, d'une cognition située et contextualisée et enfin des facteurs humains qui influencent ces comportements. Nous cherchons à modéliser l'impact de caractéristiques externes (le contexte et l'environnement) sur ses caractéristiques internes (émotions, physiologie). Les perceptions de l'agent peuvent être modulées en fonction de critères physiologiques (faim, fatigue, stress, etc.), de sa personnalité (curiosité, empathie, etc.) et de ses émotions (colère, peur, etc.). Nous cherchons aussi à modéliser comment la cognition de ces personnages virtuels autonomes peut être impactée par des caractéristiques externes et par ses caractéristiques internes (personnalité, émotions, physiologie). D'un point de vue global, c'est tout le processus décisionnel qui est impacté par ces facteurs : perception, croyances, buts, sélection d'action.

Pour obtenir un comportement cohérent, deux approches principales existent : mimer le fonctionnement cognitif humain, ou manipuler et composer un ensemble de comportements observés. La première approche se heurte à la complexité du processus modélisé, tandis que la seconde ignore les processus décisionnels ayant mené au choix des comportements. Nos travaux visent à proposer une

architecture hybride qui simule à un haut niveau les interdépendances entre les facteurs entrant en jeu dans les processus décisionnels. Celle-ci doit permettre, grâce à une modélisation au niveau des entités, d'obtenir des comportements individuels et collectifs cohérents avec les phénomènes simulés.

En France, les approches jusqu'ici proposées s'appuient généralement sur des architectures informatiques (automates, systèmes experts, etc.) intégrant peu les aspects cognitifs. Les approches cognitives se focalisent essentiellement sur deux champs d'application :

1) La modélisation de déplacements d'entités autonomes comme les modèles de comportement d'attention visuelle [Badler *et al.*, 1999] appliqués à la simulation de piétons [Donikian, 2004] ;
2) la modélisation d'expressions faciales ou de comportements non-verbaux d'agents conversationnels animés (ACA).

Les travaux les plus complets en termes de modélisation des processus décisionnels cognitifs ont été menés par Gratch et Marsella [Gratch et Marsella, 2004], [Gratch, 2002], etc. Ces chercheurs visent à concevoir des agents cognitifs émotionnels et sociaux capables de raisonner sur des connaissances incertaines et de planifier des comportements très complexes en fonctions de leurs émotions et de leurs relations avec d'autres agents (e.g. aider des agents qu'ils aiment, nuire à des agents qu'ils n'aiment pas, etc.). Bien que très complets, les modèles cognitifs, sur lesquels se fondent ces travaux, font appel à des processus cognitifs de très haut niveau qui sont difficiles à implémenter. Les informaticiens opèrent donc des simplifications de modèles. Il existe aussi de nombreux modèles en psychologie cognitive qui n'ont pas encore été implémentées. Ainsi, il existe peu de travaux sur des personnages virtuels autonomes prenant en compte la notion de comportements erronés et de facteurs humains propices à la modélisation de comportements en situation de travail.

Notre apport dans ce domaine est de proposer des modèles cognitifs computationnels. Notamment, pour lever le verrou 4 (représentation dans une architecture informatique des facteurs humains dans les processus décisionnels individuels complexes), nous proposons d'opérationnaliser des modèles issus de travaux dans le domaine de la fiabilité humaine et plus particulièrement sur les risques industriels comme le modèle contextuel de contrôle cognitif **COCOM** proposé par [Hollnagel, 1994], la méthode cognitive **CREAM** [Hollnagel, 1998], les modèles d'activité finalisée **HAWAI-DL** et le modèle sur les **Conditions Limites Tolérées par l'usage** proposé par [Amalberti, 2001], [De la Garza et al., 2005]. En particulier, HAWAI-DL permet aux personnages virtuels autonomes de rendre compte de processus décisionnels observés sur le terrain et donc d'une cognitiion située. Nos travaux portent aussi sur le couplage de ces modèles avec des modèles déjà éprouvés dans le domaine de la modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes comme le modèle de cognition Soar [Laird *et al.*, 1987], le modèle Belief-Desire-Intention [Rao, 1991], le modèle de personnalité OCEAN [Costa *et al.*, 1992] et le modèle d'émotion OCC [Ortony *et al.*, 1990].

Par ailleurs, nous souhaitons pouvoir confronter un utilisateur/apprenant à la présence d'un grand nombre d'individus mais avec lesquels il est possible d'interagir finement. Si la modélisation de comportements cognitifs au niveau individuel a fait l'objet d'un petit nombre de travaux sur la modélisation individuelle, beaucoup moins encore concernent la modélisation de foules à un niveau microscopique (échelle de l'individu). Les travaux sur les foules s'appuient souvent sur des approches macroscopiques (i.e. foule vue dans son ensemble, e.g. approche type mécanique des fluides, etc.). La modélisation de processus cognitifs complexes au sein d'une foule microscopique est un problème difficile (verrou 5). Nous pensons que le phénomène de **contagion émotionnelle**, parce qu'il ne requiert aucun processus cognitif, nous permettra d'apporter une solution à ce problème.

Que ce soit pour la modélisation décisionnelle individuelle ou collective, nous nous sommes intéressés aux **architectures multi-agents**, à la sélection d'action, à la planification cognitive et à la logique floue. Pour passer des modèles complexes issus de la psychologie cognitive à des modèles computationnels, nous devons opérer des simplifications et des interprétations des données décrites de manière floue. Notre contribution étant essentiellement informatique, nous travaillons en étroite collaboration avec des ergonomes afin de partager nos points de vue et produire des modèles computationnels complets pour que les comportements simulés restent suffisamment cohérents et valides.

3.3 Scénarisation adaptative des environnements virtuels pour l'apprentissage humain

Les travaux actuels sur la scénarisation visent soit 1) le contrôle des apprentissages avec des interactions fortement contraintes et des scénarisations pédagogiques adaptatives pour fournir des rétroactions sur les connaissances mises en jeu dans l'apprentissage (e.g. renvoi à un cours, renvoi sur la procédure prescrite, réification d'un concept abstrait, etc.), soit 2) le contrôle de scénarios fortement crédibles et proche de la réalité avec des interactions libres dirigées par le fonctionnement du monde, soit 3) le contrôle de la cohérence scénaristique et de l'intrigue pour augmenter l'engagement et la motivation des utilisateurs avec la génération d'histoires théâtralisées. Les premières, si elles tentent de garantir les apprentissages, ne permettent pas de s'éloigner de la procédure, ni des apprentissages par l'erreur (e.g. visualisation des conséquences immédiates ou différées). Les secondes permettent de voir les conséquences des erreurs mais ne garantissent pas les apprentissages. Enfin, les troisièmes permettent un meilleur engagement mais ne sont pas dirigées par un contrôle pédagogique.

Nos travaux visent à proposer des **scénarisations à la fois cohérentes, motivantes et pédagogiques**. Dans notre cas, nous nous intéressons à la formation d'apprenants expérimentés à des situations très complexes. Aussi, plutôt que de recadrer systématiquement l'activité de l'apprenant, nous préfèrerons l'orienter à travers une scénarisation non-intrusive, pour favoriser une approche exploratoire et un apprentissage par essai-erreur. La notion d'erreur est une notion centrale dans nos travaux. Nous souhaitons, créer des situations qui amènent l'apprenant à se questionner, remettre en question certaines habitudes. Cette approche est aussi intéressante, lorsque l'on considère des problématiques de formation continue où les opérateurs ont mis en place certains mécanismes d'adaptation, écarts par rapport à la procédure prescrite ou compromis cognitifs affectant la sécurité. Parfois, ces écarts sont le fruit d'adaptations aux contraintes du terrain, ou de confiance exagérée dans leur capacité à pouvoir gérer des événements critiques peu probables. Mais parfois, il n'y a pas de bonnes stratégies, et il faut faire des compromis. Il peut être utile de faire des transgressions quand le système technique est défaillant ; l'humain de par sa capacité d'analyse est alors capable de pallier ces défaillances. Plus qu'un réapprentissage des bonnes procédures, la scénarisation de situations d'apprentissage amène alors à apprendre à analyser correctement la situation, à jauger les différentes solutions, les expérimenter, comprendre leurs avantages et inconvénients, à savoir réfléchir avant d'agir dans des situations rares où le stress pourrait affecter la capacité d'analyse. Ainsi, il est important de pouvoir faire observer les différentes conséquences, parfois complexes, de certaines actions.

Toutefois, comme nous l'avons déjà dit, offrir une grande liberté d'action et permettre d'observer les conséquences de ces actions ne suffisent pas à apprendre et un contrôle pédagogique est nécessaire. Une solution pour assurer un contrôle pédagogique consiste à modéliser tous les possibles avec des graphes multi-linéaires [Delmas, 2009], [Benjamin-Thomas *et al.*, 2011], etc. Mais, ces approches montrent leurs limites lorsqu'il s'agit de modéliser des environnements très complexes car il est difficile de prévoir tous les chemins possibles. Cette difficulté est décuplée lorsqu'il s'agit de prendre en compte des aspects co-activité avec des personnages virtuels autonomes dotés de processus hautement cognitifs (e.g. émotions, personnalité). Coupler des personnages autonomes et un contrôle global du scénario est difficile et la solution souvent adoptée consiste à modéliser des personnages semi-autonomes contrôlés par des ordres ou des niveaux cognitifs artificiels [Niehaus et Riedl, 2009]. Cette approche est limitée pour maintenir un certain niveau de cohérence des comportements cognitifs et ne permet d'expliquer *a postériori* les processus décisionnels de ces personnages.

Par ailleurs, prendre en compte les spécificités de chaque apprenant (e.g. aspects facteurs humains, rythmes d'apprentissage). Nous nous intéressons aussi à la scénarisation et à la production de rétroactions selon les profils d'apprenant (e.g. expérience, antécédents métiers), les traces d'activité (e.g. bonnes et mauvaises décisions), des règles pédagogiques et des règles scénaristiques.

Pour pouvoir adapter les situations d'apprentissage aux profils des utilisateurs et fournir des outils de suivi aux formateurs, des activités réflexives aux apprenants, notre approche consiste à proposer des techniques de diagnostic des activités telles que la reconnaissance de plans et des outils de calcul pour la production de décisions « scénaristiques ».

Les propositions fortes pour lever le verrou 2 (sur l'analyse sémantique) sont de fonder la reconnaissance de plan sur le modèle de référence de l'activité finalisée produit au moyen **d'HAWAI-**

DL et de réaliser un diagnostic sur la base du modèle d'erreur de la méthode cognitive **CREAM** proposé par Hollnagel [Hollnagel, 1993]. Ces modèles permettent de proposer des traces sémantiques pour analyser/comprendre finement les comportements de l'apprenant au cours de la session ou en étayage réflexif, i.e. en retour sur apprentissage. Les propositions fortes pour lever le verrou 3 sur la difficulté de scénariser sont de fonder la génération des scénarios sur 1) des représentations d'un champ large de possibilités d'action et de situations d'apprentissage par le biais de modèles issus du domaine de **l'analyse de risques (nœuds papillons)** et les autres modèles de représentation des connaissances proposés (activité finalisée, domaine) et 2) sur des **techniques de planification et de calcul probabiliste** des conséquences des événements.

4 Parcours et projets

J'ai effectué une thèse CIFRE entre le laboratoire de Robotique de l'Ecole des Mines de Paris et la SNCF sur la conception d'environnements virtuels pour la formation (1998-2001). Cette thèse avait pour objectif la conception d'environnements virtuels pour la formation. Le sujet initial portait sur des questions très techniques du type « *que peut-on proposer comme immersion/interaction avec des interfaces innovantes de réalité virtuelle (visiocasque, capteurs de position, etc.) pour former ?* ». Cette question était pour moi posée à l'envers et la vraie question qui m'a alors intéressée était « *quelles interactions et quelle immersion pour permettre des apprentissages ?* ». J'ai proposé une méthodologie de conception d'environnements virtuels pour l'apprentissage et un tuteur intelligent pour la scénarisation pédagogique (HAL : Help Agent for Learning, [Lourdeaux, 2001]). J'ai ensuite travaillé comme ingénieure de recherche à l'Ecole des Mines de Paris sur les environnements virtuels pour l'apprentissage humain (2001-2005). Je me suis intéressée à la prise en compte des facteurs humains dans des architectures informatiques (tuteurs intelligents, modélisation de l'activité humaine, etc.) dans le cadre du projet APLG.

Depuis 2005, je suis maître de conférences sur la thématique « *réalité virtuelle et connaissance* » au laboratoire Heudiasyc UMR CNRS 7253 de l'Université de Technologie de Compiègne. Poursuivant mes travaux précédents, j'ai étendu mon travail à l'adaptation dynamique de la complexité des situations d'apprentissage (projets Perf-RV2, FIANNA, SIMADVF, etc.). En parallèle, mes travaux sur la modélisation de l'activité humaine m'ont conduite à m'intéresser à la modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes (projets V3S, SAGECE, etc.). Aujourd'hui, mes travaux visent à coupler les travaux sur la scénarisation adaptive et la modélisation des personnages virtuels autonomes pour proposer des situations d'apprentissage pertinentes du point de vue des apprentissages et motivantes pour engager l'apprenant dans ses apprentissages (projets ARAKIS, NIKITA, CRAKEN, etc.). La description de ces projets et de mes encadrements de thèse se trouve en Annexe : VII Fiche d'activité.

5 Plan du mémoire

Dans ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches, après avoir présenté la problématique générale et le cadre de mes travaux, je suivrai un plan par thématique scientifique avec trois parties :

1. Comment représenter les connaissances pour la modélisation de l'activité humaine ?
2. Comment doter les personnages virtuels d'autonomie et de capacités décisionnelles ?
3. Comment proposer une scénarisation adaptative des situations d'apprentissage ?

Enfin, dans la dernière partie, je présenterai un bilan et une discussion sur les travaux menés, ainsi que mes perspectives de recherche.

II. Représentation des connaissances pour la modélisation de l'activité humaine en environnement virtuel

Peu d'environnements virtuels s'appuient sur des systèmes à base de connaissances. Parmi ces environnements, les connaissances les plus couramment modélisées sont d'un côté la représentation du domaine (objets et actions possibles) et de l'autre, l'activité de l'humain virtuel (autonome ou avatar de l'utilisateur). Nous allons donc nous intéresser à ces deux aspects. Pour la modélisation de l'activité, nous distinguons l'activité en situation normale et l'activité en situation dégradée. Comme, précédemment cité, nous nous intéressons au domaine du risque, nous présentons aussi comment nous modélisons des risques dans notre environnement.

1 Comment décrire l'activité humaine en situation normale ?

Nos travaux visent à modéliser l'activité humaine. Après avoir présenté les finalités d'une telle modélisation, nos objectifs et un bref état de l'art, nous présenterons nos travaux sur cette thématique.

1.1 Finalités de la modélisation de l'activité humaine

L'élaboration d'un modèle a trois types de finalités [Rouse & Morris, 1986] :

- **Décrire** : un modèle peut être utile afin de décrire un objet en insistant sur certains aspects [Sperandio, 2003]. Dans le contexte de l'ergonomie de conception, par exemple, le(s) modèle(s) vise(nt) à mettre en avant les dimensions ou caractéristiques importantes des opérateurs/utilisateurs pour une bonne adaptation de l'artefact au comportement de la population des futurs utilisateurs. Il existe déjà depuis de nombreuses années des modèles statiques tels que les « mannequins numériques », toutefois ces derniers ne rendent pas compte de la dynamique de l'activité et restent essentiellement cantonnés dans la représentation d'aspects morphologiques et de contraintes biomécaniques ;
- **Expliquer :** le modèle vise à expliquer pourquoi les choses se passent d'une certaine façon, dès lors qu'il existe au moins une alternative. L'explication est dépendante des théories et des paradigmes privilégiés par l'analyste ou le chercheur. Lorsqu'il s'agit de l'Homme – ou de l'Animal – on peut dégager trois grandes postures qui placent l'explication de façon préférentielle au niveau (a) des caractéristiques de l'environnement extérieur, (b) des propriétés internes au sujet, ou (c) de l'interaction entre des propriétés internes du sujet et externes liées à l'environnement. L'intérêt du cadre de la réalité virtuelle est de pouvoir formaliser simultanément ces trois angles d'attaque, au sein du même « simulateur », en ayant qui plus est une capacité de représentation proche du monde réel ;
- **Prédire** : La finalité est alors, à travers l'animation du modèle, d'anticiper « correctement » (i.e. de façon mesurable et valide) les comportements ou changements d'état de l'objet modélisé. La prédiction peut elle-même avoir des objectifs variés, allant de la validation empirique du modèle sur le plan des connaissances scientifiques, à l'évaluation de certains aspects des facteurs humains en amont de la conception, grâce au prototypage virtuel par exemple.

1.2 Objectif

Dans le cadre d'applications de réalité virtuelle, la problématique de la modélisation de l'activité ou du comportement humain renvoie à deux orientations principales [Burkhardt, Lourdeaux et al., 2009]. La première est la génération, à partir de modèles, des comportements crédibles de personnages virtuels anthropomorphiques évoluant en temps interactif dans un monde virtuel. La seconde correspond à l'exploitation de modèles pour interpréter et suivre les actions d'un utilisateur interagissant avec les objets et les autres personnages à l'intérieur d'un monde virtuel.

Il existe aujourd'hui de façon bien identifiée dans la littérature des travaux et des modèles concernant la physique ou la simulation du geste et du mouvement dans l'objectif d'animer des avatars ou des mannequins pour la réalité virtuelle [Donikian, 2009]. Inversement, le niveau du raisonnement et de la prise de décision dans un environnement riche et complexe et pour des activités finalisées sont peu voire pas traités. Dans les environnements virtuels actuels, le comportement des utilisateurs ou des

humains virtuels qui y sont simulés s'avère représenté de façon fruste. Lorsqu'ils sont dotés de possibilités d'animation dynamique, les modèles anthropométriques d'humains de type mannequins numériques nécessitent d'en programmer le script de façon quasi exhaustive, ou encore d'exploiter des données d'enregistrement du mouvement sous la forme d'un script de rejeu. Le comportement est alors déroulé sans délibération et sans réelle "autonomie" de l'agent, notamment en ce qui concerne la prise en compte du contexte et de l'environnement. Ces approches peinent à permettre de générer des comportements rendant compte de la complexité, de la flexibilité et de la variété de ce qui est observé dans des situations écologiques ; qui plus est, elles ne permettent pas de programmer un niveau de contrôle fondé sur des connaissances. La représentation des utilisateurs elle-même consiste généralement en la combinaison d'entrées issues de différents capteurs et autres dispositifs d'interface, selon des transformations plus ou moins explicites, de façon à calculer une position ou un vecteur de déplacement dans la scène virtuelle. Cette formule est ainsi souvent le seul « modèle de l'utilisateur » dans le système, ce qui réduit son exploitation tant soit peu intelligente au seul enregistrement d'une trajectoire, à la détection de position et à son interprétation. Elle fournit, le cas échéant, l'information d'entrée utilisée pour contrôler la position et le mouvement de l'avatar de l'utilisateur. Mais elle peine à fournir des informations sémantiques concernant le suivi de l'activité de l'apprenant.

L'idée que nous défendons dans nos travaux est que la modélisation d'activités finalisées peut fournir un cadre exploitable soit pour en spécifier la réalisation autonome par des personnages virtuels soit pour opérer le suivi des actions d'un acteur humain interagissant avec des objets du monde virtuel. Nos travaux ne visent pas à reproduire l'intelligence humaine, mais plutôt à se doter d'un langage de description qui s'interface entre les modèles d'activités finalisées, et la technologie de génération de comportements ou de suivi de l'apprenant. La question complémentaire qui sera posée plus loin réside dans la définition des processus et des architectures permettant l'exécution de ces modèles.

Dans ce chapitre, après avoir décrit les formalismes existant en informatique et en ergonomie cognitive pour décrire les activités finalisées, nous décrirons le formalisme HAWAI-DL (Human Activity and Work Analysis for sImulation-Description Language) que nous avons proposé.

1.3 Etat de l'art

Le rôle de l'informaticien dans la conception des environnements virtuels est souvent central : il est l'interface entre l'environnement virtuel et les experts (du domaine, formateurs, etc.). En effet, dans ces environnements virtuels, l'activité humaine, lorsqu'elle est modélisée, est représentée directement avec les formalismes interprétables par la machine. Ces derniers sont bien souvent complexes et seuls les informaticiens peuvent les manipuler. Pour faciliter sa compréhension du monde et de l'activité qu'il modélise, l'informaticien est amené à discuter avec les experts, à éventuellement se rendre sur le terrain, à étudier des documents décrivant les scénarios et à les transcrire dans son langage. Ces documents sont souvent des textes écrits résultant d'analyses réalisées par des concepteurs de formation qui connaissent très bien la tâche, le domaine, etc. Toutefois s'il l'on s'intéresse à des systèmes de suivi de l'apprenant ou de génération de comportements de personnages virtuels autonomes, dans ces situations d'apprentissage, le point de vue sur l'activité humaine doit être analysé de manière précise. Cette analyse ne peut pas se faire uniquement à partir de discussions avec les experts. En effet, des écarts existent souvent avec les pratiques réellement opérées sur le terrain et les représentations mentales des opérateurs de terrain. Ces écarts ne peuvent être observés qu'à partir d'analyses terrain. Ce type d'analyse est une des spécialités de l'ergonomie cognitive qui dispose de langages, type modèles de tâche pour décrire les activités effectives observées sur le terrain (HTA [Annett, 2003], GTA [vanderVeer, 1996]). Mais ces modèles ne sont pas encore interprétables directement par la machine. L'idée est donc de pouvoir proposer aux ergonomes, concepteurs de formation, des outils faciles à manipuler pour des non-experts et directement interprétables.

1.3.1 Approche informatique

En informatique, plusieurs formalismes graphiques ou mathématiques ont été proposés pour modéliser le comportement d'humains virtuels (réseaux à propagation de marques, automates, réseaux de Petri, etc.). Ces formalismes dépendent essentiellement du **traitement** qui en est fait, e.g. sélection d'action versus planification pour la génération de comportements de personnages virtuels, comportements

déterministes ou non-déterministes, comportements cognitifs ou réactifs, avec ou sans suivi de l'apprenant, scripts exhaustifs et déterministes pour le mannequin virtuel avec vue à la 3e personne ou sans script pour une vue à la 1ère personne , etc. Selon ce traitement, il n'est pas toujours nécessaire de pouvoir **raisonner** sur le modèle. Il n'est pas toujours nécessaire, non plus de pouvoir reproduire ou prendre en compte des aspects facteurs humains, on parle alors de comportements **anthropomorphiques** mais pas nécessairement **d'activité humaine finalisée**.

1.3.1.1 Modélisation de l'activité humaine avec des systèmes à base de règles

Les systèmes à base de règles modélisent le comportement humain en associant des conditions de réalisation aux actions. Les conditions sont exprimées sous forme de règles « Si… Alors… ». Les actions dont les conditions sont satisfaites sont mises en concurrences. Il est alors possible d'ajouter des priorités pour sélectionner les actions les plus importantes/pertinentes. Les règles peuvent être organisées sous-forme d'un arbre de décision. Des systèmes de parcours d'arbre (e.g. systèmes experts) permettent de faire de la résolution de problème. Ce type d'approche permet d'exprimer relativement simplement les actions. Néanmoins, ces systèmes sont difficiles à maintenir à cause de la vérification de la cohérence du système lors d'ajout/suppression de règles. Par ailleurs, si ces représentations permettent de décrire le fonctionnement du système et des actions possibles, elles ne sont pas vraiment adaptées pour rendre compte de l'activité effective observée sur le terrain.

1.3.1.2 Modélisation de l'activité humaine avec des automates

Modélisation de l'activité humaine avec des automates hiérarchiques parallèles

[Badler, 1995] a proposé l'utilisation d'automates parallèles avec des PAT-NETS pour décrire le comportement de personnages virtuels. La description parallèle permet de décrire des comportements très complexes. Inspiré de cette approche, [Donikian, 2004] propose de décrire les comportements de personnages virtuels au moyen d'automates hiérarchiques parallèles avec le modèle HPTS (Hierarchical Parallel Transition System). A chaque niveau de la hiérarchie, l'automate père peut posséder plusieurs rôles : un rôle de supervision de l'exécution de ses fils ou un rôle de synthèse d'un comportement par filtrage et/ou fusion des propositions calculées par ses fils [Donikian, 2004]. Ces automates s'exécutent en parallèle afin de simuler les activités humaines simultanées, comme le fait de parler tout en marchant. Les PAT-NETS permettent de contrôler une animation dans laquelle des mouvements peuvent être amorcés, interrompus ou modifiés en fonction d'événements et de conditions, c'est-à-dire au gré des transitions entre les états des automates. HPTS permet aussi de prendre en compte des notions temporelles et ainsi d'introduire une forme d'indéterminisme lors du choix des transitions [Lamarche et Donikian, 2009]]. HPTS++ permet de gérer la notion de priorités, de ressources et de degré de préférence [Lamarche, 2003]. HPTS++ permet de gèrer les ressources (ensemble des comportements compatibles et coordonnables), l'adaptation et les niveaux de priorité (coefficient indiquant l'importance du comportement et représentant l'adéquation/activation ou l'inadéquation/inhibition entre comportement et contexte associé à chaque automate). Il est extrêmement puissant pour gérer les problèmes d'inter-blocage des ressources (exclusion mutuelle) et de gestion d'importance relative des comportements.

Ros Smach

Ros Smach[1] est un langage qui permet d'exécuter des plans complexes et d'écrire des machines à états complexes et très puissantes. C'est un langage opensource et libre. Son utilisation couvre un large champ d'application : manipulations par des robots, reconnaissance d'objet, planification de trajectoires de robots, reconnaissance de mouvements de la main et des doigts pour la Kinect etc. Un aspect très séduisant vient du fait qu'une grande communauté de chercheurs en robotique l'utilise : UPenn, USC, Berkeley, USC, MIT, Stanford, Georgia Tech, etc. Ros Smach est très efficace pour décrire des machines complexes comme des comportements robotisés ou pour animer des mannequins à partir de reconnaissance de mouvement type Kinnect. Mais il est moins adapté si l'on souhaite représenter des comportements « humanisés », plus complexes. En effet, la variabilité humaine et la prise en compte des

[1] http://www.ros.org/ et http://www.ros.org/wiki/executive_smach

facteurs humains est alors très difficile à modéliser avec des machines à états. Par ailleurs, Ros Smach n'a pas de modèles de connaissances et il est donc difficile de raisonner sur des modèles d'activité produits avec ce type de langage.

LORA

[Gerbaud et Arnaldi, 2009] dans le cadre du projet GVT, se sont intéressés à des scénarios collaboratifs/coopératifs entre humains réels et humains virtuels. Les auteurs ont proposé un moteur de scénario et le langage LORA [Mollet *et al.*, 2006], [Mollet *et al.*, 2007]. *« Le scénario est la transcription en langage d'une procédure de référence idéale, détaillée par un manuel technique provenant d'un industriel »* [Gerbaud et Arnaldi, 2009]. Le scénario est représenté à l'aide d'automates non-déterministes hiérarchiques et parallèles. Les auteurs s'intéressent à la répartition des actions entre les différents acteurs et le langage permet de décrire des actions potentiellement collaboratives. Des personnages virtuels autonomes au profil collaboratif seraient donc « incités » à collaborer. Les auteurs proposent ainsi une représentation formelle de cette collaboration et un moteur de sélection d'action pour la génération des comportements des personnages virtuels autonomes. Les auteurs s'intéressent aussi à la notion d'interblocage. Bien qu'il s'agisse uniquement de comportements idéaux, cette approche est très intéressante pour représenter des collaborations simples. Les auteurs aussi se limitent à des contraintes temporelles simples : séquence, parallélisme et attente. Pour eux, les relations temporelles définies par [Allen, 1983] ne sont pas adaptées pour un apprenant réel car elles le contraindraient trop à respecter l'ordre défini. Pourtant il ne s'agit pas tant de vouloir contraindre l'opérateur réel à respecter l'ordre temporel, mais à donner des indications plus fines au moteur de suivi de l'apprenant. Il est bien entendu clair que préciser ces relations temporelles ne doit pas restreindre l'exécution du scénario à la seule application de ces contraintes. Le moteur de contrôle du scénario devrait être indépendant de la description de l'activité et pouvoir s'adapter.

1.3.1.3 Réseaux de Petri

Un réseau de Petri est un formalisme graphique s'appuyant sur des outils mathématiques. Au départ, ils étaient dédiés à la modélisation des systèmes à événements discrets. Selon [Palanque, 1992] « *un réseau de Petri modélise un système par un ensemble de variables d'état (appelées places et représentées graphiquement par des ellipses) et par un ensemble d'opérateurs de changement d'état (appelés transitions et représentées par des rectangles)* ». Un réseau modélise l'évolution potentielle du dialogue ou d'une tâche de la façon suivante : chaque action de l'utilisateur est associée avec une ou plusieurs transitions du réseau (le nom de l'action est alors inscrit à l'intérieur de la transition). Une action peut être déclenchée si au moins une des transitions qui lui est associée est franchissable (i.e. chacune des places d'entrée de la transition contient au moins un jeton). Si l'action ne peut pas être déclenchée (aucune des transitions qui lui sont associées n'est franchissable). Un réseau de Petri permet de représenter les tâches séquentielles, alternatives (choix d'une tâche parmi plusieurs) et itératives.

Les réseaux de Petri ont une définition formelle et une capacité à décrire les contraintes temporelles très intéressantes. Par contre, ils sont complexes à utiliser et à relire, et ils sont plus adaptés à la formalisation des tâches de plus bas niveau (les tâches élémentaires ou les actions). Et comme les automates, les réseaux de Petri deviennent difficiles à lire dès que la tâche représentée devient un peu plus complexe. De plus, les réseaux de Petri ne permettent pas de modéliser la notion d'interruption, ce qui impose donc de considérer ces dernières comme des tâches optionnelles. Cette approche est adaptée pour décrire le fonctionnement de systèmes en termes de performance ou de fiabilité. Cependant selon [Lucquiaud, Scapin *et al.*, 2002], cette approche ne convient pas aux exigences antagonistes de la validité et de l'expression de l'activité. Elle semble en effet, trop décorellée de la réalité contextuelle de l'activité.

1.3.1.4 VEHA

Il est parfois utile de pouvoir discuter à plusieurs autour du modèle et **confronter différents points de vue** (e.g. experts domaine, formateurs, informaticiens, etc.). Si l'informaticien est l'interface entre ces différents experts, c'est à lui de s'assurer de la cohérence de tous les points de vue et de représenter toutes les connaissances nécessaires à la conception de l'environnement virtuel (e.g. fonctionnement du système, activité humaine, règles pédagogiques, etc.). Dans l'idée de conception participative, où chaque expert participe activement à la conception de l'environnement virtuel, des outils auteur

permettraient à chacun de pouvoir entrer ses modèles et de les confronter aux autres selon des vues différentes compréhensibles par chacun. La cohérence pourrait être alors discutée entre les experts. Certains auteurs français ont proposé des outils de ce genre comme VEHA, développé par l'équipe LISyC de l'ENIB [Chevaillier *et al.*, 2009]. Dans les faits, le formalisme reste un formalisme informatique et c'est toujours l'informaticien qui saisit les modèles. Ces formalismes permettent à l'informaticien de montrer les modèles et de les confronter aux avis des experts. VEHA a l'avantage d'avoir une **interface graphique** intéressante.

A notre connaissance, les auteurs de VEHA ne parlent toutefois pas d'activité humaine et de prise en compte de la dimension facteurs humains. VEHA permet essentiellement de décrire : les concepts du domaine, les interactions sur les objets et les comportements des objets. Les comportements humains sont décrits uniquement du point de vue de l'interaction possible sur les objets avec HAVE [Marion, 2010]. Les comportements sont vus comme des diagrammes d'activité UML. Le modèle BEHAVE permet lui de décrire l'organisation des rôles et des collaborations au sein d'un collectif. Les « rôles » au sens de BEHAVE sont en réalité des personnes (e.g. chef, équipier, conducteur) à qui on attribue des « activités » et des « affectations » (personnages virtuels autonomes ou avatars).

1.3.1.5 Conclusion

Même si les formalismes tels que les automates rencontrent un grand succès dans le domaine de l'animation comportementale, notamment grâce à leur puissance d'expression, ils ne permettent pas toujours la prise en compte des facteurs humains et il est difficile de représenter un raisonnement humain. L'inconvénient non négligeable de ce type de modélisation est que l'on ne peut pas prendre en compte les caractéristiques de l'utilisateur ou du personnage virtuel autonome ainsi que sa propre représentation de la tâche. Par ailleurs, hormis les automates hiérarchiques, les modèles de tâche sont souvent illisibles dès que la tâche décrite devient un peu complexe : la taille des automates ou des réseaux de Petri augmentant de manière exponentielle en fonction de la taille de l'application, ils deviennent illisibles même par un spécialiste. De plus, un automate ou un réseau de Petri permet de représenter les erreurs mais d'une manière qui rend délicate son interprétation. Enfin, le pouvoir d'abstraction de ce type de représentation est faible.

La plupart du temps, que ce soit pour le suivi d'apprenant ou la génération de comportements de personnages virtuels autonomes, les langages utilisés sont proposés et renseignés par des informaticiens. Saisir ces modèles nécessite un temps considérable et n'est pas une tâche aisée tandis que l'activité humaine finalisée est le principal objet d'étude en ergonomie. Dans le chapitre suivant, nous allons donc voir quelles méthodologies ont été proposées en ergonomie cognitive pour décrire les activités humaines finalisées.

1.3.2 Approche ergonomique

En ergonomie cognitive, différentes méthodologies ont été développées pour l'étude du travail, de ses conditions de réalisation et des stratégies et modes opératoires observables sur le terrain. Quels que soient les termes utilisés pour qualifier ces méthodologies (e.g. analyse du travail, analyse de l'activité ou encore analyse de la tâche), elles ont en commun de viser la production des données nécessaires à la modélisation de l'activité humaine finalisée ; en ergonomie, on parle de modèle de l'activité ou encore de modèle des tâches au sens de tâches effectives [Leplat et Hoc, 1983]. Ce modèle formalise une partie des résultats du travail d'analyse de l'ergonome, en décrivant ce que font les opérateurs, ce qu'ils prennent réellement en compte dans l'environnement et ce qu'ils mobilisent comme ressources pour atteindre leur but. La variété des domaines et des objectifs d'intervention de l'ergonomie a contribué au développement de nombreux formalismes pour décrire les tâches tels que HTA [Annett, 2003], MAD [Scapin et Bastien, 2001], GOMS [Card, Moran et Newell, 1983], GTA [vanderVeer *et al.*, 1996], etc. Comme nous l'avons décrit dans [Burkhardt et al, 2009], nous allons présenter un descriptif des concepts similaires proposés dans les langages de modélisation GTA, HTA et MAD.

1.3.2.1 Langages de modélisation de l'activité humaine : GTA, HTA et MAD

Trois langages de modélisation parmi les principaux, en termes de popularité dans le monde de l'ergonomie et de diversité d'usage, sont HTA (Hierarchical Task Analysis [Annett, 2003]) pour la formation, MAD* (Méthode Analytique de Description des tâcheS utilisaTeur orienté spécificAtion

d'inteRface [Baron *et al.*, 2006], [Scapin et Bastien, 2001]) pour la spécification d'interfaces utilisateurs (MAD*) et GTA [vanWelie et van der Veer, 2003] pour la conception de collecticiels.

HTA est une méthode de description orientée tâches qui propose de décomposer hiérarchiquement une tâche en sous tâches. Cette décomposition est logique plutôt que psychologique/cognitive, i.e. elle n'a pas l'ambition de refléter la manière dont l'opérateur se représente mentalement sa tâche.

MAD*, contrairement à HTA, et de façon analogue à GTA, vise à représenter la dimension hiérarchique de la planification dans l'activité humaine. En ce sens, la décomposition des éléments de la tâche en sous-tâches n'est pas une simple décomposition logique mais a pour ambition de refléter la structure des représentations mentales de l'opérateur expert de la tâche. Toutefois, ce reflet est essentiellement lié à la méthode d'analyse et de recueil des données permettant la construction du modèle de la tâche, et non pas à l'utilisation du seul formalisme.

Contrairement aux deux langages précédents, GTA n'est pas uniquement centré sur la tâche. En effet, le monde est considéré selon 3 points de vue différents : les agents, le travail et la situation. Un modèle GTA est composé de quatre éléments outre la tâche : les objets (i.e. entités concrètes ou abstraites utilisées par des agents ou des rôles), les agents (i.e. les entités qui réalisent des tâches), les rôles (i.e. ensemble de tâches) et les événements (i.e. un changement dans l'état du monde à un moment donné et sur lequel un agent n'a pas de contrôle direct).

Des concepts ou des notions similaires pour décrire les activités humaines finalisées se retrouvent dans les principaux langages ergonomiques. Ces langages opèrent une certaine catégorisation des informations au sein de la description, notamment en lien avec les propriétés du formalisme et la méthodologie d'analyse adoptée. Ces concepts sont :

- La tâche est une ressource associée à un but à atteindre en lien avec un agent «moyen». La tâche renvoie à (1) ce qu'un opérateur fait (travail réel), ou (2) doit faire (travail prescrit) pour atteindre un objectif. Le terme tâche (ou opération si l'on considère un niveau plus fin et élémentaire de description de l'action) se réfère plutôt au travail réel et peut se définir comme « *toute unité de comportement pouvant être définie en termes de son objectif* » [Annett et Duncan, 1967]. Dans une perspective psychologique, les opérations peuvent concerner aussi bien des objets et des actions observables (e.g. *appuyer sur un bouton, soulever un portique*) mais également des activités voire des objets cognitifs (e.g. *calculer le nombre de pièces restantes, comparer la courbe de pression à un modèle mental de la courbe attendue, etc.*). La notion d'objectif est par conséquent centrale en ce qu'elle constitue l'un des critères pour définir une tâche. Le but est assimilé à « l'état du système » que l'opérateur désire atteindre en réalisant la tâche. Dans les différents modèles, cette notion est systématiquement exprimée en termes de but de la tâche. Il est important de souligner que les analyses étant rarement réalisées auprès d'un seul opérateur, l'entité figurée dans les modèles fournis ne correspond donc pas une personne en particulier mais plutôt à une personne abstraite « reconstruite » par l'analyste ;

- La tâche peut être décomposée en sous-tâches pour rendre explicite la liste des activités potentiellement réalisées. Quel que soit le langage, la liste des sous-tâches associées à une tâche mère est une catégorie d'information communément distinguée. Cette liste ou ensemble des sous-tâches potentiellement attachées à une tâche résulte directement de la décomposition hiérarchique de la tâche. Cela est vrai dans HTA où la relation de décomposition est définie comme devant être strictement logique, mais également aussi pour MAD où la relation se réfère plutôt à une décomposition selon la représentation mentale qu'a l'opérateur de sa tâche. Selon les langages considérés, la nature et les frontières de la décomposition de la tâche en sous-tâches peuvent varier. Toutefois, tous ont en commun de définir formellement l'association entre une tâche et la liste de ses sous-tâches ;

- La tâche est contrainte par une manière de faire et par ses conditions d'exécution. La seule liste des tâches ne fournit pas d'information directe concernant la manière de faire en situation, c'est-à-dire l'organisation chronologique, la façon et les conditions dans lesquelles toutes ou des parties des sous-tâches peuvent être réalisées. Qu'il s'agisse de générer un comportement ou de le suivre, il est donc nécessaire de rendre compte des contraintes sur l'ordonnancement des tâches et sous-tâches ainsi que le périmètre de réalisation de la tâche. Deux options coexistent

pour décrire ces informations, lesquelles sont illustrées par deux des principaux langages actuels. La première (e.g. HTA) consiste à la décrire sous la forme d'un plan ayant pour fonction de rendre explicites les conditions (quand et selon quelles séquences les sous-tâches doivent être réalisées). Le plan est décrit au moyen d'une syntaxe et de composants du langage dédiés inspirés des notations de type algorigramme (Figure 1).

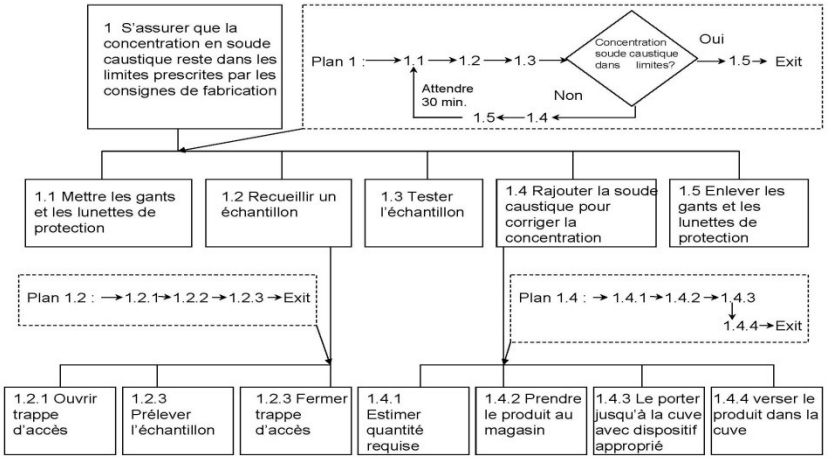


Figure 1 : Exemple d'une partie de tâche décrite à l'aide de HTA [Patrick, 1992]

La seconde (e.g. MAD*, Figure 2) consiste, d'une part, à utiliser un constructeur parmi une liste de 8 constructeurs prédéfinis (Tableau 1) et, d'autre part, à exploiter des attributs associés à la tâche telles que les préconditions ou les post-conditions.

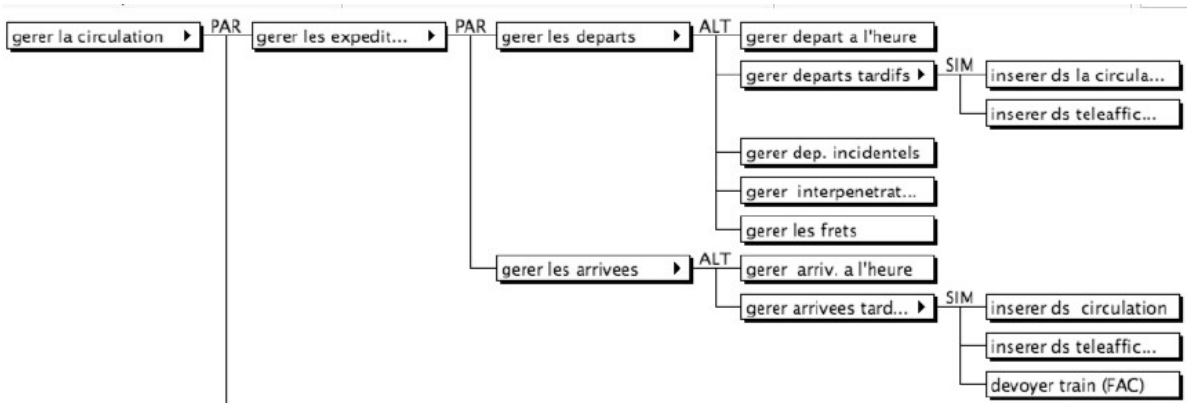


Figure 2 : Exemple d'un extrait de description hiérarchique utilisant MAD [Alonso, 1997]*

Constructeur	Signification
Séquentiel	Les sous-tâches sont exécutées dans l'ordre. La tâche est finie lorsque toutes les sous-tâches sont finies ou ignorées (sous-tâches facultatives).
Parallèle	Les sous-tâches sont exécutées dans n'importe quel ordre et elles ne partagent pas leurs données. La tâche est finie lorsque toutes les sous-tâches sont finies ou ignorées (sous-tâches facultatives).
Simultané	Les sous-tâches sont exécutées en même temps par n utilisateurs. La tâche est finie lorsque toutes les sous-tâches sont finies ou ignorées (sous-tâches facultatives).
Et	Les sous-tâches sont exécutées dans n'importe quel ordre et elles partagent leurs données. La tâche est finie lorsque toutes les sous-tâches sont finies ou ignorées (sous-tâches facultatives).
Ou	Les sous-tâches sont exécutées dans n'importe quel ordre. La tâche est finie lorsque au moins une des sous-tâches obligatoires a été réalisée.
Alternative	Une seule des sous-tâches est exécutée.
Elémentaire	Signale qu'une tâche ne possède pas de sous-tâche.
Inconnu	Utilisé lorsque on ne sait pas quel constructeur choisir.

*Tableau 1 : Description des constructeurs utilisés pour ordonnancer les sous-tâches d'une tâche MAD**

Quel que soit le langage utilisé, un aspect important est de rendre compte de la variabilité, observable sur le terrain, dans la manière dont travaillent des opérateurs différents - ou encore un même opérateur à des moments différents - pour atteindre les objectifs associés à la tâche. Le

choix entre l'une ou l'autre des manières de faire dépend en effet tout à la fois de la configuration du monde dans laquelle se déroule la tâche à un instant donné (objets et opérateurs disponibles, état du monde, organisation du travail, etc.) et tout à la fois de facteurs propres à l'opérateur (compétences, préférences, fatigue, etc.) ;

- Une tâche peut être réalisée en coopération. Un opérateur peut avoir un ou plusieurs rôles correspondant à un ensemble cohérent de tâches. Seul GTA utilise explicitement les deux notions de rôle et de tâches, ainsi que les relations qu'elles entretiennent. Ce langage est, par conséquent, le seul à permettre de décrire certains aspects collectifs du travail comme la co-action, la co-activité, la coopération, la collaboration (pour ces notions voir notamment [Garza, 2000]). Il propose pour cela, d'une part de s'appuyer sur la notion de «tâches déclenchées» et, d'autre part, de décrire la collaboration entre acteurs au moyen d'un diagramme de flux (workflow) (Figure 3). Ces solutions trouvent toutefois des limites dès lors qu'il s'agit de décrire une coordination complexe entre plusieurs agents. Dans l'approche proposée par MAD, la collaboration est uniquement décrite par l'intermédiaire d'un champ (agent) qui permet d'étiqueter à l'intérieur d'un arbre, le (ou les) agents qui ont la responsabilité de réalisation de telles ou telles sous-tâches ;

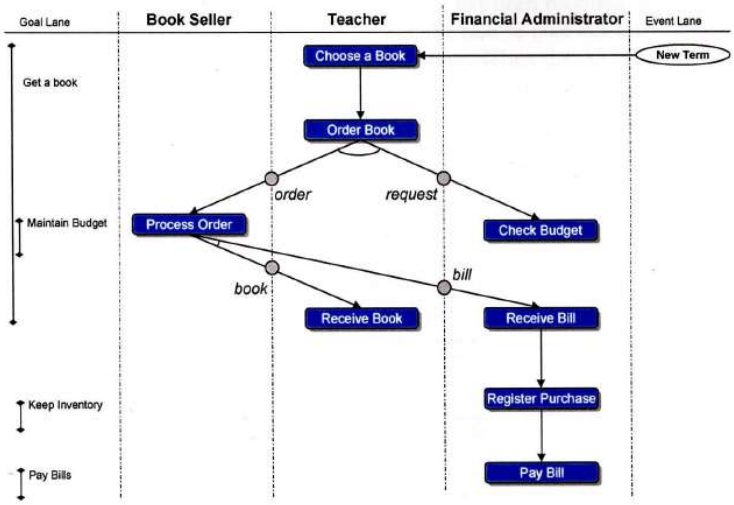


Figure 3 : exemple de workflow de la commande d'un nouveau livre avec GTA

- La réalisation d'une tâche implique une constante interaction de l'opérateur avec l'environnement qui évolue en parallèle de l'activité développée. D'un côté, la réalisation d'une tâche peut modifier le monde dans lequel l'agent travaille. De l'autre côté, le monde influence la réalisation d'une tâche et est susceptible d'évoluer du fait d'événements extérieurs aux actions de l'agent. Or de nombreux langages de description s'appuient sur la description des tâches pour rendre compte de nombre de contraintes de réalisation qui sont normalement « encapsulées » dans l'environnement et les objets sur lesquels ou avec lesquels les opérateurs (inter)agissent. Un premier point est que, hormis MAD*, les langages en ergonomie ne proposent pas de décrire formellement les objets du monde. Un second point est que formaliser les modifications du contexte lié à la tâche implique de décrire le contexte avant et après que la tâche ait été exécutée. La modélisation de l'influence du contexte sur l'exécution des tâches nécessite par conséquent la description des éléments qui :
    - modifient la manière dont la tâche est réalisée, concourant alors en partie à exprimer une forme de variabilité dans la tâche ;
    - sont indispensables à la réalisation d'une tâche, i.e. sans ces éléments, la tâche ne peut être réalisée (notion de condition d'exécution) ;
    - déclenchent immédiatement une tâche ;
    - autorisent ou non l'arrêt d'une tâche.

- Enfin, seul GTA permet de décrire le déclenchement d'une tâche n'importe où dans l'arbre à partir d'une autre tâche, par le biais d'un mécanisme d'appel (trigger task). Le langage propose d'utiliser ce mécanisme pour décrire d'une part des tâches collaboratives entre plusieurs agents, et d'autre part les tâches subordonnées à des événements non directement liés aux actions des agents (réels ou virtuels) au sein de l'environnement virtuel.

1.3.2.2 Conclusion

Ces formalismes possèdent des propriétés intéressantes pour le suivi de l'apprenant ou la génération de comportements de personnages virtuels autonomes. Cependant, ils ne peuvent être exploités directement de manière automatique par des modules informatiques. À l'heure actuelle, aucun langage ergonomique de description de l'activité humaine ne permet de définir l'ensemble des éléments nécessaires à l'animation comportementale et au suivi de l'apprenant. En outre d'un point de vue pratique pour la construction d'une simulation, plusieurs autres limites que celles déjà indiquées ont été identifiées. Parmi ces limites, on peut noter l'absence d'héritage, l'absence de typage entre préconditions et enfin la nécessité de formaliser un workflow de façon coordonnée aux autres éléments descriptifs de la tâche : les objets et la hiérarchie des buts. Il est donc nécessaire d'aller plus loin, tout en s'inspirant des langages existants en ce qu'ils permettent déjà de décrire un premier sous ensemble de propriétés importantes de l'activité humaine finalisée.

1.4 Vers une chaîne de modélisation de l'activité finalisée à partir d'analyse de l'activité des opérateurs

L'approche que nous avons développée dans le cadre du projet APLG puis de la plateforme PERF-RV2 diffère des exemples précédents. En effet, elle vise à formaliser et outiller une chaîne de modélisation de l'activité finalisée à partir des analyses de l'activité des opérateurs.

1.4.1 Projet APLG : le modèle METISSE pour le suivi de l'apprenant

Dans le cadre du projet APLG (Atelier Pédagogique Logiciel Générique) que j'ai coordonné (2003-2006), notre objectif était de proposer une bibliothèque logicielle pour la réalité virtuelle pour le suivi de l'apprenant, la détection d'erreur et les rétroactions pédagogiques. Dans ce cadre, nous avons proposé à N. El-Kechaï, alors en thèse au LIUM de formaliser un langage de description de l'activité pour le suivi de l'apprenant et la génération de traces à partir de modèles ergonomiques. N. El-Kechaï a ainsi proposé le Modèle de dEscription de Tâches orienté assIStance et Suivi de l'apprEnant- METISSE- [El-Kechaï, 2007]. METISSE est une méthode de description de tâches adaptée de MAD*. La description ainsi produite a pour ambition de modéliser la tâche que doit réaliser l'apprenant (tâche prescrite) afin de pouvoir mesurer automatiquement les écarts avec ce qu'il fait effectivement (tâche effective) lorsqu'il interagit avec un Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain.

Les constructeurs en METISSE sont les mêmes qu'en MAD sans la notion de ALT qui a été remplacée par l'une des caractéristiques de la primitive méthode.

1.4.2 Plateforme PERF-RV2 : couplage YALTA et HAWAI-DL

Dans le cadre de la plateforme PERF-RV2, avec le LATI et l'équipe Bunraku de l'IRISA, notre objectif visait à établir une passerelle entre les sorties de certains des logiciels utilisés en ergonomie et un nouveau langage de modélisation de l'activité humaine à partir duquel il est possible de générer d'une part, des comportements de personnages virtuels autonomes et d'autre part, un système de suivi de l'apprenant pour générer des traces et des rétroactions. Durant les deux premières années du projet, l'étape 1 (Figure 4) a été mise en œuvre successivement au moyen de deux langages de description hiérarchiques (MAD* et GTA ; cf. section précédente) manipulés dans des éditeurs associés (Kmade et Euterpe). Les évolutions de ces langages, en vue de répondre aux besoins propres à PERF-RV2 et à ceux des projets V3S et FIANNA ont amené à proposer le langage HAWAI-DL (Human Activity and Work Analysis for sImulation-Description Language décrit dans le chapitre suivant Chapitre : 1.5).

HAWAI-DL permet de décrire un modèle d'activité interprétable pour le suivi de l'apprenant et pour la génération de comportements de personnages virtuels autonomes. Dans PERF-RV2, la génération des comportements des personnages autonomes a été réalisé par l'équipe Bunraku de l'IRISA. Ainsi, dans l'étape suivante du projet (Figure 4), l'équipe Bunraku transforme et traduit le modèle d'activité

HAWAI-DL au moyen d'un langage appelé **YALTA** (Yet Another Language for Task Analysis). L'étape suivante de la génération consiste à créer, à partir de la description des activités finalisées dans le langage YALTA, la bibliothèque d'automates utilisée pour la simulation.

Adaptation des diagrammes d'activité d'UML 2, YALTA propose une représentation formelle du résultat de l'analyse ergonomique sous la forme de graphes acycliques orientés, ce qui le différencie des principaux langages ergonomiques tels que MAD* ou GTA, qui proposent une représentation en arbre. Dans YALTA, l'ordonnancement d'une tâche est représenté sous la forme d'un graphe orienté composé de flux et de nœuds. Un flux permet de décrire l'enchaînement de deux nœuds et un nœud est une étape d'activité (contrôle, exécution, connexion, communication) (Figure 5). Un éditeur a été développé de façon à assister l'utilisation du langage et intègre de surcroît l'édition des informations associées aux objets de l'environnement virtuel [Rouillé *et al.*, 2008].

L'analyse systématique de l'existant a permis de mettre en lumière un certain recouvrement entre les modèles de tâches utilisés en ergonomie et les modèles de comportements utilisés en animation comportementale [Burkhardt, 2007]. En particulier les systèmes de transitions parallèles hiérarchiques sont apparus suffisamment proches des modèles ergonomiques pour permettre à l'équipe Bunraku d'envisager la génération automatique de comportements. HPTS++ [Donikian, 2001], [Lamarche, 2002] est, semble-t-il, le seul système de transitions parallèles hiérarchiques qui intègre un langage de spécification couplé à un générateur de code. Il a donc été choisi pour permettre l'exploitation des modèles YALTA. Un objectif de YALTA est ainsi la génération automatique de bibliothèques de comportements HTPS++ à partir d'une description de l'activité finalisée par un ergonome. Comme YALTA reste un langage informatique, les ergonomes ont encore des difficultés à l'utiliser. Ce langage est très efficace et très lisible. Un grand nombre d'activités complexes à modéliser avec d'autres langages est facilement traduisible avec YALTA. YALTA aurait pu être un langage très adapté pour nos travaux, mais nous devions pouvoir ajouter des propriétés relatives à la sécurité et aux facteurs humains au modèle. YALTA n'est pas un langage opensource et ne permet pas de définir de nouvelles propriétés. Ce langage a été transféré à la société GOLAEM[2] et est aujourd'hui commercialisé sous le nom de *Golaem Activity*.

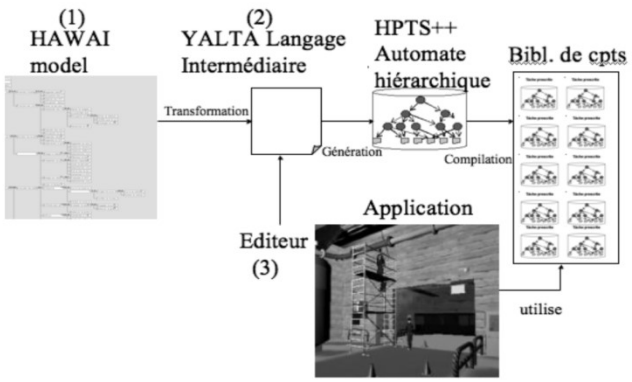


Figure 4 : Schéma de principe pour la génération de comportements de PVA (PERF-RV2)

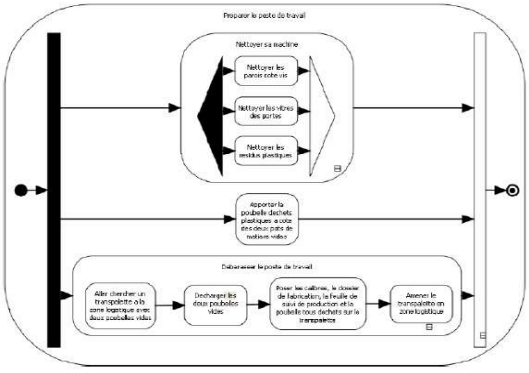


Figure 5 : Exemple de description d'une tâche avec YALTA

1.5 Notre approche

Si nos travaux dans APLG et PERF-V2 étaient centrés sur le suivi de l'apprenant, V3S et FIANNA ont visé à la fois le suivi de l'apprenant et la génération de comportements de personnages virtuels autonomes au sein d'une même application. Notre objectif était de pouvoir disposer d'un langage de description de l'activité qui permette :

1) de raisonner sur l'activité,
2) de prendre en compte des aspects facteurs humains et
3) aux ergonomes de décrire l'activité humaine finalisée à partir d'analyses terrain.

[2] http://www.golaem.com/

Nos travaux visaient donc à adapter les formalismes directement utilisés par les ergonomes pour les interpréter de manière automatique par nos systèmes informatiques. Ce travail nécessite un travail transdisciplinaire entre informaticiens et ergonomes. Il s'agit de « *partir de théories ou connaissances en sciences humaines et sociales amenant à considérer des situations pédagogiques informatisées où l'environnement informatique a un effet (comme support à la tâche, comme milieu véhiculant une intention didactique, etc.) et qui abordent les difficultés qu'il y a (processus techniques) à construire des logiciels présentant les propriétés souhaitées* » [Tchounikine, 2009]. Ces travaux ont été menés en étroite collaboration avec Jean-Marie Burkhardt du LATI de l'Université Paris Descartes [Burkhardt et Lourdeaux, Rouillé *et al.*, 2009], [Lourdeaux et Burkhardt, 2009], etc.

Nous avons proposé une première version du langage de description HAWAI-DL (Human Activity Work Analysis for sImulation – Description Language) avec Jean-Marie Burkhardt, Stanislas Couix (LATI), Lydie Edward (personnages virtuels autonomes) et Kahina Amokrane (suivi de l'apprenant). HAWAI-DL est initialement hérité des langages MAD (Modèle Analytique de Description des Tâches) et de GTA (Groupware Task Analysis). Une seconde version, appelée ACTIVITY-DL a été proposée visant une formalisation du langage avec Camille Barot (scénarisation), Margaux Lhommet (émergence de comportements collectifs) et Vincent Lanquepin (étudiant UTC) [Lourdeaux, Barot et Lenne, 2011].

1.5.1 Positionnement de notre approche

La spécification du modèle HAWAI-DL a nécessité d'examiner les besoins et plusieurs contraintes qui pouvaient être incompatibles entre elles : les aspects génération de comportements des personnages virtuels autonomes et les aspects suivi de l'apprenant. Nous avons aussi étudié la question de la conception collaborative et des points de vues croisés afin de rendre le modèle utilisable par des informaticiens comme des non-informaticiens. Ainsi, nous avons défini chaque propriété du modèle et pour chaque besoin nous avons cherché à déterminer quelle solution était la mieux adaptée (propriété commune aux langages informatiques et ergonomiques, propriétés MAD, GTA, HTA, nouvelle propriété, etc.). On trouvera en Annexe VI.1, la description détaillée de toutes les propriétés. Nous décrivons ici, pour exemple, les réflexions qui nous ont animées sur certaines de ces propriétés :

- **Ordonnancement des tâches** : si une tâche peut être décomposée en sous-tâches, il faut pouvoir organiser ces sous-tâches selon une organisation ou des contraintes d'ordre. L'ordonnancement logique des tâches doit aussi définir les conditions de réalisation de la tâche mère par rapport à ses tâches filles.
    - Pour les PVA : les contraintes d'ordre en planification de tâche peuvent être déduites à partir des préconditions des tâches. Par exemple, pour pouvoir « *ouvrir la porte* », la « *porte doit être déverrouillée* ». La tâche qui a pour effet « *porte déverrouillée* » est la tâche « *déverrouiller porte* ». L'agent doit pouvoir exécuter cette tâche avant d'ouvrir la porte. Dans notre cas, le choix s'étant porté sur un langage ergonomique, la planification des tâches est en partie réalisée de manière explicite dans l'arbre (via la décomposition hiérarchique et l'ordonnancement temporel des sous-tâches) et en partie de manière implicite via les liens qui sont faits entre préconditions et effets des tâches. Si cela, n'enlève pas le besoin de formaliser les préconditions, l'ergonome spécifie les contraintes d'ordre entre les tâches et le module de génération des comportements des personnages virtuels autonomes peut alors faire de la sélection d'action ;
    - Pour le suivi de l'apprenant : le système de suivi de l'apprenant doit pouvoir savoir si l'apprenant respecte les contraintes d'ordonnancement ou temporelles entre les tâches, etc. ;

    Propriété proposée : comme dans GTA, HTA ou MAD, chaque tâche complexe est dotée d'un opérateur d'ordonnancement, **constructeur**, qui détermine l'ordre de réalisation de ses sous-tâches. Pour simplifier le travail des ergonomes, nous avons, dans un premier temps, conservé une équivalence des constructeurs classiquement utilisés dans les langages ergonomiques : séquentiel (**SEQ**), alternatif (**ALT**), parallèle (**PAR**), etc. (voir Tableau 3 p29). Mais ces constructeurs ne permettent pas de représenter d'une manière pertinente tous les cas de description notamment les cas particuliers dans une activité

complexe et notamment les contraintes temporelles. Nous avons donc travaillé, dans un deuxième temps, sur la formalisation de constructeurs permettant de représenter les relations temporelles d'Allen ;

- **Préconditions** : une tâche peut être réalisée dans certains contextes. Dans les langages ergonomiques et informatiques, chaque tâche possède des préconditions :
  - Pour les PVA : dans GTA et MAD, ces préconditions correspondent aux conditions dans lesquelles l'environnement doit se trouver pour réaliser la tâche. Par exemple, pour « *démonter le groupe motopompe* », « *l'électricité doit être coupée* ». Dans le cas de tâches séquentielles, le PVA devrait pouvoir chercher à rendre vraie ces préconditions pour réaliser cette tâche. Dans le cas de tâches alternatives, le PVA choisira la tâche dont les préconditions sont vraies. Mais, nous souhaiterions pouvoir exprimer d'autres types de préconditions. En effet, certaines conditions ne sont pas *nécessaires* pour la réalisation de la tâche, par exemple, « *avoir son casque* » pour « *monter à l'échafaudage* » est *réglementaire*, mais la tâche peut se réaliser même sans casque. Par ailleurs, certaines tâches ne devraient être réalisées que dans certaines conditions. Par exemple, « *nettoyer l'équipement* » ne doit se faire que si « *l'équipement est sale* ». Si « *l'équipement est sale* » est une condition traitée comme une condition *nécessaire*, on voit alors que le PVA cherchera à la rendre vraie, ce qui n'a pas de sens. Enfin, certaines tâches ne sont réalisées que dans certains contextes connus seulement par des experts. Par exemple, si le contremaître a précisé que « *les tuyaux étaient vides* » avant de le démonter, seuls les experts savent qu'ils ne sont jamais complètement vides et seuls ces derniers pensent à « *purger les tuyaux* ». Ainsi, si l'on veut rendre compte de comportements experts, les PVA doivent pouvoir raisonner sur des connaissances et donc des conditions différentes de celles des novices. La question qui se pose alors est comment différencier ces différents types de préconditions ?
  - Pour le suivi de l'apprenant : le système de suivi pourrait *a priori* se contenter de détecter une erreur de précondition si l'apprenant réalise une tâche alors que le contexte de réalisation n'est pas respecté. Cependant, si l'on souhaite pouvoir préciser le type d'erreur et les différentes conséquences (e.g. ne pouvant s'effectuer, possibilité de risques, etc.), alors il est utile de différencier les types d'erreurs. Aussi, s'il est utile de pouvoir déterminer que l'apprenant a un comportement erroné, il est aussi intéressant de savoir quel comportement il aurait dû ou devrait avoir. Le comportement à montrer à un apprenant n'est pas forcément le comportement expert car selon le contexte, le formateur peut souhaiter montrer un comportement différent. Cette « *préférence* » ou « *contexte favorable* » avait été envisagé dans METISSE ;

  Propriétés proposées : comme on le voit, générer des comportements de PVA, qui plus est, rendre compte de comportements cognitifs, et faire du suivi de l'apprenant, n'impliquent pas les mêmes besoins. Aussi si l'on souhaite utiliser le même langage pour répondre à ces deux problématiques, il faut évaluer les situations sous chaque facette et voir si une solution valable pour l'une l'est aussi pour l'autre. En prenant en compte toutes ces contraintes, nous avons proposé de différencier les préconditions suivantes : les conditions qu'il faut/faudrait rendre vraies pour effectuer la tâche (e.g. les conditions *nomologiques/nécessaires* liées au fonctionnement du système et les conditions *réglementaires*) et les conditions qui permettent de choisir entre plusieurs méthodes/alternatives ou de savoir si l'action est envisageable ou non dans une situation donnée (e.g. conditions *favorables/contextuelles*) (voir Tableau 4 p29). Par ailleurs, pour chaque type de préconditions, nous avons ajouté le marqueur « expert » qui indiquerait si les experts prennent en compte cette condition ;

- **Travail collectif, collaboratif, coopératif et co-activités** (voir définitions dans le glossaire IX): nous nous intéressons à des activités collaboratives et des co-activités, où chaque opérateur a des rôles précis et uniques et des rôles qui peuvent être partagés. Contrairement à BEHAVE [Marion, 2010] qui considère les rôles comme des personnes à qui on attribue des « activités » et

des « affectations », nous souhaitons différencier les agents des rôles qu'ils peuvent jouer au sein de l'organisation du travail. En effet, plus d'un agent peut jouer le même rôle et un agent peut jouer plusieurs rôles au même moment. Un opérateur va avoir un ou plusieurs rôles correspondant à un ensemble cohérent de tâches et donc une activité peut être jouée par plusieurs rôles. Nous souhaitons aussi que l'apprenant puisse jouer n'importe quel agent et que les autres soient joués par des personnages virtuels autonomes.

- Pour les PVA : nous souhaitons rendre compte d'opérateurs qui suivent correctement leur rôle mais aussi d'opérateur qui outrepasseraient leur rôle soit pour gagner du temps soit pour stopper un risque ;
- Pour le suivi : comment permettre à notre système de savoir si l'apprenant fait bien la tâche qui lui est attribuée ? Est-ce que la tâche qu'il a effectuée fait partie de son rôle ? Est-ce qu'il outrepasse son rôle et que cela provoque un risque ou au contraire s'il ne l'avait pas fait des événements critiques seraient survenus ?

Propriété proposée : Dans HAWAI-DL, nous avons choisi le même principe que dans GTA mais pour le moment la visualisation graphique du workflow n'est pas opérationnelle. Dans HAWAI-DL, un rôle est un ensemble cohérent de tâches (e.g. « *démonter le tuyau* », « *remettre en circuit l'installation* », etc.). Les agents représentent des personnes ou peuvent également représenter des systèmes informatiques. Un agent se caractérise par des compétences et une identité particulières (tels que « *agent de maîtrise* », « *opérateur*, « *agent de maintenance* », « *chaudronnier* », etc.) dont le nom choisi pour le représenter au sein de l'environnement virtuel visera à en rendre compte. On peut affecter des rôles aux agents selon leurs responsabilités (e.g. seul l' « *agent de maîtrise* » peut « *remettre en circuit l'installation* », mais par contre « *démonter le tuyau* » peut être réalisé par l' « *opérateur* », l' « *agent de maîtrise* », etc.). Ensuite, il suffit d'affecter à l'apprenant l'agent qu'il représente et les personnages virtuels autonomes joueront les autres. Cela permet d'avoir une organisation claire des activités regroupées en ensembles cohérents et de leurs liens avec les rôles.

Les besoins détaillés Annexe VI.1,sont résumés dans le tableau ci-dessous :

PVA	Suivi	Propriétés
Savoir comment atteindre un but	Savoir quel but il cherche à atteindre	**Décomposition hiérarchique**
Déterminer des buts/tâches indépendantes du but principal	Savoir s'il poursuit le même but	**Tâches mères indépendantes**
Déterminer l'ordonnancement des actions	Savoir s'il fait dans le bon ordre, s'il n'oublie pas une tâche, etc.	**Constructeur**
Déterminer le contexte de réalisation, i.e. l'état du monde	Savoir s'il fait dans les bonnes conditions	**Préconditions**
Déterminer quelle tâche faire en cas d'urgence	Savoir s'il réagit quand il faut	**Caractère d'urgences**
Déterminer si la tâche est en adéquation avec ses caractéristiques personnelles	Evaluer les performances de l'apprenant selon les caractéristiques de l'application	**Marqueur (tag)**
Déterminer l'objet cible	Savoir s'il travaille sur le bon objet cible	**Objet Cible**
Déterminer la ressource nécessaire	Savoir s'il utilise la bonne ressource	**Ressource**
Voir si le but est atteint	Savoir s'il a atteint le but recherché	**Effets**
Savoir quand stopper la tâche	Savoir s'il a stoppé la tâche comme il faut	**Conditions d'arrêt**
Déterminer les tâches qu'il a à faire	Savoir si c'était bien à lui de le faire	**Rôle, Agent**

Tableau 2 : Besoins et propriétés pour la description d'activité

1.5.2 Notre modèle pour la description de l'activité : HAWAI-DL

Comme dans GTA, HAWAI-DL considère le monde sous trois points de vue différents (agent, travail, situation de travail) décrits par six concepts principaux : les tâches, les rôles, les agents, les objets, les événements et les buts. Ces concepts et les relations entre eux constituent le modèle de HAWAI-DL.

Deux versions d'HAWAI-DL ont été proposées : une première lors des thèses de Kahina Amokrane et Lydie Edward et une seconde lors de la thèse de Camille Barot. Nous décrivons ici cette dernière.

1.5.2.1 Tâches

La tâche représente une action/opération à effectuer par l'opérateur afin d'accomplir l'opération plus globale. La tâche à donc un effet *a posteriori* sur l'environnement. Une suite de tâches représente le plan de l'opérateur afin d'atteindre son but. Un but peut être l'atteinte ou le maintien d'un état souhaité de l'environnement, ou bien la réalisation d'une action particulière. Une tâche est soit élémentaire (tâche feuille), soit décomposable (tâche mère). Les tâches mère permettent d'organiser l'activité de manière hiérarchique (tâches filles), temporelle (constructeurs temporels) et logique (conditions d'arrêt). Les tâche feuilles correspondent au plus bas niveau de granularité dans la description et renvoient à l'exécution d'une action dans l'environnement. Une tâche est constituée de trois parties distinctes : le noyau, les relations avec le monde et le lien avec les objectifs.

1.5.2.2 Constructeurs

La manière de réaliser une tâche, i.e. « *comment* » elle est réalisée, est exprimée dans un premier temps au travers de la décomposition hiérarchique. Mais cette décomposition ne donne pas l'ordre dans lequel les sous-tâches doivent être effectuées. Dans une première version d'HAWAI-DL, nous avons utilisé les constructeurs GTA (SEQ, ALT, etc.) Puis, dans une seconde version, nous avons séparé l'organisation logique et l'organisation temporelle. L'organisation logique est décrite avec des **opérateurs logiques** classiques (AND, OR, XOR) et l'organisation temporelle des sous-tâches avec des **constructeurs** représentés à l'aide des relations d'Allen. Pour faciliter la saisie et améliorer la lisibilité HAWAI-DL contient un ensemble de constructeurs prédéfinis, correspondant à des aggrégats de relations d'Allen couramment utilisés (Figure 6, Tableau 3). Il est également possible d'exprimer l'ordonnancement temporel entre des sous-tâches par toute autre combinaison de relations d'Allen.

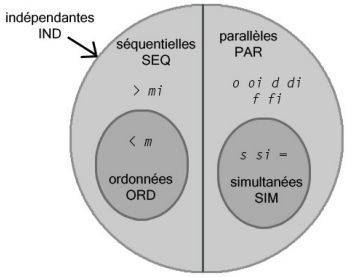


Figure 6: constructeurs logiques dans HAWAI-DL

Constructeur			Description
Indépendantes (IND)			tâches indépendantes temporellement ; pas de contraintes d'ordonnancement particulières (=ensemble des relations d'Allen) A { <, >, m, mi, o, oi, s, si, d, di, f, fi, =} B
	SEQ		tâches exécutées les unes à la suite des autres, sans recouvrement, mais peuvent être exécutées dans n'importe quel ordre A { <, >, m, mi } B
		SEQ_ORD	tâches exécutées les unes à la suite des autres, sans recouvrement, dans un ordre spécifique A { <, m } B
	PAR		tâches ayant au moins un point de recouvrement, où elles sont exécutées en parallèle A { o, oi, s, si, d, di, f, fi, = } B
		PAR_SIM	tâches commençant et se terminant en même temps A { = } B
		PAR_START	tâches commençant en même temps A { s, si } B
		PAR_END	tâches se terminant en même temps A { f, fi } B

Tableau 3 : Description des constructeurs pour ordonnancement des sous-tâches dans HAWAI-DL version 2

1.5.2.3 Conditions

Les conditions testent un ensemble **d'assertions** et peuvent être vraies ou fausses. Les assertions permettent d'exprimer ou de tester un élement de connaissance. La connaissance peut être liée à un état

du monde (e.g. ressort cassé), à une opération (e.g. l'action dégrippée a été réalisée avec succès), au système (e.g. il fait beau) ou composée des autres connaissances).

Les conditions correspondent au contexte de l'environnement dans lequel la tâche pourra se déclencher, se réaliser ou s'arrêter (conditions indispensables au déclenchement, à l'obtention des effets escomptés ainsi qu'à l'arrêt d'une tâche). Ce monde correspond à l'ensemble des objets manipulés par les tâches Par exemple, la réalisation de la tâche « *réparer la fuite* » va être exécutée uniquement si une fuite est présente. Autrement dit, l'attribut « *fuite* » de l'objet « *tuyau* » est vrai. Nous distinguons les préconditions et les conditions d'arrêt.

Les **préconditions** permettent de préciser le contexte dans lequel la tâche doit/peut être réalisée. Elles sont exprimées à partir d'assertions sur l'état du monde, les actions déjà réalisées et/ou les propriétés du système (météo, heure, etc.). Les préconditions vont être utilisées différemment, par exemple :

- Les préconditions que l'on va chercher *à rendre vraies* pour pouvoir effectuer l'action :
  - Les préconditions *nomologiques*[3] correspondent à l'état dans lequel le monde doit se truver pour la tâche soit physiquement réalisable. Elles dépendent directement des règles d'exécution de l'action liée à la tâche, définies dans le modèle du fonctionnement du système (e.g. : *pour réaliser la tâche « ouvrir la porte », il faut que la porte soit fermée*). Dans une seconde version d'HAWAI-DL, ces conditions ont été déportées dans le modèle de domaine ;
  - Les préconditions *réglementaires* correspondent aux états du monde nécessaires à la bonne réalisation de la tâche selon la procédure. (e.g. : *il faut ses lunettes de protection pour manipuler le bras*) ;
- Les préconditions *à examiner* qui déterminent quelle action choisir, servant au choix entre plusieurs méthodes pour la réalisation d'une tâche donnée, ou à savoir si une action est envisageable ou non dans la situation donnée :
  - Les préconditions *contextuelles* : certaines tâches ne s'effectuent que dans un contexte particulier et peuvent être ignorées le reste du temps. Par exemple, *la tâche purger le tuyau ne sera effectuée que si celui-ci n'est pas vide, autrement la tâche pourra être ignorée*. On utilise donc une condition contextuelle qui teste l'état du tuyau pour décider si l'agent (apprenant ou PVA) doit purger le tuyau ou non ;
  - Les préconditions de *favorables* : certaines tâches sont plus favorablement réalisées dans un contexte particulier, par exemple *si le boulon est rouillé, la réalisation de la tâche « dégripper le boulon » est à privilégier*. Les conditions favorables permettent donc d'apporter un peu plus de finesse dans la description des usages.

Propriétés		Description
Préconditions Conditions à rendre vraies	Nomologique	Etat du monde, dicté par des lois réelles, et physiquement constitutif de l'environnement où se déroule l'activité, sans lequel celle-ci ne peut avoir lieu dans les conditions attendues dans un environnement naturel. Si cet état n'est pas réalisé la tâche ne peut pas être faite
	Réglementaire	Conditions nécessaires à la bonne réalisation de la tâche selon la procédure, si elles ne sont pas vraies selon ne bloquent pas l'exécution de la tâche
Préconditions à examiner	Contextuelle	La tâche sera plus applicable selon un certain contexte. Si le contexte n'est pas vrai, la tâche ne sera pas à réaliser
	Favorable	L'exécution de la tâche est préférable selon le contexte donné

Tableau 4 : préconditions et conditions d'arrêt d'une tâche dans HAWAI-DL

Les **conditions d'arrêt** permettent de préciser quand la tâche doit être arrêtée (atteinte des conséquences, assertions sur le monde, nombre d'itérations, durée). Pour les tâches mères, on peut également définir l'arrêt de la tâche en fonction de la réalisation des tâches filles (opérateurs logiques

[3] Le terme nomologique vient de la défition proposée par [Goel, 1992] dans le domaine de la psychologie cognitive : « *Nomological constraints are constraints dictated by natural law*»

AND, OR, XOR).

1.5.2.4 Conséquences attendues ou postconditions

Les conséquences attendues (souvent appelées postconditons) correspondent au but dans lequel la tâche est exécutée. Elles sont représentées sous forme d'assertions, directement sélectionnables à partir du modèle du monde.

1.5.2.5 Marqueurs

Pour permettre une plus grande modularité à notre modèle, de catégoriser et mettre en valeur certaines tâches/préconditions selon les besoins des applications, nous avons choisi de permettre aux utilisateurs du modèle de placer des **marqueurs** sur les tâches elles-mêmes ou sur les préconditions. Ces marqueurs peuvent être prédéfinis ou définis selon les besoins de l'application. Des marqueurs ont été prédéfinis comme l'expertise (expert+, expert-), le but principal (focus, voir Annexe VI.1) ou la sécurité (voir chapitre suivant). Il est possible de créer à la volée des types de préconditions et des marqueurs personnalisés selon le type d'application (e.g. politesse, hygiène, etc.). Les marqueurs peuvent éventuellement être associés à une valeur (valeur numérique ou chaîne de caractères). Il s'agira ensuite de déterminer les règles d'interprétation associées à ces propriétés dans les modules décisionnels.

1.5.2.6 Editeur

A partir du logiciel Euterpe (éditeur GTA) et des spécifications particulières de HAWAI-DL, nous avons proposé l'éditeur Visual-HAWAI. Une première version très proche d'Euterpe a été proposée (Figure 7) [Perney, 2007], [Bouslama et al., 2009]. Puis, suite à des évaluations ergonomiques [Gosse, 2008] et aux nouvelles spécifications pour la prise en compte de la logique temporelle nous avons proposé une seconde version (Figure 8) [Lanquepin et al., 2011]. L'éditeur permet une sortie XML du modèle d'activité pour permettre un traitement automatique par nos modules informatiques.

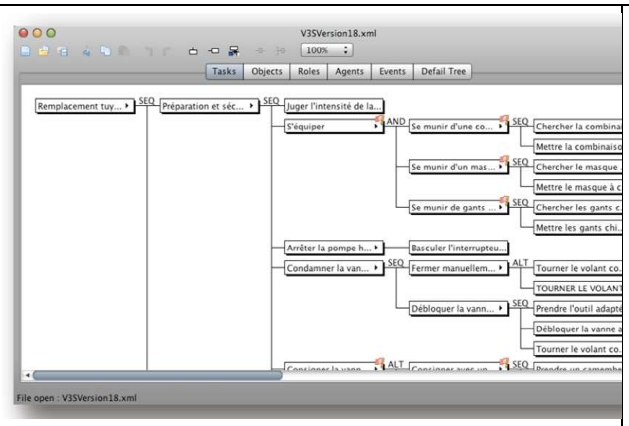


Figure 7: Vue du logiciel Visual HAWAI v1

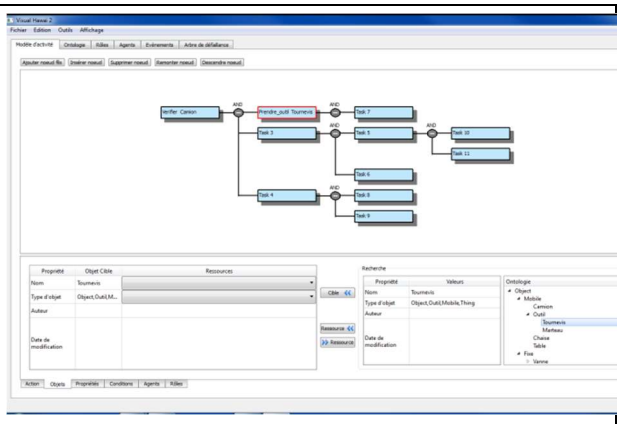


Figure 8 : Vue du logiciel Visual HAWAI v2

1.6 Conclusion

Le domaine de la modélisation du comportement humain est vaste, varié et multi-paradigmatique [Burkhardt, Lourdeaux *et al.*, 2009]. En particulier, les objectifs propres à chaque perspective disciplinaire et les finalités en termes de développement sont très variées. Il en découle que les critères pour évaluer les langages et architectures proposés pour aider l'exploitation de modèles cognitifs dans la simulation et les environnements virtuels vont dépendre en grande partie des usages et utilisateurs ciblés. Par exemple, le but essentiel associé à l'utilisation de modèles du comportement, pour le développeur, est de pouvoir programmer directement un but ou un comportement abstrait, plutôt que de devoir spécifier une succession d'action ou d'états correspondants [Moreau, 2003].

Pour répondre à ces besoins, nous avons proposé un langage de description de l'activité HAWAI-DL qui présente les caractéristiques nécessaires pour permettre à nos modules informatiques de raisonner sur l'activité humaine. La même description du modèle de l'activité produit avec ce langage est exploitable à la fois pour générer des comportements de personnages virtuels autonomes et pour suivre l'activité de l'apprenant. L'idée forte que nous défendions était de proposer aux ergonomes un langage

de description proche des langages ergonomiques pour décrire des activités humaines finalisées à partir d'analyses terrain. Le modèle d'activité produit par les ergonomes est alors une vue possible d'un modèle plus large sur le système global. Cette idée est rendue possible grâce au modèle conceptuel adjacent au langage de représentation de l'activité HAWAI-DL.

2 Comment décrire l'activité en situation dégradée ?

Bien souvent, les personnages virtuels autonomes rendent compte de comportements en situation normale. Ces comportements sont « *robotisés* » et peu « *humains* ». Par ailleurs, les apprenants ne peuvent pas toujours s'écarter de la procédure nominale et dès qu'ils s'en écartent, leur comportement est considéré comme une erreur. Cependant, il y a toute une palette de comportements entre le comportement idéal et l'erreur.

Les modèles de référence représentent, la plupart du temps, les **comportements corrects/experts** que doit réaliser l'humain réel dans une situation particulière. Ils représentent les comportements idéaux attendus que les experts devraient mettre en œuvre [Gerbaud, 2008], [Querrec, 2002]. Parfois les environnements intègrent des modèles d'erreurs qui décrivent les comportements non experts comme des erreurs [Buche, 2005]. Quelques environnements proposent des modèles de références qui intègrent des personnages virtuels autonomes dotés de **comportements erronés** [Pavard, 2000], [Gardeux, 2005]. Nous nous sommes alors intéressés aux comportements qui ne sont ni des comportements experts ni des erreurs en tant que telles. Nous avons cherché à rendre compte de comportements que certains opérateurs peuvent mettre en place lorsque des habitudes de travail s'installent, ou lorsque la situation se dégrade. Dans ce cadre, la question qui nous intéresse est comment formaliser l'activité en situation dégradée ?

2.1 Définitions

Les violations sont des infractions à une loi, à un règlement, à une règle de sécurité ou à un interdit concernant la sécurité [Vidal-Gomel, 2001]. Ces violations sont intentionnelles. Erreurs et violations peuvent être définies comme des écarts à la norme. C'est l'intentionnalité qui les différencie. Non intentionnels, les écarts peuvent être attribués à la méconnaissance, à l'inexpérience [Reason, 1990]. Ils relèvent de l'erreur. Les violations intentionnelles, en excluant les cas de malveillance ou de négligence, sont des prises de risques telles que définie par [Guoguelin, 1988]. En effet, on peut considérer que la règle est conçue pour gérer un risque d'accident [Vidal-Gomel, 2001].

[Amalberti, 2001] juge la violation comme étant le résultat d'un compromis cognitif permettant d'agir et donc potentiellement de réduire les risques tout en préservant une charge de travail utile et nécessaire pour continuer l'activité. Nous nous intéressons aux violations réalisées par les opérateurs en situation dégradée. Nous parlerons de la notion d'erreurs aux chapitres III.2.3.6 et III.3.2.2.3.

2.2 Etat de l'art : les Activités et Conditions Limites Tolérées par l'Usage

Le modèle de la cognition dynamique de [Amalberti, 1996] montre que les opérateurs disposent de métaconnaissances leur permettant de savoir **quels risques ils sont en mesure de gérer** et, quelles situations doivent être évitées parce qu'ils ne les maîtrisent pas suffisamment ; ainsi que d'établir des **priorités** entre les différentes tâches.

[Rasmussen, 1997] a développé l'idée de **frontières de la sécurité** qui sont franchies par des contraintes extérieures qui font dévier les opérations normales vers les limites de sécurité du système. La dynamique du système tend à évoluer au sein de ces frontières, de par les décisions et actions des acteurs en interaction à tous les niveaux, et qui parfois les dépassent et provoquent des accidents.

Selon [De la Garza et Fadier, 2007], tout système socio-économique subit des migrations vers des zones de fonctionnement moins sûres du point de vue de la performance et de la sécurité. Les accidents surviennent lorsque les **niveaux de tolérance sont dépassés** et conduisent à des processus irréversibles [Rasmussen, 1997]. [De la Garza et Fadier, 2007] montrent que ces migrations ne font toutefois pas l'objet de retour d'expérience (REX) systématiques ayant pour but l'intégration de la sécurité dans les processus de conception. Dans la majorité des cas, le retour d'expérience s'intéresse aux pannes, incidents techniques, accidents et erreurs ayant eu des conséquences sur le système. Peu de travaux

s'intéressent aux situations de « presqu'accidents », de récupération d'incidents et encore moins au bon fonctionnement du système réel.

Dans ses travaux en ergonomie et dans le domaine de la fiabilité humaine, [De la Garza et Fadier, 2005] propose les concepts **d'Activités Limites tolérées par l'Usage** (ALU) et de **Conditions Limites Tolérées par l'Usage** (CLU). Pour De la Garza, « *Les Activités Limites tolérées par l'Usage (ALU) sont définies comme des activités de compensations résultant de réélaborations de règles qui consistent en des ajustements face à des exigences ou à des perturbations du travail. D'un point de vue cognitif, ces réélaborations mettent en jeu des diagnostics de situations et des processus décisionnels orientés, soit vers la modulation de règles prescrites intégrées dans l'activité, soit vers l'élaboration d'une stratégie opportuniste qui se veut adaptée à une nouvelle situation. Cependant, elles sont considérées comme « limites » car elles résultent de compromis d'acteurs différents pouvant fragiliser la sécurité* ». Les Conditions Limites Tolérées par l'Usage (CLU) permettent de rendre compte des régulations opérées sur le terrain réel amenant la migration des conditions d'utilisation des outils et des modes de réalisation de la tâche vers des zones de compromis affectant la sécurité. L'opérateur s'écarte de l'activité prescrite pour atteindre des compromis différents : prioriser la production et le temps aux dépens de la sécurité ; par exemple, prioriser la sécurité et le temps aux dépens de la quantité de production, etc. Toutes ces déviations sont éventuellement tolérées sur un site donné, et ne peuvent apparaître que chez un expert ; en effet, elles traduisent le résultat d'un compromis local et souvent informel entre les acteurs, compromis établi par exemple entre un objectif fixé pour la production et les autres prescriptions susceptibles de la diminuer (e.g. sécurité, procédure qualité). Elles sont susceptibles d'engendrer des risques.

2.3 Positionnement de notre approche

En partant du cadre théorique et méthodologique des Activités Limites Tolérées par l'Usage (ALU), nous avons souhaité intégrer dans HAWAI-DL, des propriétés permettant aux ergonomes lors de l'analyse d'activité de mettre en évidences ces ALU.

Concernant les personnages virtuels autonomes, nous souhaitons pouvoir simuler, avec des coordinations explicites les différents facteurs ayant une influence sur une situation de travail où plusieurs opérateurs réalisent une activité. Les facteurs sont notamment les procédures et règles (barrière organisationnelle), le niveau de compétences des acteurs, le nombre d'acteurs, les contraintes temporelles et environnementales de la tâche, etc. Nous souhaitons montrer comment des experts, lorsqu'ils sont soumis à des dégradations de la situation (e.g. pressions temporelles) sont amenés à faire des compromis entre sécurité et productivité.

Concernant le suivi de l'apprenant, les ALU ne peuvent normalement pas être observées chez un apprenant dans la mesure où celui-ci présente encore un fort ancrage dans la prescription apprise en formation et n'a pas encore été confronté à la nécessité de décider sur la base de tels compromis. Nous souhaitons aborder des environnements virtuels pour l'apprentissage humain pour des apprenants novices (formations initiales) mais aussi pour des apprenants expérimentés (formations de rappel). Ainsi, par exemple : pour un expert, travailler avec un produit chimique sans mettre ses équipements de protection individuelle pour gagner du temps est considéré comme un problème d' « Activité Limite d'Usage Tolérée » (ALU) si elle est couramment observée sur un site donné. L'expert a conscience du risque encouru et pense certainement pouvoir le maîtriser. Inversement chez un novice, le même comportement pourra être considéré comme relevant d'une défaillance du point de vue de la connaissance des prescriptions de sécurité, ou encore d'un défaut de diagnostic de risque vis-à-vis de la situation rencontrée. Nous souhaitons alors considérer cet écart pour un novice comme une erreur puisqu'elle n'est pas intentionnelle.

Nous souhaitons donc pouvoir caractériser certaines tâches comme ALU, ou violations intentionnelles ayant un fort risque, lorsqu'il s'agit d'experts et comme des erreurs s'il s'agit de novices.

2.4 Notre approche : intégration des ALU et des CLU dans HAWAI-DL

Ces besoins de représentation des ALU nous ont amené à intégrer dans HAWAI-DL des propriétés permettant de rendre compte de tâches tolérées ou non selon certaines conditions. L'arbre est une description des cheminements possibles de l'activité de chacun des opérateurs et vient se superposer sur ce qui est règlementairement obligatoire, ce qui est éventuellement localement toléré (ALU).

Comme pour le modèle HAWAI-DL, nous avons travaillé en étroite collaboration avec les ergonomes du LATI de l'Université Paris Descartes. Nous avons souhaité distinguer les « *tâches interdites qu'il est autorisé de réaliser* » (e.g. « *couper les vis avec une meuleuse* ») des « *tâches obligatoires qu'il est toléré de ne pas réaliser* » (e.g. *mettre son équipement de sécurité*). Ces tâches peuvent être autorisées ou tolérées seulement dans certaines conditions (nommées CLU). Par exemple, il peut être toléré de ne pas « *purger les tuyaux* » s'ils contiennent de l'eau. Il y a aussi des tâches qui sont strictement interdites, « *non-autorisées* ». Elles pourraient ne pas être spécifiées dans le modèle de tâches et seraient ainsi considérées comme des erreurs. Les ergonomes souhaitent pourtant en intégrer certaines dans le modèle de tâches, car elles sont tout de même observées et ne relèvent pas de migrations autorisées par le site et surtout peuvent provoquer des risques sérieux (e.g. « *utiliser un téléphone portable* »). Enfin, il y a des tâches liées à la sécurité, qui peuvent être tolérées ou non, et qui peuvent être faites ou non pour éviter un risque plus important que le risque direct qu'elles engendrent (e.g. « *ne pas mettre son équipement pour aller sauver quelqu'un* »). Dans ce cas, ces tâches sont notées comme tâches relatives à la sécurité, éventuellement ALU, mais ne seront pas considérées comme des erreurs au même titre que d'autres. Ainsi, nous proposons les distinctions suivantes :

Propriétés liées à la sécurité		Signification
	Tâche relative à la sécurité	Cette tâche a un rôle sur les risques. Il s'agit d'une barrière pouvant arrêter ou prévenir un risque
	Instruction de sécurité	Cette tâche est une règle de sécurité prescrite
	ALU+	La réalisation de cette tâche est une déviation faite par les experts du domaine sur certains sites. Sa réalisation peut engendrer un risque
	ALU-	La non-réalisation de cette tâche représente une déviation faite par les experts du domaine sur certains sites. Sa non-réalisation peut engendrer un risque
	Tâche non-autorisée	Cette tâche est interdite sur site
	CLU	Ce champ indique les conditions dans lesquelles, il peut être toléré de réaliser ou non cette tâche sur certains sites

Tableau 5 : Description des propriétés ALU et CLU dans HAWAI-DL

Souvent, les préconditions réglementaires peuvent être mises en correspondance avec la réalisation ou non des tâches « ALU », e.g. la tâche « *monter à l'échafaudage* » a pour précondition réglementaire « *équipements personnels de sécurité mis* ». Cette précondition correspond à la postcondition de la tâche « *mettre ses équipements personnels de sécurité* » qui est une ALU-.

2.5 Conclusion

Nous avons mis un fort accent sur la modélisation de l'activité humaine en situation normale et en situation dégradée. Notre objectif est de différencier les activités réelles des activités prescrites et du fonctionnement réel du système. Cette modélisation n'exclut pas la modélisation du domaine. La modélisation de l'activité humaine correspond au point de vue du terrain et la modélisation du domaine au point de vue de la conception du système.

3 Comment formaliser les aspects risques ?

Comme nous l'avons dit, nous nous intéressons plus particulièrement au domaine d'application de la prévention et de la maîtrise des risques. Il s'agissait donc de modéliser ces risques d'un point de vue technique mais aussi d'un point de vue fiabilité humaine. Nous avons, sur ce sujet, travaillé en étroite collaboration avec l'INERIS afin d'intégrer ce type de modélisation. Il s'agissait de pouvoir déterminer quels risques devaient être mis en scène et quelles étaient les causes et les conséquences de ces risques.

3.1 Définitions

Les notions de danger et de risque sont très souvent confondues, le risque étant toujours lié à l'existence d'un danger, ou d'une situation dangereuse. Pour les différencier, on peut dire qu'un danger est réel et un risque potentiel [Iddir, 2008].

Le **danger** est un événement ou une situation suceptibles d'entraîner des dommages pour un ou des opérateurs, ou pour l'environnement [Leplat, 1983]. Cet événement ou cette situation ne sont pas

provoqués de façon intentionnelle.

Plusieurs définitions de la notion de « **risque** » sont couramment admises dans la littérature. Pour [Brehmer, 1987] « l*e risque est la probabilité d'une perte* ». Le risque dépend de :

- « *La probabilité de production de l'événement non désiré et envisageable* » *[Rabardel, 1998]. Cette probabilité peut être évaluée qualitativement et renvoie au risque subjectif : le risque tel que l'opérateur se le représente en fonction de ses connaissances, de ses savoir-faire, autrement dit en fonction de ses compétences. Cette probabilité peut également être évaluée quantitativement. Elle permet alors de définir le risque objectif, qui sert de référence à l'observateur pour identifier les comportements de prise de risque d'un sujet* » [Vidal-Gomel, 2001]. On considère en général que la prise de risque implique que l'opérateur ait conscience du risque qu'il encourt [Goguelin, 1988].
- « *La probabilité qu'un danger s'actualise (c'est-à-dire entraîne effectivement des dommages) dans des conditions déterminées* » [Leplat, 1985]. La probabilité qu'un événement conduise à un accident permet de rendre compte des activités de gestion des risques par l'opérateur. Ces activités seront plus ou moins efficaces en fonction notamment des compétences qu'il sera en mesure de mobiliser. Le risque encouru dans une situation de travail n'est alors pas le même pour tous les opérateurs en fonction de leurs compétences.

« *Dans tout système bien conçu, de nombreuses précautions sont prises pour protéger les acteurs contre les accidents du travail et le système contre un accident majeur, en utilisant une stratégie de défenses en profondeur. Un des problèmes fondamentaux est qu'au sein d'un tel système qui a des défenses en profondeurs redondantes, une violation localisée de l'une des barrières de défenses n'a pas d'effet immédiat ou visible et a des chances de passer inaperçue. Dans cette situation, les frontières de comportements sûrs d'un acteur en particulier dépendent des violations probables des barrières par d'autres acteurs. Ainsi dans les systèmes bâtis sur le principe des barrières de défense en profondeur, les défenses sont susceptibles de se dégrader systématiquement dans le temps, quand la pression vers la rentabilité est dominante* » [Vidal-Gomel, 2001].

La démarche de « **maîtrise des risques** » implique « *d'une part, la production d'une connaissance de la situation dangereuse, de ses causes et de ses conséquences, et d'autre part, l'ensemble des actions mises en œuvre pour maintenir un système à l'intérieur de limites considérées comme acceptables* » [Leroy, 1992]. Ces actions sont appelées : mesures de maîtrise des risques ou barrières de prévention et de protection.

« *Le* ***management des risques*** *correspond à des démarches permettant d'identifier les risques auxquels un système est exposé, d'évaluer ces risques, les hiérarchiser, etc.* » [Camus, 2010].

La **régulation** relève de trois fonctions de l'opérateur : la production (réaliser la tâche principale), la prévention (éviter les pannes, les accidents) et la récupération (faire disparaître les dysfonctionnements). Les caractéristiques des activités des opérateurs qui permettent d'assurer la prévention sont d'une part, les moyens mise à disposition (i.e. les règles de métier et de sécurité) et d'autre part, le diagnostic [Vidal-Gomel, 2001]. Les règles de métier sont contraignantes en définissant ce que l'on attend de chacun dans un contexte social tout en lui garantissant le maximum de marge de manœuvre de liberté, pour pouvoir s'engager à sa manière [Cru, 1995], [Vidal-Gomel, 2001]. Il s'agit de règles non écrites, élaborées par les opérateurs, ce qui les différencient des règles de sécurité. Les règles métier sont des règles élaborées par les opérateurs et marquent l'appartenance à une collectivité de métier. Les règles de sécurité sont des règles écrites qui ont pour but d'éviter la production d'un accident [Leplat, 1998]. Elles sont des aides dans le traitement des situations à risques, et sont également un référent légal qui permet plus ou moins précisément d'établir les responsabilités en cas d'accident. Les règles de sécurité sont parfois conçues par des acteurs différents, à des moments différents et peuvent parfois être : surabondantes et réduire la part d'autonomie des opérateurs, sur-spécifiées et engendrer des conflits entre sécurité et production ou encore incohérentes et engendrer des conflits entre sécurité et contraintes temporelles ou entre sécurité et contraintes économiques.

La **sûreté de fonctionnement** (SdF) d'un système est la propriété qui permet de placer une confiance justifiée dans les services attendus de ce système. La sûreté de fonctionnement est aussi un ensemble de méthodes structurées permettant d'évaluer et d'améliorer cette propriété. Ces méthodes sont indispensables pour la conception et l'exploitation de systèmes de plus en plus compliqués et complexes [Belmonte, 2008]. L'étude du fonctionnement des systèmes complexes repose sur un modèle de fonctionnement du système et de ses composants représenté par un espace d'états.

3.2 Etat de l'art

Il existe de nombreuses méthodes d'analyses de risques. Nous distinguerons les méthodes classiques d'analyse des risques (approche fonctionnement) des méthodes d'analyse de la fiabilité humaine. Enfin nous présenterons l'approche MELISSA, développée par F. Camus en thèse dans notre laboratoire, spécifique à la conception d'environnements virtuels dédiés à la maîtrise des risques.

3.2.1 Méthodes classiques d'analyse des risques dites « techniques »

Un moyen d'identifier les dysfonctionnements d'un système consiste à en décrire les scénarios d'exécution. Un scénario est déterminé à partir des phases du système et de son environnement extérieur. « *La scénarisation est par essence une étude systématique des scénarios possibles et donc des événements qui les génèrent* » [Belmonte, 2008].

Une soixantaine de méthodes d'analyses de risques permettent d'identifier de tels scénarios. Il existe deux grands types d'approches : l'approche inductive et l'approche déductive. Les méthodes d'analyses de risques inductives partent des causes pour identifier les effets. Parmi ces méthodes on trouve : l'analyse préliminaire de risques (APR), l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets (AMDE), et de leur criticité (AMDEC), l'HAZOP (HAZard and Operability studies), etc. L'approche déductive considère la défaillance comme le résultat d'une suite de causes. L'analyse porte sur l'identification des causes susceptibles de conduire à cet état [Debray, 2006]. La principale méthode est l'arbre de défaillances (AdD).

Il existe des méthodes couplant les deux approches comme le nœud papillon. Certaines de ces méthodes peuvent être complémentaires (l'APR se situe avant la méthode HAZOP), ou en concurrence entre elles. Le lecteur intéressé par ces différentes méthodes pourra se référé à [Debray, 2006] ou [Belmonte, 2008]. Ici, nous détaillerons le formalisme nœud papillon que nous ne réutiliserons pas la suite.

La méthode **nœud papillon** est une méthode de quantification du risque majeur. Cette méthode se fonde sur une approche par **barrières** (Figure 9). Ce type d'approche consiste à identifier tous les scénarios d'accidents majeurs envisageables puis à recenser les dispositions de sécurité ou barrières s'opposant au développement de l'accident. L'acceptabilité des risques réside ensuite dans le choix du nombre et de la performance des barrières à installer pour considérer les risques maîtrisés. Le point central du nœud papillon est l'**événement redouté central**. La partie gauche du nœud papillon s'apparente à un **arbre des défaillances** s'attachant à identifier les causes. La partie droite du nœud papillon s'apparent à un **arbre d'événements** et s'attache à déterminer les conséquences.

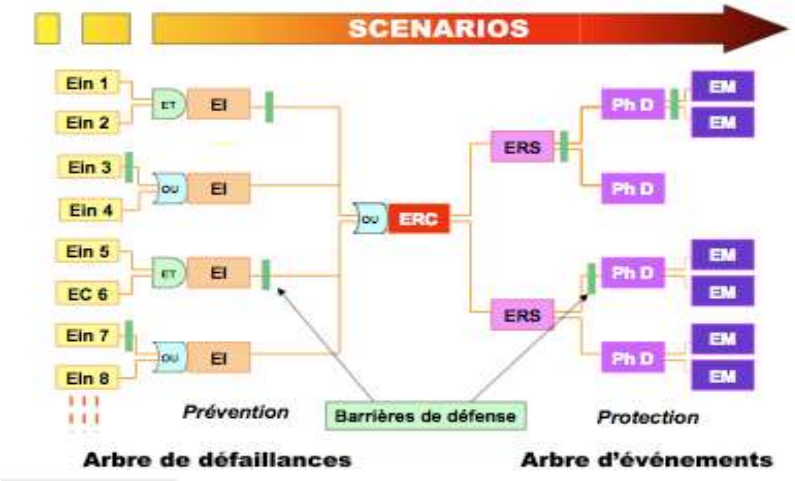


Figure 9: Représentation d'un nœud papillon [Andersen, 2004]

L'**arbre de défaillances** est l'une des premières méthodes d'analyse de risque visant à déterminer l'enchaînement et les combinaisons d'événements pouvant conduire à un *événement redouté*. On parle alors d'analyse par arbre des causes, l'objectif principal étant de déterminer les causes réelles qui ont conduit à l'accident. Cette méthode permet de remonter de cause en cause jusqu'aux événements « *sources* ». Cette méthode représente les résultats d'une manière arborescente, et les liens entre les événements sont réalisés grâce à des portes logiques (ET, OU). L'analyse par arbre des défaillances

permet d'estimer la probabilité d'occurrence d'un événement et de s'assurer que toutes les mesures possibles ont effectivement été envisagées en vue de prévenir le risque associé. L'exploitation de l'arbre des défaillances peut être réalisée de manière qualitative et quantitative. L'exploitation quantitative vise à estimer, à partir des probabilités d'occurrence des événements « sources », la probabilité d'occurrence de l'événement final ainsi que des événements intermédiaires. Il ne s'agit pas d'une démarche qui permet d'accéder avec exactitude à la probabilité de chaque événement. Elle doit être mise en œuvre dans l'optique de hiérarchiser les différentes causes possibles et de concentrer les efforts en matière de prévention sur les causes les plus vraisemblables. En pratique, il est souvent difficile d'obtenir des valeurs précises de probabilités des événements initiateurs.

L'**arbre d'événements** est une méthode qui s'inspire des arbres de défaillances. Contrairement à un arbre de défaillances, un arbre d'événements permet d'estimer les probabilités d'occurrence de séquences accidentelles à condition de disposer de la probabilité d'occurrence de l'événement initial et de la probabilité de défaillance des barrières de sécurité. L'analyse par arbre d'événements suppose la défaillance d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les événements qui en découlent. A partir d'un événement initiateur ou d'une défaillance d'origine, l'analyse par arbre d'événements permet donc d'estimer la dérive du système en envisageant de manière systématique le fonctionnement ou la défaillance des dispositifs de détection, de prévention, de protection, etc.

Les nœuds papillons sont constitués de plusieurs éléments, ici résumés :

Désignation	Signification	Définition	Exemples
EIn	Evènement Indésirable	Dérive ou défaillance sortant du cadre des conditions d'exploitation usuelles définies.	Le surremplissage ou un départ d'incendie à proximité d'un équipement dangereux peuvent être des événements initiateurs
EC	Evènement Courant	Evènement admis survenant de façon récurrente dans la vie d'une installation.	Les actions de test, de maintenance ou la fatigue d'équipements sont généralement des événements courants.
EI	Evènement Initiateur	Cause directe d'une perte de confinement ou d'intégrité physique.	La corrosion, l'érosion, les agressions mécaniques, une montée en pression sont généralement des événements initiateurs
ERC	Evènement Redouté Central	**Perte de confinement sur un équipement dangereux ou perte d'intégrité physique d'une substance dangereuse**	**Rupture, Brèche, Ruine ou Décomposition d'une substance dangereuse dans le cas d'une perte d'intégrité physique**
ERS	Evènement Redouté Secondaire	Conséquence directe de l'événement redouté central, l'événement redouté secondaire caractérise le terme source de l'accident	Formation d'une flaque ou d'un nuage lors d'un rejet d'une substance diphasique
Ph D	Phénomène Dangereux	Phénomène physique pouvant engendrer des dommages majeurs	Incendie, Explosion, Dispersion d'un nuage toxique
EM	Effets Majeurs	Dommages occasionnés au niveau des éléments vulnérables (personnes, environnement ou biens) par les effets d'un phénomène dangereux	Effets létaux ou irréversibles sur la population Synergies d'accident
Barrières ou Mesures de Prévention		Barrières ou mesures visant à prévenir la perte de confinement ou d'intégrité physique	Peinture anti-corrosion, Coupure automatique des opérations de dépotage sur détection d'un niveau très haut…
Barrières ou Mesures de Protection		Barrières ou mesures visant à limite les conséquences de la perte de confinement ou d'intégrité physique	Vannes de sectionnement automatiques asservies à une détection (gaz, pression, débit), Moyens d'intervention…

- Tableau 6: définition des concepts principaux d'un nœud papillon [Andersen, 2004]

[Hollnagel, 1998] considère quatre types de barrières : physiques (liées aux matériels), fonctionnelles, symboliques ou immatérielles. Pour [Miché, 2006], les barrières de sécurité ont généralement une composante technique et une composante humaine. La composante humaine considère l'homme comme étant capable de prévenir ou rattraper les dérives d'un procédé ou d'une activité à risques.

3.2.2 Analyse de la fiabilité humaine

Après des approches d'analyse de risques purement techniques, la prise en compte du facteur humain a été rendue nécessaire par l'importance de l'erreur humaine. Cette prise en compte dans la défaillance des systèmes a connu plusieurs ères : plusieurs modèles et méthodes d'analyse ont été proposées et classifiées jusqu'ici en trois générations.

3.2.2.1 Première génération : l'ère de la prise en compte de l'erreur humaine et du facteur humain

Issus de travaux en ergonomie, et notamment dans la lignée des théories cognitivistes, les méthodes d'analyse de la fiabilité humaine dites de **première génération** se focalisent sur l'individu et les processus mentaux susceptibles de le conduire à l'erreur. Ces méthodes considèrent l'humain au même niveau que les autres éléments du système technique, « *à la seule réserve peut être qu'ils sont influencés par les conditions dans lesquelles ils opèrent et qu'ils disposent d'une forme de redondance intrinsèque : s'ils commettent une erreur ou une action susceptible d'avoir des conséquences néfastes, ils peuvent effectuer une récupération et gérer le danger spontanément. Les humains peuvent être caractérisés par un taux d'erreur a priori, de même que les machines peuvent être caractérisées par un taux de défaillance* » [Belmonte, 2008]. Ces méthodes ont été généralisées après l'accident de Three Mile Island en 1979. Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode THERP (*Technic for human error rate prediction)* [Swain, 1983].

3.2.2.2 Deuxième génération : l'ère organisationnelle

L'accident de Tchernobyl montre que l'on ne peut comprendre ces accidents en se préoccupant que des processus mentaux de l'opérateur, les théories strictement cognitivistes étant impuissantes pour expliquer seules ces types de comportement. Partant de ce constat, les ergonomes vont s'intéresser aux facteurs de contexte qui influencent les processus mentaux de l'individu (stress, fatigue, procédures à disposition, formation reçue, etc.). Les méthodes dites de deuxième génération considèrent la dimension cognitive contextualisée de l'action humaine et séparent clairement le phénomène de l'action erronée de la défaillance sous-jacente. Les défaillances cognitives sont à la source des actions erronées, elle-même comprises comme des actions ayant des conséquences non désirables. Parmi ces méthodes, il existe les méthodes MERMOS [Magne et Vasseur, 2006], AMSMA [Bieder, 2006] et CREAM (détaillée au chapitre III.2.3.6.2).

Dans cette génération on trouve le modèle « *swiss cheese model* » de [Reason, 1997]. Pour cet auteur, l'erreur active de l'opérateur ne se comprend qu'en référence aux erreurs latentes dans les systèmes, erreurs en sommeil, éloignées de l'opérateur et qui tiennent à de mauvaises décisions de conception, de maintenance ou de gestion. Ce modèle vise à comprendre pourquoi les accidents surviennent et à mettre en relief la complexité des relations de cause à effet. Il peut aider à définir qui doit prendre les mesures et lesquelles, afin d'éviter les accidents à l'avenir ou d'atténuer leurs effets. Pour Reason, les défenses, les barrières et les sécurités peuvent être comparées à des « *tranches de gruyère avec des trous* » qui symbolisent les failles dans chaque niveau de défense : défenses technologiques, sécurités liées aux acteurs eux-mêmes, barrières correspondant aux procédures, contrôles administratifs, etc.

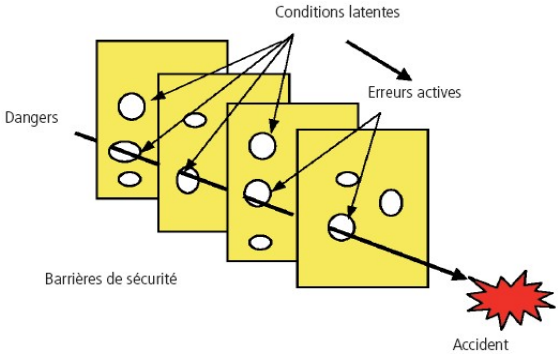


Figure 10: Représentation du « swiss cheeese model » par Reason 1997

Dès les années 90, l'évolution de la compréhension des phénomènes accidentels relègue le modèle de l'homme considéré comme source d'erreur au second plan. « *Le retour d'expérience montre que les opérateurs étaient en quelque sorte acculés à l'erreur, n'ayant d'autre choix que de faillir du fait de leur contexte de travail. Les méthodes développées dans la lignée de cette approche s'intéressent dès lors à l'environnement organisationnel de travail susceptible de conduire, de contraindre l'individu à l'erreur. Elles se concentrent en particulier sur les défaillances organisationnelles latentes, fruits de décisions prises dans le passé et dans les couches supérieures de la hiérarchie et se traduisant sur le terrain par des erreurs directes (ou actives)* »[4]. Parmi ces méthodes, on peut citer Tripod, WPAM, Sam, I-Risk et Imas (décrites dans [Belmonte, 2008]).

3.2.2.3 Troisième génération : l'ère inter-organisationnelle

[4] http://www.officiel-prevention.com/formation/conseils/detail_dossier_CHSCT.php?rub=89&ssrub=183&dossid=291

Plus récemment, une troisième génération de méthodes, dites méthodes intégrées, est apparue, prenant en compte le système sociotechnique dans son ensemble. Ce type de méthode raisonne sur les barrières de sécurité permettant de protéger le système contre l'accident. L'analyse repose sur l'identification de ces barrières, puis sur l'évaluation de leur robustesse. Parmi ces méthodes on peut citer les méthodes issues des projets ATHOS ou ARAMIS [Debray *et al.*, 2006].

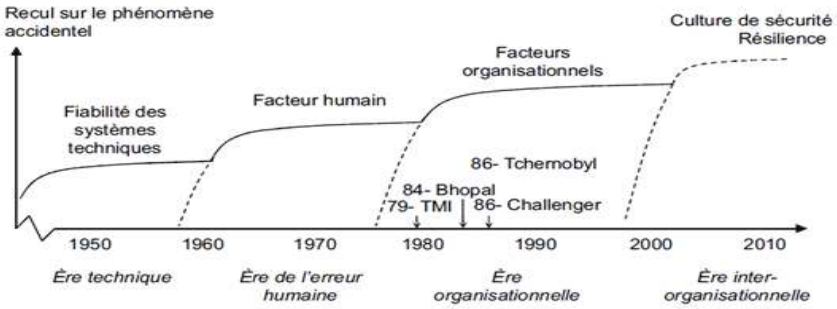


Figure 11 : Evolution des approches du management de la sécurité (extrait de [Groeneweg, 2002])

3.2.3 Avantages et limites

Les méthodes classiques d'analyse de risques dites techniques présentent un grand nombre de qualités comme leur caractère systémique, i.e. méthodique. Par ailleurs, elles s'appuient sur des outils issus d'une culture de l'ingénieur, ce qui a permis une comparaison univoque des mérites respectifs des méthodes proposées successivement pour aboutir à un relatif consensus sur les meilleures d'entre elles [Lassagne, 2004]. Par contre, ces méthodes fortement complexes sont longues et lourdes à mettre en œuvre. Leur complexité limite aussi l'imagination de l'analyse. *L'opérateur humain dans le système est l'un des facteurs de complexité sinon le facteur de complexité majeure[...]. L'opérateur humain est faillible mais demeure surtout le seul rempart capable d'imaginer, pendant l'exécution, les événements que les concepteurs n'ont pas pu inventer* » [Belmonte, 2008].

Les deux premières générations de méthodes d'analyse de la fiabilité humaine permettent de prendre en compte ce facteur humain sur les aspects organisationnels ou encore sur les déterminants cognitifs du comportement. Ces méthodes sont issues de travaux dans de nombreuses disciplines comme l'ergonomie, la théorie des organisations, la psychologie (cognitive et sociale), l'ingénierie des systèmes complexes, la sociologie, l'intelligence artificielle, etc. Ces points de vue multidisciplinaires étudient des facettes différentes et complémentaires du comportement humain mais la contrepartie est qu'il est alors difficile d'appréhender la pertinence d'une approche par rapport à une autre. Par ailleurs, contrairement aux méthodes classiques, il est difficile d'aboutir à une mesure de performance du système. On trouvera des critiques détaillées différentes méthodes dans [Lassagne, 2004].

In fine, il semble bien que malgré ces critiques, ces approches sont, pour la partie qualitative de la fiabilité humaine, matures et riches d'enseignements pour la compréhension des risques mais que pour une analyse quantitative détaillée, les analyses de risques classiques dites techniques sont plus adaptées. La troisième génération de méthodes d'analyse de la fiabilité humaine semble être l'approche la mieux adaptée à l'heure actuelle puisqu'elle permet de croiser les regards de l'ingénieur et de la fiabilité humaine, du sociologue et du gestionnaire ainsi que du politologue.

3.2.4 L'approche MELISSA

La question qui nous préoccupait était comment passer de ces analyses à une conception d'environnements virtuels pour la formation ou l'aide à la décision. C'est pour répondre à cette question que F. Camus, en thèse dans notre laboratoire et à l'INERIS, encadré par D. Lenne dans le cadre du projet européen Virtualis et du projet V3S a proposé l'approche MELISSA [Camus, 2010].

L'approche MELISSA n'a pas pour objectif de modéliser totalement le système socio-technique mais d'aider à concevoir des scénarios pour les environnements virtuels cohérents et pertinents en regard des risques et des experts. Trois points de vue sont abordés dans cette approche : 1) les scénarios accidentels liés à l'activité, 2) la représentation de la tâche à accomplir et 3) les facteurs d'influence potentiels de l'activité. MELISSA vise à articuler ces trois points de vue pour permettre de prendre en compte les

critères suffisants pour établir de « *bonnes règles* » (efficacité par rapport aux objectifs de production, maîtrise des coûts/délais, spécifications techniques et objectifs de sécurité au travail).

Les scénarios accidentels liés à l'activité sont modélisés à l'aide de la méthode d'analyse de risques des nœuds papillons (chapitre II.3.2.1). La représentation de la tâche à accomplir correspond à la tâche prescrite. Et les facteurs d'influences sont modélisés avec la méthode PAT QSE (Peurs, Attraits, Tentations – Qualité Sécurité Environnement). Cette méthode est une composante d'une méthode issue du projet ATHOS (méthode de troisième génération) développée dans le cadre du projet du même nom par l'UTC, l'INERIS et l'UPJV. PAT QSE est une évolution de PAT miroir développée par l'UTC et l'INERIS [Le Cardinal *et al.*, 1997]. PAT QSE ajoute la composante management des risques. La méthode PAT QSE permet aux acteurs de terrain de verbaliser leurs :

- peurs : dangers perçus malgré les barrières de sécurité, renseignent sur les causes de ces dangers et le manque de confiance dans les barrières ;
- attraits : bonnes barrières de sécurité et bonnes procédures, renseignent sur la confiance dans les barrières ;
- tentations : transgressions jugées possibles, elles renseignent sur les faiblesses de la sécurité actuelle malgré les barrières existantes.

Le formalisme de représentation des trois points de vue est un workflow utilisant la notation BPMN (Business Process Management Notation).

Une des particularités de l'approche proposée par F. Camus est la décomposition des barrières en trois composantes du point de vue de l'opérateur : 1) la perception de l'événement initiateur, 2) les mesures à prendre (diagnostic et décision) et 3) l'intervention. Cette décomposition permet de déterminer 1) les éléments nécessaires à modéliser dans l'environnement virtuel pour que les opérateurs puissent percevoir les événements initiateurs et mettre en place les interventions les plus adaptées 2) les actions nécessaires à modéliser dans l'environnement virtuel (bonnes et mauvaises) et 3) les facteurs de perturbation pour mettre à l'épreuve les barrières et amener l'opérateur (apprenant ou autre) à progresser, réfléchir, remettre en cause ses actes ou les barrières. L'idée générale est de pouvoir déterminer des facteurs de perturbation possibles sur les trois niveaux de barrière.

L'approche MELISSA et la méthodologie associée à cette approche ont permis de concevoir les deux environnements virtuels développés dans le projet V3S que ce soit les modèles 3D, les comportements des personnages virtuels autonomes et le moteur de scénarisation.

3.3 Notre approche

Pour modéliser les risques, nous avons donc proposé une correspondance (voir Figure 12) entre le modèle d'activité (HAWAI-DL) sur lequel se fonde la scénarisation et les nœuds papillons utilisés dans l'approche MELISSA (Tableau 6) [Amokrane, 2010] :

- **Evénements initiateurs/courants vs. marqueur de préconditions contextuelles « experts »** : par exemple, dans le scénario « *changement de matières dangereuses* », le fait que « *le ressort d'une vanne soit usé* » peut être un événement initiateur dans une analyse de risques. Cet événement entraîne le fait que « *la vanne ne revient pas* » toute seule lorsqu'on « *verrouille* » ou « *déverrouille* » le bras de chargement. Ainsi, dans le modèle d'activité, cet événement initiateur correspond à la précondition contextuelle marquée avec le tag « *expert* » « *si la vanne ne revient pas* » de la tâche « *accompagner vanne* » ;
- **Barrière de sécurité (prévention) vs. « tâche liée à la sécurité »** : dans notre cas, une « *tâche liée à la sécurité* » est une tâche de sécurité qui peut être ALU ou non (tolérée ou non selon l'usage selon la satisfaction ou non satisfaction de la condition de déclenchement d'un risque, et ce pour éviter ce dernier). Donc, une « *tâche liée à la sécurité* » correspond à une barrière humaine de prévention dans l'analyse de risques. Par exemple, « *accompagner vanne* » est une « *tâche liée à la sécurité* » et ALU. C'est aussi une barrière de prévention, qui a pour fonction d'éviter une fuite ;
- **Barrière de sécurité (protection) vs. tâche mère indépendante** : dans notre cas, une tâche mère indépendante de la procédure principale est une tâche qui se déclenche suite à un événement déclenchant (déclenchement d'un risque). Cette tâche doit être faite pour gérer et réduire au

maximum le risque en cours. Ces tâches correspondent aux barrières de protection. Dans des versions précédentes de HAWAI-DL, nous appelions ces tâches « tâches hypéronymes » ;

- **Evénement redouté et Phénomène Dangereux vs risque** : dans notre cas, tout événement redouté et/ou phénomène dangereux représente un risque.

Le modèle de risques est une base de connaissances qui contient les correspondances « erreurs-risques » et les propagations des risques [Amokrane, 2010].

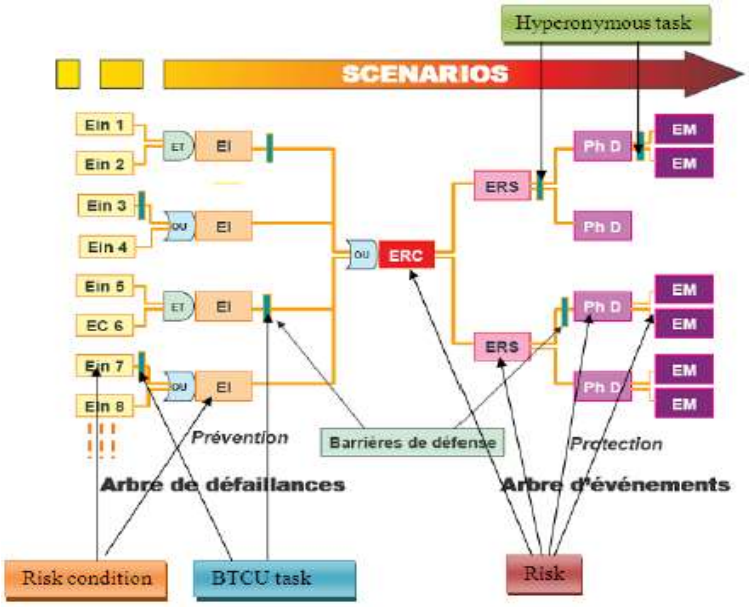


Figure 12 : Correspondance entre modèle d'activité (HAWAI-DL) et modèle de risques (nœuds papillons)

Reste à présent la question de comment représenter de manière formelle ces nœuds papillons et permettre à notre système de déclencher les risques et phénomènes dangereux. Dans les hypermédias adaptatifs, éducatifs, les systèmes proposés ne présentent pas de modèles de risques mais les connaissances classiquement représentées sont soit déclaratives soit procédurales. Les connaissances déclaratives sont généralement représentées par des représentations propositionnelles (graphes conceptuels, ontologies) et les connaissances procédurales par des règles de productions (souvent logique du premier ordre). Dans le cas du modèle de risques, il s'agit de pouvoir représenter à la fois des connaissances procédurales, mais aussi des probabilités de risques, des degrés de confiance dans les barrières, etc. et de pouvoir les faire évoluer dynamiquement.

Nous nous sommes orientés vers des **ontologies** pour représenter les connaissances déclaratives et vers des **réseaux bayésiens** pour représenter les connaissances procédurales et dynamiques de ce modèle de risques.

Notre **ontologie** contient les barrières de protection, les barrières de prévention et les types de risques (e.g. électrique, chimique, etc.) (Figure 13). L'utilisation des ontologies permet un raisonnement générique, c'est-à-dire un raisonnement sur un type de barrières et un type de risques et non pas seulement sur une barrière ou un risque donné.

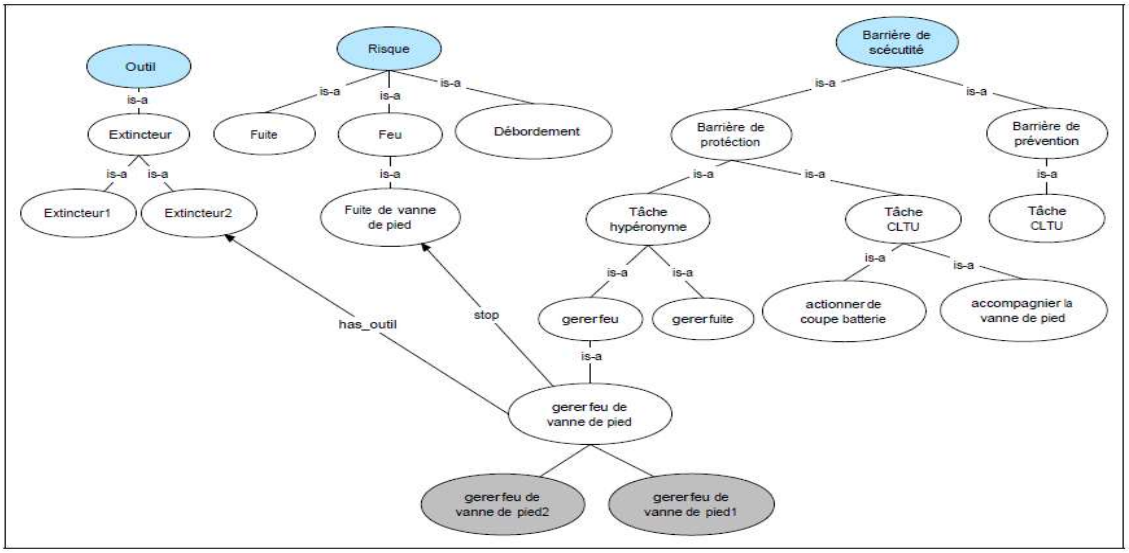


Figure 13 : Extrait d'une partie de l'ontologie de risques dans HERA

Les **réseaux bayésiens** sont constitués de deux composantes : un graphe causal et un ensemble de distributions locales de probabilités. Les nœuds du réseau représentent les concepts du domaine et les liens orientés désignent des relations de causalité. Les réseaux bayésiens sont ici adaptés pour différentes raisons [Amokrane, 2010], en particulier :

- Il est souvent plus facile pour un expert de formaliser ses connaissances sous forme de graphe causal que sous forme de système à base de règles, en particulier parce que la formulation de règles sous la forme SI... ALORS est très contraignante et peut être facilement mise en défaut ;
- Ils permettent d'intégrer des degrés d'incertitudes ;
- Grâce à une représentation distribuée, ils permettent de raisonner sur l'ensemble du réseau et de détecter plusieurs pannes simultanées ;
- Il est possible de rassembler et de fusionner des connaissances de diverses natures dans un même modèle : retour d'expérience (données historiques ou empiriques), expertises (exprimées sous forme de règles logiques, d'équations, de statistiques ou de probabilités subjectives), observations ;
- La représentation graphique est explicite, intuitive et compréhensible par un non spécialiste, ce qui facilite à la fois la validation du modèle, ses évolutions éventuelles et surtout son utilisation.

La Figure 14 résume quelques exemples. Certains risques sont liés à des erreurs de l'apprenant. Dans ce cas, l'erreur de l'apprenant augmente la probabilité du risque, par exemple : s'il « *tape sur le boulon* » (*erreur « ALU+ »*), il y a une probabilité de risque d'étincelles augmentée « *s'il ne met pas un jet d'eau sur le boulon lorsqu'il scie* » (*CLU*). Certains risques ne dépendent pas seulement des erreurs de l'apprenant mais aussi du contexte (par exemple la satisfaction des *préconditions contextuelles)*. Par exemple : si l'apprenant « *desserre le boulon avec un outil non ATEX*[5] » (tâche « *ALU+* ») et s'il est dans une « *zone ATEX* », donc il est en « *erreur ALU* » et il y aura par conséquent des étincelles. La probabilité de production des étincelles dépend du niveau de la zone ATEX. Elle passe d'une gravité très grande pour la zone 1 à une gravité plus basse pour la zone 2. Par contre, pour la zone 0, la tâche précédente n'est pas du tout acceptable. La gravité des étincelles dépend également du fait que l'apprenant utilise un « *outil ATEX* » ou non.

[5] ATEX : Atmospère explosive :

Zone 0 : présence permanente de l'atmosphère gazeuse explosive

Zone 1 : présence occasionnelle de l'atmosphère gazeuse explosive

Zone 2 : présence rare de l'atmosphère gazeuse explosive

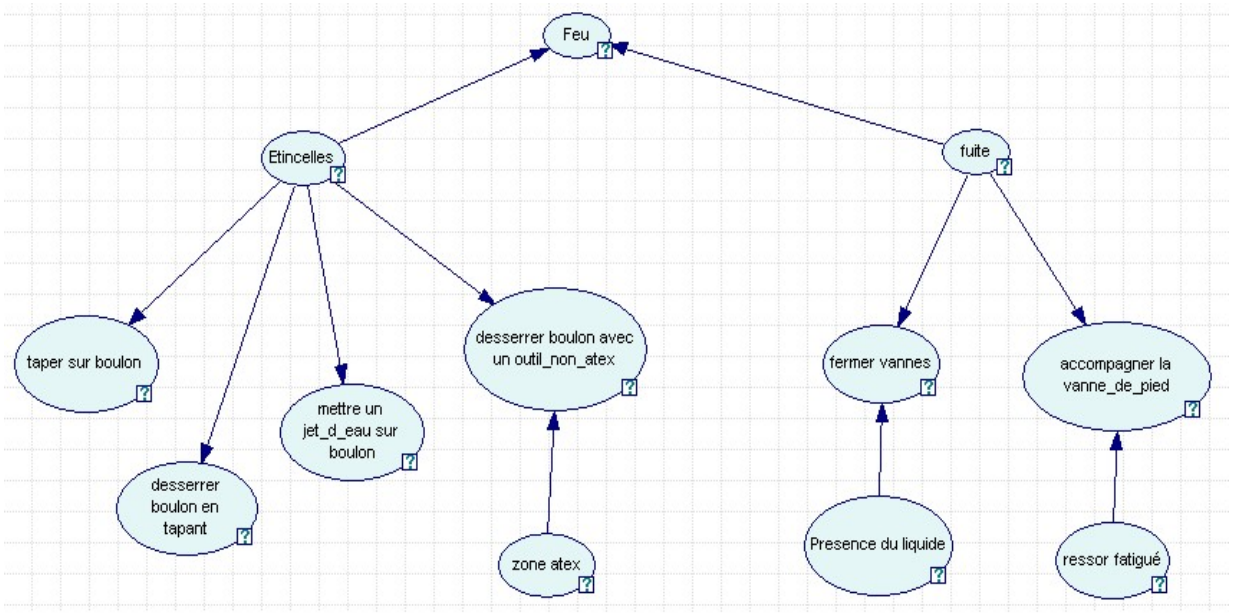


Figure 14 : Représentation des nœuds papillons avec un réseau bayésien

4 Comment formaliser les connaissances sur le domaine ?

La modélisation des connaissances du domaine consiste à modéliser les objets du monde, les actions possibles sur ces objets et les comportements des objets suite aux actions ou à d'autres événements. Ces informations sont essentielles pour savoir quoi faire, pourquoi le faire et comment le faire. Il existe de nombreux travaux sur ce sujet, notamment en France, dans des grands laboratoires comme l'IRISA et le LISyC. Ces travaux sont très intéressants et l'idée initiale n'était pas de refaire ce qui a déjà été réalisé. En effet, la modélisation des connaissances sur l'environnement virtuel est essentielle pour nos modules informatiques mais ne constituait pas l'originalité de nos travaux. Par ailleurs, appartenant à une équipe centrée sur la modélisation des connaissances (le domaine ICI du laboratoire Heudiasyc UMR7253), nous avons travaillé avec l'équipe pour formaliser ces connaissances avec des ontologies. Si les ontologies permettent de représenter les connaissances sur le domaine, certains auteurs pensent qu'elles le sont moins pour représenter le fonctionnement du système [Chevaillier *et al.*, 2009]. Cependant, nous verrons dans notre approche comment à partir des travaux de notre équipe, nous avons pu réaliser cette représentation avec des ontologies.

4.1 Définitions

Selon [Chevaillier *et al.*, 2009], trois types de connaissances doivent être exprimés pour décrire des environnements virtuels :

1. Les concepts du domaine : il s'agit de la description sémantique des concepts du domaine d'activité abordé, de leur structure et de leurs relations ;
2. Les possibilités d'interaction et la structuration de l'environnement : il s'agit de décrire comment les actions motrices des utilisateurs se traduisent en modifications de l'environnement virtuel, quelles parties des objets sont sensibles aux interactions, quel est le « protocole » d'interaction : proximité des objets, enchaînement d'actions à réaliser, modalités de ces actions, quels sont les comportements des participants à l'interaction ;
3. Les comportements des objets : cette explicitation doit permettre aux agents d'analyser le comportement des objets, d'anticiper leur évolution et doit permettre de transmettre cette connaissance aux utilisateurs.

[Donikian, 2004] définit l'environnement virtuel informé comme étant un environnement dans lequel les connaissances sont ancrées de façon à ce qu'une entité comportementale puisse en tirer ce qui est nécessaire afin d'éviter un travail d'analyse et de compréhension du monde : « *Un environnement virtuel*

informé est un environnement virtuel dont les modèles 3D contiennent non seulement la géométrie de la scène mais aussi toutes les informations pertinentes pour les entités comportementales à simuler comme les éléments symboliques ou sémantiques qui peuvent permettre à ces entités de percevoir, décider et agir ».

[Mouttapa-Thouvenin, 2009] propose une nouvelle définition d'un « *environnement virtuel informé comme étant un environnement doté de modèles à base de connaissance dans lequel il est possible à la fois d'interagir et de permettre des comportements par interprétation de représentations dynamiques ou statiques* ».

4.2 Etat de l'art

Lydie Edward, dans son mémoire de thèse a fait un état de l'art des différents travaux sur la modélisation d'un environnement virtuel informé que nous reprenons ici brièvement [Edward, 2011].

4.2.1 SMART OBJECTS

[Kallman, 2004] propose d'intégrer les connaissances nécessaires de l'environnement virtuel informé à travers les "Smart Objects". Les informations fournies sont fonction des interactions des personnages autonomes ou de l'apprenant avec les objets de l'environnement. Les Smart Objects peuvent exprimer quatre types d'information :

- Les propriétés intrinsèques de l'objet. Il peut s'agir de propriétés physiques (décomposition de l'objet, animations, etc.) ou sémantiques ;
- Les informations liées à l'interaction. Il s'agit généralement des positions où l'interaction est possible ;
- Les informations liées au comportement de l'objet. On peut ainsi exprimer les changements d'états d'un objet en fonction des opérations exécutées ;
- Les informations liées au comportement attendu des utilisateurs. Associées aux comportements, ces données peuvent indiquer où et quand l'utilisateur peut manipuler l'objet.

Un outil nommé SOMOD (Smart Object MODeler application) permet la création et l'édition de tels objets informés.

4.2.2 STARFISH

[Badawi et Donikian, 2004] utilisent le même principe dans leur architecture STARFISH (Synoptic-objects for Tracking Actions Received From Interactive Surfaces and Humanoids) et proposent le concept d'objets synoptiques. Un objet synoptique contient deux types d'information : des actions et des surfaces interactives. Ils utilisent des « Surfaces Interactives » pour décrire les surfaces utilisées sur l'objet pendant l'interaction ainsi que l'espace autour de l'objet affecté. Elles peuvent également spécifier le positionnement requis de l'agent pour la réalisation d'une action. De plus, l'objet informe l'agent des actions à accomplir à travers des « Actions de Base » qui, associées aux surfaces interactives, décrivent le processus d'interaction à travers des « Actions Complexes ». Les actions de bases sont spécifiques à chaque type d'agent et sont donc interprétées différemment par l'agent lui-même, résultant en une variété d'interactions possibles pour un même objet. Les actions sont décrites par une décomposition en actions atomiques (déplacer, attraper, donner, regarder, etc). STARFISH permet de spécifier le comportement des objets synoptiques en leur assignant une machine à états. Celle-ci définit les actions valides en fonction de l'état de l'objet, ainsi que les transitions permettant à l'objet de changer d'état.

4.2.3 VEHA

[Chevaillier, 2009] constate qu'il n'existe pas un langage qui permette d'expliciter l'ensemble de ces connaissances relatives aux concepts, interactions et comportements des objets. Il explique que « *les langages d'ontologie ou les logiques descriptives, même s'ils permettent d'expliciter des connaissances sur des comportements, ne permettent pas d'en donner une description exécutable. Les smart objects fournissent des informations nécessaires à l'interaction ou la planification, mais sont très limités pour décrire la sémantique des concepts abstraits. Les modèles d'interaction dans les systèmes multi–agents n'intègrent pas les spécificités des environnements virtuels. Enfin les langages de description de comportement sont limités pour décrire les notions d'interactions ou de sémantique. Le problème majeur est l'impossibilité de faire formellement le lien entre les différentes facettes de la description de l'environnement virtuel* ». [Chevaillier *et al.*, 2009] propose donc

d'unifier l'ensemble de ces concepts au sein d'un même méta–modèle en utilisant un seul langage VEHA et de les rendre inspectables en cours d'exécution et directement utilisables pour simuler l'évolution de l'environnement virtuel.

4.2.4 Conclusion

Tous les travaux présentés précédemment constituent des modèles très pertinents dans le domaine de la modélisation des connaissances en environnement virtuel. Le méta-modèle VEHA est un modèle très complet et très abouti pour cette modélisation.

4.3 Positionnement de notre approche

Nos travaux portent sur la modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes, la scénarisation adaptative et le suivi de l'apprenant. Nous avons proposé des modèles et modules informatiques génériques capables de s'interfacer avec des environnements virtuels développés par d'autres (généralement par les intégrateurs des projets). Nous n'avions donc pas à réaliser la partie modélisation des interactions, mais seulement la modélisation du domaine et du fonctionnement du système. L'objectif était donc de proposer un modèle du domaine et du fonctionnement du système ainsi qu'une mise à jour dynamique de l'état du monde pour permettre à nos modules informatiques de raisonner dessus. Nos modules avaient besoin de pouvoir répondre à des questions telles que : Y-a-t-il un marteau dans la boîte à outils (PVA) ? L'outil utilisé par l'apprenant est-il le adapté (suivi) ? Quelle est la position de tel objet (PVA et suivi) ? Dans quel état est cet objet (suivi) ? Quels sont les objets, dans le champ visuel (PVA et suivi) ? Quelles sont les actions possibles sur un objet ? Quel type de ressource est nécessaire pour cette action ? Etc.

4.4 Notre approche

Nous avons choisi de modéliser les connaissances du domaine sous la forme d'une ontologie. L'ontologie est employée pour raisonner sur les objets du domaine concerné. Nous avons adjoint à ces ontologies des règles de fonctionnement pour raisonner sur le fonctionnement du système. Deux approches ont été proposées : l'approche COLOMBO et l'approche Soar.

4.4.1 Approche COLOMBO-MOSS pour V3S/FIANNA

Dans les projets V3S et FIANNA, nous étions en charge de la modélisation du domaine et du fonctionnement du système pour nos modules informatiques. Puisque nous avions ces représentations, il était possible de les utiliser pour proposer des menus à l'apprenant et vérifier que les actions de ce dernier ou des personnages virtuels autonomes étaient effectivement possibles et quelles conséquences elles avaient. Il s'agissait, afin de proposer des interactions à l'apprenant sous forme de menus (Figure 15), de pouvoir interroger nos modules pour connaître les actions possibles sur un objet, puis selon l'action choisie, si une ressource était nécessaire de proposer à l'apprenant les ressources possibles. Pour pouvoir laisser l'apprenant libre et permettre des apprentissages par l'erreur, nous proposons toutes les actions possibles sur les objets et pas seulement les actions possibles compte tenu de la situation comme c'est souvent le cas. Nous ne souhaitions pas donner trop d'indices à l'apprenant sur la bonne action. Puisque toutes les actions étaient proposées, une fois l'action et la ressource choisie, il s'agissait de savoir si l'action était valide.

Nous avons donc regroupé dans un module, appelé COLOMBO, le modèle du domaine, le modèle de fonctionnement, la perception du monde, la mise à jour du monde et la communication avec l'environnement virtuel et les systèmes de raisonnement sur le monde. Le modèle du domaine et le modèle de fonctionnement ont été réalisés avec J.P. Barthès, Lydie Edward (thèse V3S sur la modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes, [Edward, 2011]), K. Amokrane (thèse FIANNA sur le suivi de l'apprenant, [Amokrane, 2010]) et deux étudiants en stage [Gicquel, 2008] et [Diallo, 2009]. L'implémentation du modèle et du module (mise en œuvre des règles génériques de fonctionnement et communication avec les modules) a été réalisée par Lydie Edward [Edward, 2011].

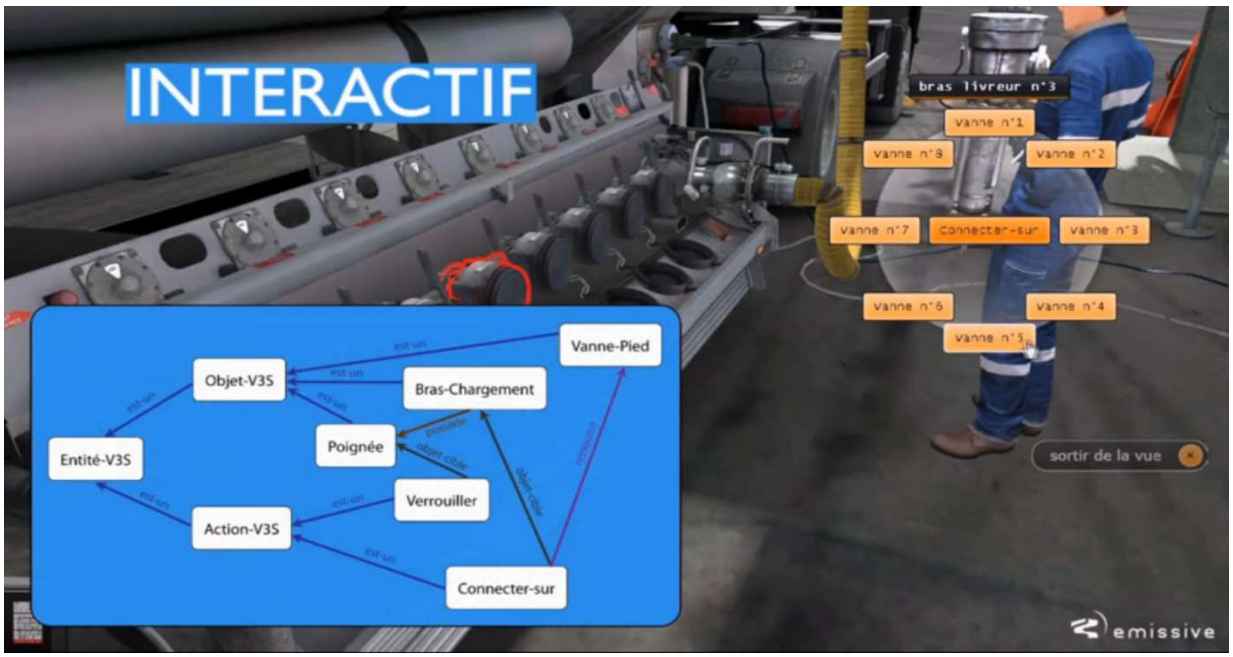


Figure 15: Interrogation du modèle de connaissances pour proposer des menus

4.4.1.1 Formalismes et langages pour définir l'ontologie

Lydie Edward, dans sa thèse, a réalisé un état de l'art des différents formalismes et langages actuels permettant de définir des ontologies (OWL, RDF Schema) [Edward, 2011]. Ce sont des langages de descriptions d'ontologies principalement destinés à être diffusés sur le Web. « *Cependant, ces langages montrent des limites comme l'impossibilité de raisonner et de mener des raisonnements automatisés sur les modèles de connaissances établis à l'aide de ces langages. Une structure de représentation d'ontologie peut avoir un haut degré d'expressivité, mais cela conduit parfois à des conclusions incontrôlables et, inversement, une restriction trop importante de la représentation permettant de mieux contrôler les raisonnements peut aboutir à l'impossibilité de représenter certains concepts [Doyle and Hayes-Roth, 1998]* » [Edward, 2011]. Il est donc nécessaire d'avoir une méthode qui permet d'améliorer l'expressivité de l'ontologie tout en assurant le contrôle du raisonnement [Moulin *et al.*, 2007]. Ce besoin de raisonner sur les connaissances a amené à l'introduction de règles dans les ontologies et le développement de moteurs de règles pour les interpréter.

MOSS est un environnement de développement créé au laboratoire Heudiasyc UMR7253 par Jean-Paul Barthès [Barthès et Ramos, 2002] et fondé sur le modèle PDM [Barthès *et al.*, 1979]. « *L'environnement a subi de nombreuses évolutions pour finalement proposer aujourd'hui un environnement performant, sur la base d'une représentation objet permettant entre autre de développer des ontologies. MOSS est utilisé dans la plateforme multi-agent OMAS et permet de décrire les croyances de l'agent ainsi que l'environnement. MOSS, propose, en outre, la possibilité de pouvoir définir les objets de l'environnement, les connaissances et intègre un moteur de requête très puissant. MOSS répond aux besoins de formalisation des connaissances et permet une définition directe de l'ontologie d'un agent* » [Edward, 2011]. Ainsi, en effet, comme l'explique [Chevaillier, 2009], une ontologie ne permet pas de décrire un fonctionnement exécutable, mais par contre, les raisonneurs et certaines techniques d'intelligence artificielle associées que nous décrirons plus loin, permettent de proposer un modèle de fonctionnement puissant.

4.4.1.2 Concept action

Les actions sont un concept central de notre ontologie. En effet elles conditionnent le changement d'état des objets, précisent le contexte dans lequel les humains virtuels (autonomes ou apprenants) peuvent interagir avec l'environnement. Ici, il s'agit donc de savoir quelles sont toutes les actions possibles sur un objet et quelles sont les règles de succès et les changements d'état associés à une action en particulier. Ainsi, une action est modélisée par :

- Nom : le nom de l'action ;

- Objet cible : une action s'applique généralement, mais pas nécessairement, à un objet donné. Il s'agit de l'objet dont les attributs seront modifiés par cette action ;
- Ressources principales : les objets qui sont nécessaires pour cette action ;
- Ressources secondaires : les objets qui peuvent faire office de ressources principales, cependant utiliser ces objets n'est pas habituel ni nécessairement admis par les protocoles. Ces ressources peuvent être calculées dynamiquement si on considère un certain nombre de propriétés. Par exemple, pour « *enfoncer un clou* », la ressource principale est le marteau. Mais tous les objets ayant les propriétés transportable, poids inférieurs à 2kg et rigides peuvent devenir des ressources secondaires pour l'action « *enfoncer un clou* ».

4.4.1.3 Concept objet

« *Les composants principaux de l'environnement de travail sont les objets représentés dans l'ontologie par un concept racine \Objet V3S". Chaque objet du monde correspond à un individu de l'ontologie. Un objet peut avoir des états (e.g. ouvert, fermé, pris, etc.) et des statuts (e.g. rouillé, grippé, cassé, etc.) qui peuvent changer. Un objet est également décrit par sa position et son orientation dans le monde* » [Amokrane, 2010]. Le concept « Objet V3S » représente tous les objets du monde (vanne, manche, combinaison, vis, écrou, etc.), les équipements (gants, casque, etc.), ainsi que les outils utilisés (tournevis, marteau, etc.). Ce concept est spécialisé selon les actions applicables sur les objets, par exemple, « Objet_ouvrable », « Objet_transportable", etc. La Figure 16 représente un extrait des objets de l'ontologie. Les attributs et les relations autres que l'héritage ne sont pas représentés pour faciliter la lecture. On peut cependant noter l'organisation en catégories de plus en plus précises de gauche à droite jusqu'aux instances.

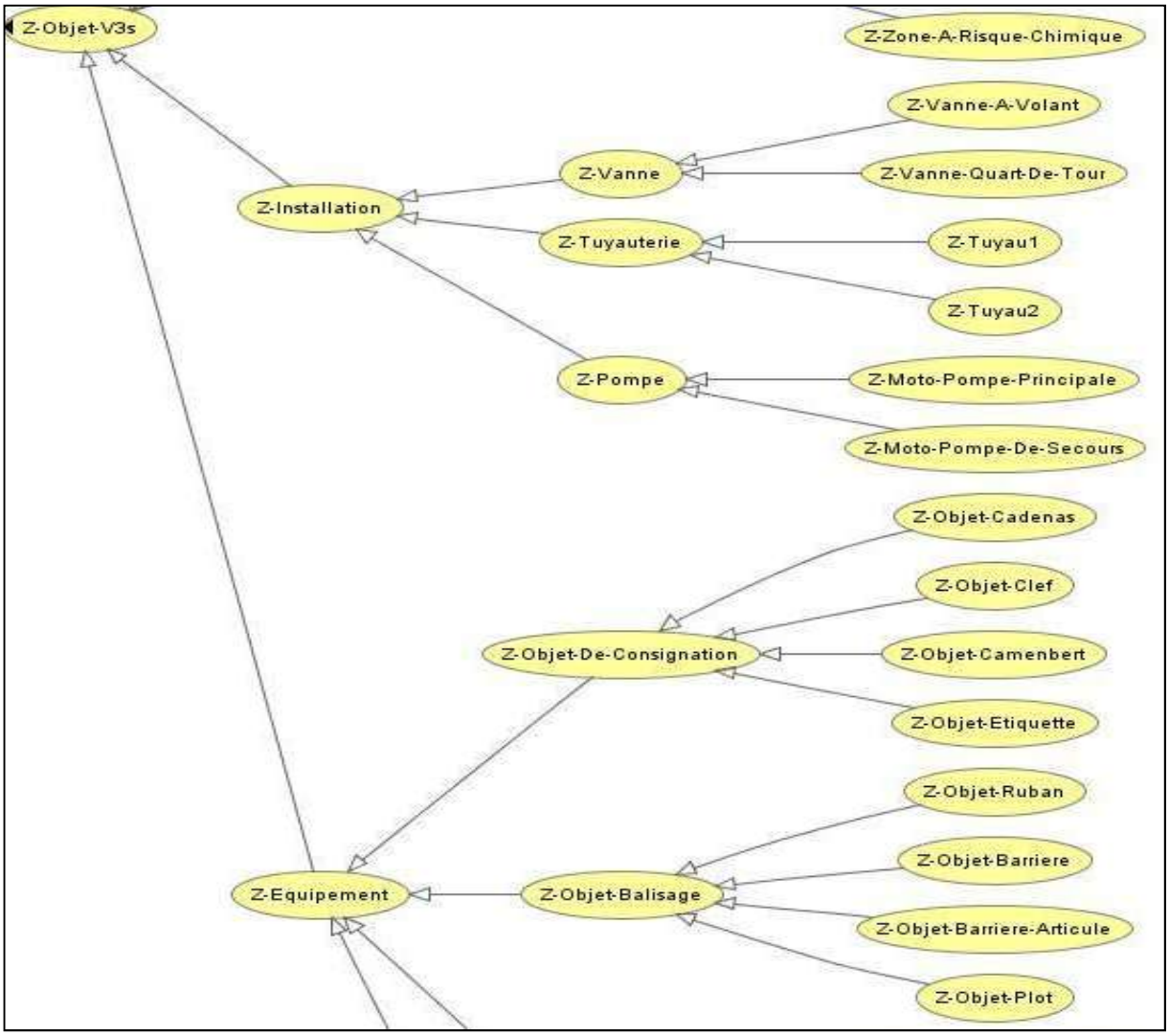


Figure 16 : Extrait de l'ontologie du monde dans COLOMBO

4.4.1.4 Règles de fonctionnement

La réalisation des actions et leur succès demande un certain nombre de conditions à remplir. Même si nous avons choisi de proposer toutes les actions possibles, afin de permettre un apprentissage par l'erreur, **l'exécution** d'une action n'est pas toujours possible. De même, si l'action est possible, sa réalisation n'entraîne pas toujours une **transition** d'un état à un autre. La **mise à jour des états** est un problème difficile, car une action peut entraîner des changements d'états sur l'objet cible mais aussi sur d'autres objets. « *Par exemple, la réalisation de l'action "connecter-bras" est possible lorsque le bras est à l'état "déconnecté" et a le statut "normal"* (Code 1*). De même, le changement d'état des objets s'appuie aussi sur des conditions. Par exemple, l'exécution de l'action "connecter-bras-chargement" le bras de chargement à la vanne de pied ne suffit pas pour dire si le bras de chargement passe à l'état "connecté". Le passage du bras de chargement vers l'état "connecté" est possible lorsque la poignée est à l'état "tourné", la vanne de pied à l'état "verrouillé" et le bras de chargement a le statut "normal"* (Code 2) » [Edward, 2011]. Ceci a motivé à distinguer le choix de deux types de règles : règles d'exécution et de transition ainsi qu'un mécanisme de mise à jour des états.

Les **règles d'exécution** permettent d'établir des règles sur la possibilité de réalisation des actions sur les objets. L'ontologie permet d'avoir des règles au niveau des concepts parents et qui seront héritées par les concepts enfants avec d'autres règles ajoutées ou remplacées si besoin (spécialisation avec ajout). Pour l'exemple du dévissage de vis, cela revient à vérifier si l'opérateur réalise bien l'opération avec un tournevis ou une sorte de tournevis (e.g. couteau suisse), si celui-ci est opérationnel, si la vis est normale (i.e. non bloquée et non rouillée). Dans ce cas, on peut voir la vis se retirer et/ou l'opérateur dévisser (selon l'animation disponible pour cette action). Les règles d'exécution sont associées au concept action (exemple Code 1*)*.

```
(defconcept ( :en "connect-loading-arm" :fr "connecter-bras-chargement")
          ( :is-a "action-V3S")
      ( :rel "objet-cible" ( :default "f-bras-chargement"))
      ( :rel ( :en "connect-to" :fr "connecter-a") ( :to "objet-V3S"))
      ( :att "rules" ( :default
                       ( :if ( ?* "f-bras-chargement" ("statut" :is "normal"))
                       ( ?* "f-bras-chargement" ("a-etat" :is-not "connecte"))
                        :then
                       ( :return :success))
      ))
      ( :att ( :en "code" :fr "code") ( :default 143))
)
```

Code 1: Règle d'exécution (MOSS)

Les règles de transition permettent d'établir des règles sur la mise à jour des changements d'états des objets suite aux actions. Les règles de transition se trouvent au niveau des objets (concepts) de l'ontologie (exemple Code 2).

```
(defconcept ( :en "f-loading-arm" :fr "f-bras-chargement")
          ( :is-a "objet-transportable")
      ( :att ( :en "e-length" :fr "f-longueur"))
      ( :att ( :en "e-diameter" :fr "f-diametre"))
      ( :att ( :en "type" :fr "type") ( :default "cognitif"))
      ( :rel ( :en "connect" :fr "connecter") ( :to "vanne-pied"))
      ( :rel ( :en "hilt" :fr "poignee") ( :to "f-poignee"))
      ( :rel ( :en "action" :fr "mv-action")
            ( :default "connecter-bras-chargement" "deconnecter-bras-chargement"))
      ( :att ( :en "rules" :fr "regles")
            ( :default ( :if ( ?* "f-bras-chargement" ("statut" :is "normal"))
            ( ?* "f-poignee" ("a-etat" :is "tourne"))
            ( ?* "vanne-pied" ("a-etat" :is "verouille"))
             :then
            ( :return :success))))
      ( :doc :fr "Le bras de chargement est un dispositif permettant de faire
             le chargement des produits dans les cuves du camion.")
)
```

Code 2 : Règle de transition (MOSS)

« *Il peut s'agir de règles simples sur des objets réactifs ou de règles plus complexes sur des objets cognitifs. Des règles simples consistent à appliquer la post-condition (i.e. l'état final attendu) lorsque l'animation se termine. Dans d'autres cas, il s'agit de vérifier si d'autres opérations requises ont été réalisées* » [Edward, 2011].

Pour la **mise à jour des états** (Figure 17), Lydie Edward a proposé une solution originale utilisant des **démons**, terme que l'on retrouve en intelligence artificielle classique [Edward, 2011]. « *Nous aurions pu utiliser les systèmes tels que les automates, réseaux de Petri ou encore des Grafcets mais ces systèmes montrent vite leur limite dès lors que l'on veut utiliser les connaissances à des fins explicatives. Le raisonnement n'est souvent pas possible ou alors il faut y adjoindre un modèle de règles externes qui peut s'avérer parfois assez complexe. L'intérêt de tout avoir dans l'ontologie est que le système de connaissances est centralisé et la manipulation de telles structures est simple et puissante* » [Edward, 2011]. Notre solution consiste à définir une méthode au niveau de la propriété "f-etat" des objet-V3S. Il y a deux façons de faire : décrire cette méthode au niveau de chaque classe principale ou bien au niveau de la classe mère « Objet V3S ». Nous avons choisi la deuxième solution. L'exemple suivant montre l'implémentation du démon sur un objet « test » qui peut passer de l'état « on » à l'état « off » :

« *Le démon =if-added est déclenché à chaque fois que l'objet recevra un message de type '=add-tp. Ce message correspond à l'appel de la méthode =add-tp qui est chargée de rajouter une valeur à la propriété sur laquelle elle est appelée. Dans notre exemple, le démon est lié à l'attribut "a1" de l'objet $E-TEST. À chaque fois qu'une demande d'ajout sera faite, le démon sera déclenché et exécuté. La plateforme OMAS a été modifiée pour répondre à ce besoin spécifique, en effet, dans la version antérieure, le démon faisait appel à des fonctions destructrices qui n'assuraient pas la traçabilité de l'information ni ne garantissait le succès de l'opération* » [Edward, 2011].

On trouvera, dans la thèse de Lydie Edward, des exemples du fonctionnement de l'ontologie , des règles de raisonnement et des algorithmes dans COLOMBO, notamment pour le fonctionnement des requêtes pour les menus [Edward, 2011].

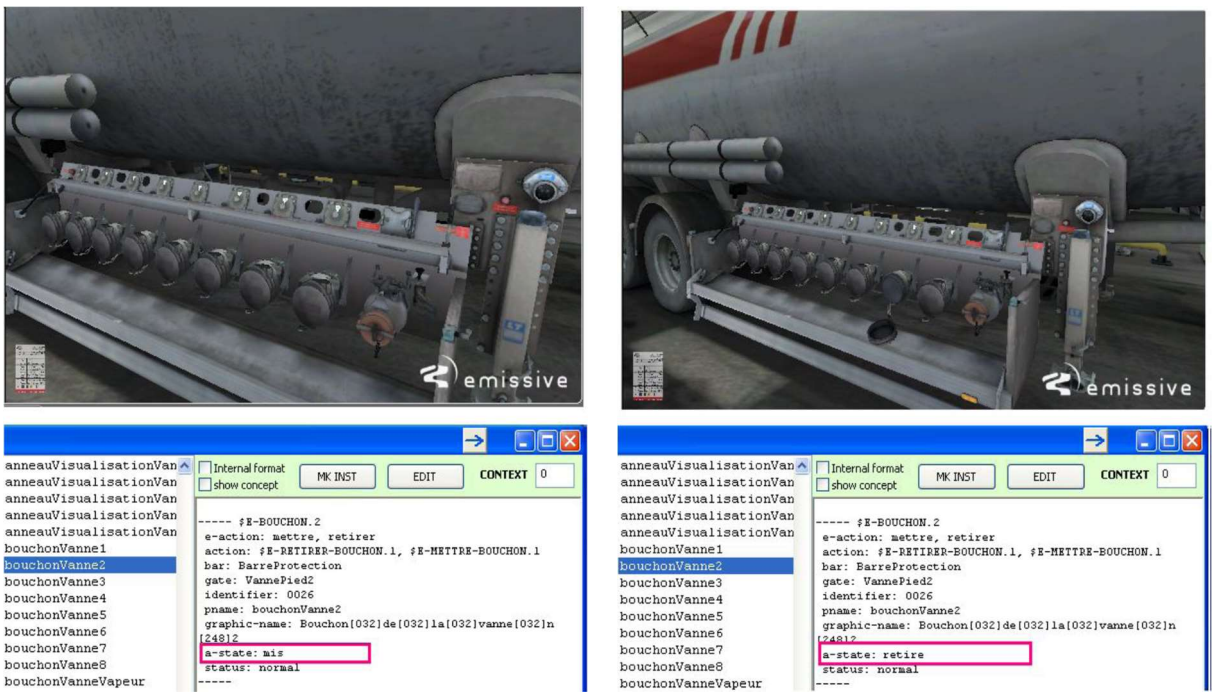


Figure 17 : Changement d'état des objets suite à une action

4.4.2 Approche Soar

Dans le cadre de la thèse de Margaux Lhommet sur la modélisation décisionnelle de foules, l'architecture de développement REPLICANTS, que nous avons proposée s'appuie sur l'architecture cognitive Soar (présentée au chapitre III.2.4.1.2). Nous avons encadré un groupe d'étudiants (projet TX) qui avait pour objectif d'implémenter un mécanisme de génération automatique de règles d'interaction utilisables par le moteur décisionnel de l'architecture cognitive Soar à partir de ces ontologies [Lanquepin et Palancher, 2011]. L'architecture REPLICANTS étant en C++ et Soar, le module développé par les étudiants a donc été réalisé dans ces deux langage. Le générateur de règles s'appuie sur

l'interpréteur d'ontologie JENA interfacé avec le système C++ à l'aide d'un pont JNI. Des requêtes SPARQL génèrent des résultats qui permettent de créer les connaissances de l'agent.

Afin que l'agent et l'environnement partagent une même base de connaissances, [Lanquepin et Palancher, 2011] propose une ontologie représentant les concepts et les instances que l'agent serait à même de rencontrer dans l'environnement. « *Il est important que les concepts dans l'ontologie reconnaissent la même structure que celle implémentée dans l'agent afin de s'assurer de la cohésion entre le monde et la représentation que l'agent s'en fait* » [Lanquepin et Palancher, 2011]. Par exemple, la classe « *Binary-Action* » regroupe l'ensemble des actions qui agissent sur un état héritant de « *Binary-State* ». De même « *ObjectWithBinaryState* » regroupe tous les objets qui possèdent un état binaire (Figure 18).

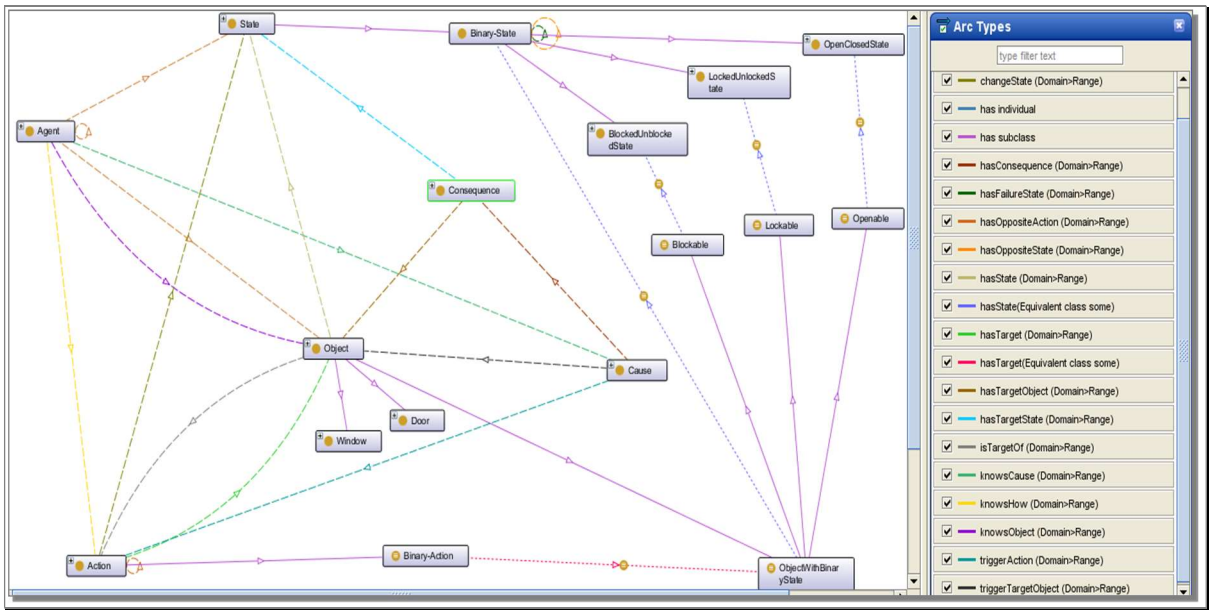


Figure 18 : Extrait de l'ontologie de l'approche Soar

Depuis septembre 2011, des projets étudiants ont permis l'adaptation de ce modèle (DOMAIN-DL) ainsi que la réalisation d'une version COLOMBO 2 (WORLD MANAGER), l'idée étant de pouvoir construire le modèle d'activité à partir des concepts du domaine et d'avoir un regard croisé avec le modèle de domaine.

5 Conclusion

Certains travaux en informatique s'intéressent à des langages de programmation des connaissances qui permettent d'unifier au sein d'un même modèle les connaissances sur le domaine et sur l'activité. Ces travaux centrés informatique et représentation des connaissances permettent aux différents modules informatiques de manipuler des représentations symboliques qui ne sont pas seulement compatibles mais qui sont uniformisées au sein d'un formalisme unique. Le problème est qu'alors certaines caractéristiques d'un aspect peuvent être estompées. De plus, un seul concepteur (souvent l'informaticien), avec une vue omnisciente et centrale doit alors modéliser ces connaissances avec ce formalisme unique. Dans notre cas, nous avons souhaité distinguer les composantes propres de chaque aspect (domaine et activité) et que chaque expert maîtrisant un aspect plus qu'un autre (expert du domaine, ergonome, etc.) puisse réaliser son propre modèle avec son formalisme propre (nœuds papillons pour les uns, modèles de tâches pour les autres, etc.). Ainsi plutôt qu'un seul modèle complexe, nous proposons de manipuler des concepts communs mais avec des vues différentes selon le domaine d'expertise. Nos hypothèses sont qu'avec des vues et des modèles différents :

- Les spécificités de chaque aspect sont conservées et que des regards croisés vont permettre une conception collaborative plus efficace, en confortant certains points ou au contraire en soulevant des incohérences qu'il est utile de discuter, etc. Par exemple, les ergonomes feront ressortir des éléments propres à l'activité humaine réelle sur le terrain qui ne font pas partie de la procédure contrairement à des informaticiens qui modélisent l'humain comme un système technique. Le fait d'utiliser un automate, par exemple, oblige à analyser l'humain comme un système technique ;

- Il est possible de définir plusieurs modèles d'activité selon les opérateurs modélisés ou selon les sites pour un même modèle de domaine.

Dans le projet V3S, les modules de scénarisation adaptative et de suivi de l'apprenant (HERA) et de modélisation décisionnelle des personnages virtuels autonomes utilisent les mêmes modèles (modèle de domaine, modèle d'activité et modèle risques) (Figure 19).

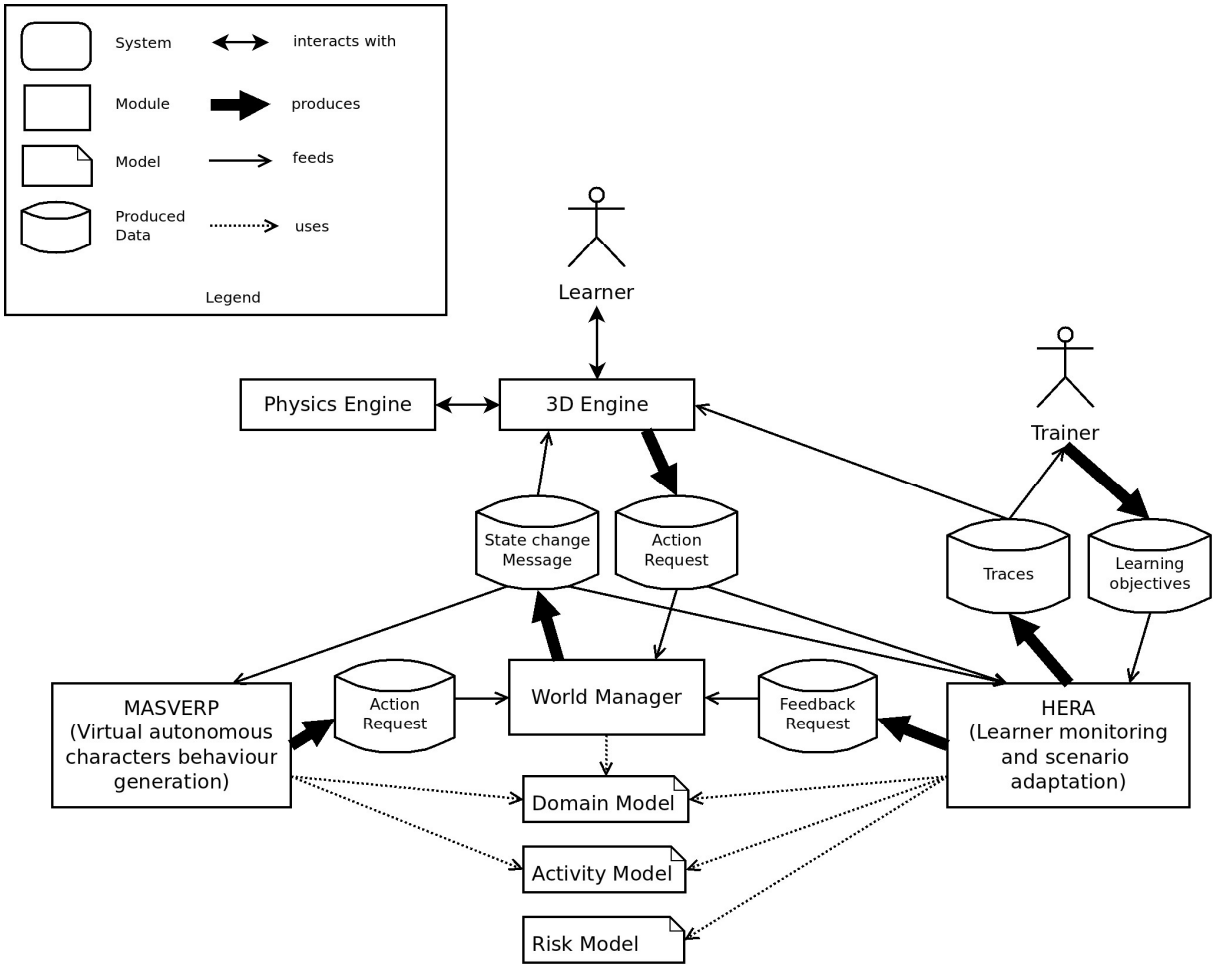


Figure 19 : Architecture globale V3S utilisant les mêmes modèles

III. Modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes

Le comportement humain a des variabilités inter et intra-individuelles. L'homme est faillible, il fait des erreurs, il apprend, sa capacité de traitement est limitée, son attention est sélective, il n'opère que par représentations mentales qui constituent une abstraction de l'environnement. Il est capable d'anticipation, de s'adapter, d'élaborer des réponses dans des situations imprévues. Il a des caractéristiques relativement stables (personnalité), transitoires (états psychologiques, physiologiques, physiques) ou évolutives (expérience). Alors comment reproduire ces comportements variables et doter des personnages virtuels de capacités décisionnelles autonomes ?

1 Objectifs

Bien souvent, les agents autonomes présents dans les environnements virtuels possèdent des comportements corrects/experts. Or, le comportement humain est variable. Une façon élégante d'engendrer cette panoplie de comportements possibles réside dans l'introduction de processus décisionnels variables, contextualisés, erronés ou partiels. Modéliser les comportements humains consiste à modéliser la variabilité des performances humaines et non pas la cognition en tant que telle. Ainsi, l'intérêt est de coupler à la fois des modèles qui décrivent l'influence de facteurs externes (le contexte) sur les comportements émergents, lesquels peuvent être influencés par des variables internes du modèle de l'opérateur (e.g. stress, charge de travail, etc.). Par conséquent, il s'agit :

- D'un point de vue pratique : de prédire une variété de comportements qui reflètent les comportements effectifs des sujets en intégrant les propriétés de l'environnement et les prescriptions et spécifications des tâches données aux opérateurs ;
- D'un point de vue théorique : de prédire la variété des comportements observée au moyen d'une architecture modulaire assurant le lien dynamique entre un sous-ensemble retenu de composants dans le domaine des facteurs humains et la performance.

Les personnages virtuels doivent être capables de réagir aux événements, d'interagir avec un utilisateur dont les comportements sont parfois complexes à analyser et de s'adapter aux évolutions de l'environnement. Ils doivent ainsi avoir des comportements cohérents avec : *« 1) ce qui s'est passé précédemment à partir de son expérience (connaissances acquises dans la session) et de par des caractéristiques stables comme sa personnalité qui peut orienter ses perceptions, motivations et actions et 2) le présent, i.e. chaque événement doit modifier ses émotions ou ses relations sociales avec les autres de manière cohérente »* [Ochs, Sabouret *et al.*, 2009]. Cette modélisation fine du processus décisionnel peut se faire en intégrant la personnalité, la mémoire, la dynamique des émotions et des relations sociales.

2 Etat de l'art

Modéliser des comportements variables et contextualisés peut se faire en reproduisant, sous forme de graphes, l'ensemble des comportements possibles ou en s'appuyant sur des modèles cognitifs permettant de rendre compte de certains processus décisionnels. Nous allons justement nous intéresser à ces modèles et à la manière de les interpréter dans une architecture informatique.

2.1 Définitions

En intelligence artificielle, on distingue l'intelligence artificielle numérique de l'intelligence artificielle symbolique. La première s'appuie sur des modèles numériques et la seconde sur des modèles de représentation des processus cognitifs et de techniques d'interprétation de ces modèles.

Les **modèles numériques** ont pour objectif de prédire les comportements des humains virtuels en réponses à des facteurs ou à des paramètres contextuels. En général, ils sont de type « *boîte noire* » dont les entrées correspondent aux paramètres physiques de l'environnement et les sorties aux performances des humains virtuels. Ce type de modèle ne se préoccupe pas des mécanismes cognitifs sous-jacents et la spécification de la « *boîte noire* » dépend uniquement de contraintes techniques.

Parmi les modèles de représentation des processus cognitifs, nous distinguons deux types de modèles les modèles cognitifs et les modèles de la cognition.

Par le terme de **modèle cognitif**, on entend ici les modèles cognitifs du comportement. Il existe une diversité de sens associée au terme de modèles. Pour certains (e.g. [Ritter *et al.*, 2003]), il s'agit de l'implémentation informatique d'une théorie appliquée à des situations spécifiques ou des classes de situations. Pour notre part, nous entendrons par modèle (cognitif) du comportement, la figuration plus ou moins formelle d'aspects du fonctionnement interne mental, inférés et validés à partir de comportements observés, pour une classe de sujets et une classe de situations. Ainsi, pour le psychologue, le comportement est un ensemble de phénomènes observables, qu'il faut distinguer des activités mentales (e.g. raisonnement) ou encore des variables internes au sujet (e.g. motivation). La démarche consiste ensuite à inférer le fonctionnement interne du sujet à partir de son comportement.

Une autre approche en modélisation consiste à vouloir non pas rendre compte d'une classe particulière de situation, mais à vouloir au contraire concevoir un modèle qui tente « d'unifier « ce que l'on sait des propriétés les plus régulières de la cognition humaine, au sein d'un même modèle. On parle alors plutôt d'**architectures cognitives ou de modèles de la cognition**. Les deux approches, modélisation d'une classe de tâches et de situations, et architecture générique sont complémentaires en ce qu'elles peuvent s'enrichir mutuellement. Les processus décisionnels peuvent être fondés sur des modèles de la cognition (ou architectures cognitives) de haut niveau où les caractéristiques personnelles permettent de simuler et prédire les mécanismes d'analyse de l'information, de prise de décision et de genèse d'erreur relatifs au comportement de l'opérateur humain dans le contexte de tâches complexes. Contrairement aux modèles numériques, les architectures cognitives se focalisent plutôt sur les mécanismes cognitifs sous-jacents à la performance produite par l'humain. L'intérêt n'est plus uniquement de prédire la performance, mais aussi de relier causalement, voire d'expliquer le comportement résultant. Ces explications reposent à la fois sur les contraintes du système cognitif lui-même (e.g. empan limité de la mémoire de travail), sur des facteurs contextuels internes (e.g. fatigue) et externes (température, conditions climatiques, nombre de personnes etc.) et sur la finalité des actions engagées par l'agent (but). La grande majorité de ces architectures considère l'humain comme un système de traitement de l'information : il collecte des indices émanant de l'environnement dans lequel il évolue puis les traite pour les transformer en actions. Ces architectures s'inscrivent dans le cadre théorique de la **psychologie cognitiviste**. Un autre cadre théorique, la **cognition située** met en cause ces modèles et considère la cognition comme dépendante du contexte de l'action qui est nécessairement social. Les plans, tels que décrits dans les systèmes de traitement de l'information, sont une rationalisation *a posteriori* alors que l'action quotidienne est essentiellement opportuniste. Il n'est pas nécessaire de postuler des représentations symboliques « *dans la tête* » de l'individu.

2.2 Modèles numériques

Les modèles numériques permettent d'aborder des problèmes complexes de perception, de mémoire, d'apprentissage et de raisonnement. Ils s'avèrent des alternatives prometteuses pour contourner certaines limites de l'intelligence artificielle symbolique. Bien qu'ils s'appuient sur des modèles de vie artificielle (e.g. algorithmes génétiques) ou du cerveau humain (e.g. réseaux de neurones), ces modèles n'ont pas pour but d'expliquer le fonctionnement des processus cognitifs. Ces modèles sont adaptés, d'une part lorsque l'on dispose de bases de données suffisantes pour réaliser un apprentissage sur des cas représentatifs et, d'autre part, lorsque les entrées (variables de l'environnement) et les sorties (comportement) sont bien spécifiées et leurs relations finies, stables, déterministes et univoques.

Des exemples d'implémentation de modèles de performances à base de réseaux bayésiens, réseaux de neurones, algorithmes génétiques et/ou logique floue sont donnés dans [Bouslimi, 2005] pour la modélisation du conducteur automobile, dans [Kendira, 2009] pour la modélisation de la communication non-verbale pour les agents conversationnels animés.

Dans le domaine de la théorie de la décision, la théorie des jeux est fortement utilisée pour la modélisation d'agents autonomes (e.g. [Champion et Mandiau, 2001]. La théorie des jeux s'applique à l'ensemble des situations de prise de décision interactives ; elle utilise les théories de la probabilité et la théorie de l'utilité attendue. « *La théorie des jeux prend en compte les notions de risque et d'incertitude. Dans un jeu, l'incertitude est essentiellement liée au fait qu'un acteur ne sait pas ce que l'autre va faire. Pour réduire cette incertitude, plusieurs stratégies sont possibles, notamment : 1) une stratégie sûre consistant à minimiser les pertes indépendamment de ce que l'autre va faire... ; 2) une stratégie compétitive consistant, de la part d'un des*

acteurs, à choisir l'option associée aux gains les plus forts en ne prenant en considération que ses gains propres et 3) une stratégie coopérative consistant à maximiser les gains communs » [Chauvin, 2003].

2.3 Modèles cognitifs

De nombreux jeux vidéo comme The *Sims (Maxis), Age of Empires (Microsoft), Civilization (Micropose's), Doom (id Software)* exploitent des modèles liant des comportements de sortie à des variables telles que la faim, le stress, ou encore intègrent des modèles spécifiques de conflit, de tactique de combat, de gestion politique, etc. Dans ces jeux vidéo, le rendu visuel est artistique, stylisé, souvent très impressionnant, et les processus décisionnels sont plausibles. Pourtant, ces modèles sont relativement pauvres et ne reproduisent qu'approximativement le comportement humain.

Les recherches menées dans le domaine des personnages virtuels autonomes visent en partie à intégrer des modèles cognitifs issus d'études et de théories développées en psychologie cognitive.

Parmi les modèles couramment exploités, on trouve d'émotions, de personnalité, de foules, de comportement piétonnier, de relations sociales ou socio-culturels, etc.

2.3.1 Modèles orientés buts (BDI : Croyances-Desirs-Intentions)

L'un des modèles les plus utilisés actuellement pour la modélisation décisionnelle d'agents autonomes est certainement le modèle BDI (Beliefs, Desires, Intentions). S'appuyant sur la logique formelle, ce modèle repose sur trois ensembles principaux de connaissances:

- les croyances[6], i.e. les informations que l'agent possède sur l'environnement et sur d'autres agents qui existent dans le même environnement. Elles peuvent être correctes, incorrectes ou incomplètes. Elles varient au fur et à mesure que l'agent, par sa capacité de perception ou par l'interaction avec d'autres agents, recueille plus d'informations ;
- les désirs, i.e. les buts de l'agent. Ces buts correspondent à l'ensemble des états de l'environnement, et parfois de lui-même, que l'agent aimerait voir se réaliser ;
- les intentions, i.e. les désirs retenus par l'agent qui mènent à une action et à un ensemble des plans à exécuter par l'agent pour satisfaire ses désirs.

[Rao et Georgeff, 1990] sont les premiers à proposer une architecture reposant sur le modèle BDI. Le principe général de cette architecture est de fournir à l'individu un ensemble de plans lui permettant d'accomplir différents désirs. L'exécution de ces plans est conditionnée par un ensemble de faits relatifs à l'environnement et à l'individu. Dans le cas où plusieurs plans sont sélectionnés, un système d'arbitrage est alors mis en œuvre pour les départager. Une fois qu'un plan est choisi, il devient une intention, et ses actions sont exécutées les unes après les autres, et ceci jusqu'à ce qu'une nouvelle sélection de plan soit nécessaire, soit suite à une modification des connaissances, soit du fait de la réussite ou de l'échec du plan. Chaque action composant le plan peut alors devenir un sous-but, et provoquer ainsi l'exécution d'un nouveau plan. Selon l'analyse de [Paris, 2007], le modèle BDI peut s'adapter très rapidement à la dynamique de l'environnement, que ce soit grâce à l'évaluation des préconditions des actions en cours ou à l'émergence de nouveaux plans. Sa plus grande faiblesse constitue aussi sa plus grande force : le savoir-faire des individus est figé, le système n'est pas capable d'inférer des plans qui n'ont pas été explicités. Ceci a pour conséquence de contraindre l'autonomie des individus à ce qui a été prévu lors de la description des actions. Mais cela permet aussi d'assurer que les entités simulées n'effectueront pas des comportements non-réalistes. Un autre avantage de ce modèle est sa grande rapidité d'exécution. En effet, même s'ils restent dépendants du nombre d'actions présentes dans le système, les choix imposés à l'algorithme de décision sont assez restreints.

Parmi les travaux sur la modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes, on peut citer [Gratch and Marsella, 2004], [Gratch, 2002], [Silverman, 2002].

[6] nous entendons croyances au sens représentations internes de l'agent de la situation. En psychologie sociale, le terme croyance renvoie à un concept plus complexe (définition : « *la croyance correspond à la position d'un individu par rapport à une idée* » [Baggio, 2006]

2.3.2 Modèles de personnalité

Bien que la personnalité joue un rôle important dans la détermination du comportement des individus [Ortony, 1992], la plupart des agents virtuels autonomes s'appuient sur une représentation ad hoc de la personnalité sans fondement sur des travaux en psychologie cognitive. « *L'absence de fondement théorique conduit généralement à des comportements peu naturels* » [Ochs, Sabouret *et al.*, 2009].

Les travaux en psychologie se sont essentiellement intéressés à la personnalité comme outil de caractérisation des comportements des individus. Les modèles proposés sont définis par un ensemble de facteurs de personnalité, chaque facteur étant associé à des propriétés spécifiques du comportement. Il existe différents modèles : sur 7 facteurs [Cloninger, 1987], 16 facteurs [Cattell, 1965], 3 facteurs [Costa et McCrae., 1985], ou encore 2 facteurs: l'extraversion et le neuroticisme [Eysenck, 1991]. [Costa et McCrae., 1996] ajoutent 2 traits à leur premier modèle et proposent le modèle big five ou modèle OCEAN. OCEAN lie des tendances à effectuer certains comportements avec des traits de personnalité. Dans ce modèle la personnalité est décrite selon cinq facteurs primaires :

- l'ouverture à l'expérience (O) (i.e. curiosité et imagination),
- le caractère consciencieux (C) (organisation plutôt que spontanéité ; orienté vers des buts),
- l'extraversion (E),
- le caractère agréable ou agréabilité (A),
- le névrosisme ou neuroticisme (N) (contraire de stabilité émotionnelle).

Ce modèle a largement été utilisé pour la modélisation de personnages virtuels autonomes. Parmi les environnements virtuels pour l'apprentissage, on peut citer Pancho (Pedagogical AgeNt to support Colaborative Human grOups) pour la formation au travail en équipe [Aguilar *et al.*, 2007], STEVE pour la formation au maintien de la paix [Swartout, Gratch *et al.*, 2006], EMILE [Gratch, 2000], etc.

2.3.3 Modèles d'émotions

« *Malgré les différentes approches proposées par les psychologues pour catégoriser les émotions, tous s'accordent pour différencier émotion et humeur. Selon eux, l'émotion a une très courte durée d'apparition (quelques secondes), car elle deviendrait désorganisante de par son intensité. L'humeur, au contraire, dure plus longtemps. Ainsi, la colère durera tout au plus quelques minutes, tandis que l'humeur irritable pourra durer plusieurs jours. La plupart des auteurs définissent l'humeur comme l'agrégation temporelle des différents états émotionnels traversés par l'agent* » [Lhommet, Lourdeaux et Barthès, 2011c].

Une définition standard des émotions n'existe pas. Selon [Kleinginna et Kleinginna, 1981], il existe 92 définitions différentes du concept d'émotion dans la littérature. Nous utilisons la définition de l'émotion comme des états conscients [Ledoux, 1994]. Les émotions d'un agent évoluent en fonction de son environnement, de ses actions, de ses perceptions, de son état physique et physiologique.

Les travaux dans le domaine des agents virtuels dotés d'émotions portent sur trois points :

1) le déclenchement de l'émotion ;
2) l'expression de l'émotion afin de la rendre perceptible
3) la tendance à l'action selon l'émotion [Ochs, Sabouret *et al.*, 2009].

Les travaux dans le domaine des ACA se focalisent essentiellement sur l'expression faciale des émotions. Ici, nous nous intéressons au déclenchement et à la tendance à l'action.

Les agents virtuels peuplant les environnements virtuels et dotés **d'émotions** s'appuient soit sur des modèles ad-hoc, soit sur des modèles informatiques simplifiés de théories en psychologie cognitive (e.g. on peut citer le modèle OCC [Ortony *et al.*, 1990] ou sur le modèle de Lazarus [Lazarus, 1991]).

La théorie émotionnelle **OCC** est certainement la plus répandue dans le domaine des ACA [Ortony *et al.*, 1990]. Elle détermine 22 émotions ainsi que les étapes de l'évaluation d'une situation de manière computationnelle et est donc relativement propice à l'implémentation. Cette théorie spécifie comment les émotions sont des réactions pondérées à des événements (et leurs conséquences), à des actions d'agents, à des objets. Les émotions peuvent aussi être liées aux buts (joie, détresse, espoir, peur, déception), aux normes (fierté, honte, admiration, reproche), aux goûts (amour, haine). Par exemple, un événement permettant de réaliser un but déclenche de la joie ; une action de l'agent contraire à ses principes déclenche de la honte ; la perception d'un objet peut déclencher du dégoût suivant les

préférences de l'agent. Le modèle OCC définit ainsi trois classes d'émotions, chacune regroupant des émotions types déclenchées par le même aspect du monde. Un critère d'évaluation (appelé variable centrale) est associé à chaque classe et permet de déterminer le type et l'intensité de l'émotion déclenchée suivant les buts, principes et préférences de l'agent. [Egges *et al.*, 2004] définissent un modèle générique de l'impact de la personnalité OCEAN sur le ressenti émotionnel OCC (émotions et humeur). Les auteurs implémentent ce modèle au sein d'un agent conversationnel capable d'interpréter l'état émotionnel d'un interlocuteur humain et d'adapter en conséquence son propre état pour synchroniser ses réponses faciales et textuelles.

Lazarus introduit, dans un cycle décisionnel classique de perception-décision-action, une théorie cognitive dans laquelle il unifie l'évaluation (*appraisal*) et l'adaptation (*coping*) (Figure 20) [Lazarus, 1991]. Il distingue deux types d'évaluation: (1) primaire, celle qui évalue la pertinence d'un événement et sa congruence ou non aux buts; (2) secondaire celle qui évalue ce qui peut ou doit être fait pour répondre à cet événement. Bien que très complète, elle fait appel à des processus cognitifs de très haut niveau difficiles à implémenter dans une architecture informatique et est donc rarement utilisée, on peut toutefois noter les travaux les plus avancés dans ce domaine à l'ICT/USC de [Gratch et Marsella, 2004]. Dans STEVE [Gratch and Marsella, 2001], des mécanismes de frames permettent de décrire des situations en terme de points de vue, de désirabilité, de probabilité d'occurrences (e.g. si l'action termine un but et une action découlant de cette action l'annule, elle est indésirable, si un agent veut effectuer une action qui termine le but d'un autre agent, elle est désirable). Les émotions sont associées à des conditions (e.g. si un événement focalisé sur un personnage est désirable et réalisé, alors la Joie de ce dernier est augmentée). L'intensité de l'émotion dépend de la probabilité qu'un but soit atteint, de la menace sur ce but, de l'importance du but et du temps (décroit dans le temps). [Gratch and Marsella, 2004] proposent EMA, une architecture d'agent cognitif émotionnel (théorie de Lazarus) et social capable de raisonner sur des connaissances incertaines et de planifier ses comportements en fonction de ses émotions et de ses relations avec d'autres agents. Ainsi, l'agent est capable de faire des compromis sur ses propres désirs en ne choisissant pas toujours d'effectuer l'action la plus désirable si une autre lui permet d'aider un agent qu'il apprécie ou de nuire à un agent qu'il n'aime pas.

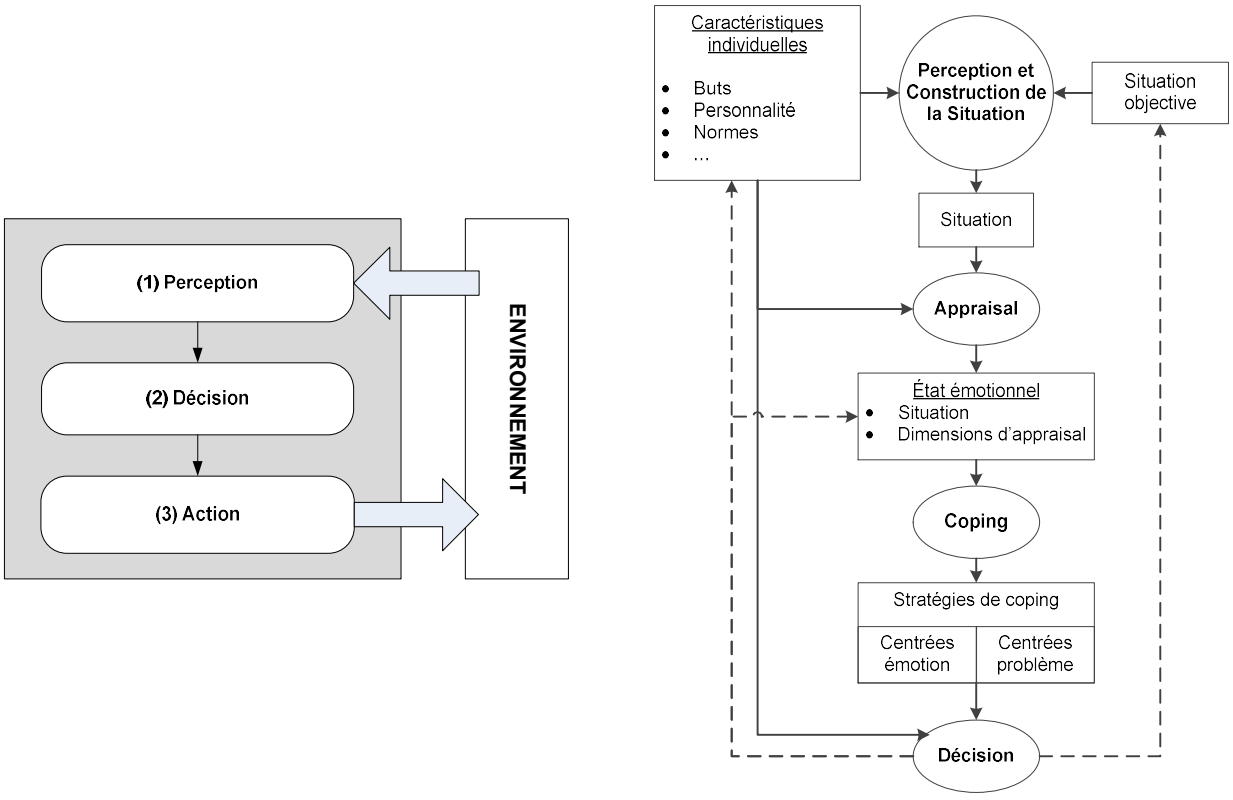


Figure 20 : Cycle d'un agent cognitif défini par les théories de l'évaluation cognitive

2.3.4 Modèles de relations sociales et modèles socio-culturels

Les **interactions sociales** jouent un rôle important pour augmenter la pertinence des comportements

des personnages virtuels. La psychologie sociale renseigne sur le fonctionnement collectif des groupes (e.g. établissement des liens affectifs, cohésion de groupes, rôles sociaux, etc.). Cette discipline s'intéresse à l'influence des processus cognitifs et sociaux sur les relations entre les individus.

Dans le domaine de la modélisation des personnages virtuels autonomes, certains travaux se sont intéressés à des modèles issus de la psychologie sociale pour modéliser des **règles d'interactions et les rôles sociaux** entre agents. Par exemple, [Rousseau *et al.*, 1998] propose un modèle dans lequel les attitudes d'un agent envers les autres sont utilisées pour déterminer son comportement. D'autres travaux proposent d'adapter le style linguistique de l'agent dialoguant à partir de variables sociales (la distance sociale et le pouvoir) [Walker *et al.*, 1997]. Dans [Gratch, 2000], la génération et l'exécution de plan est altérée en fonction du contexte social de l'agent virtuel. Dans OSSE, [Ochs, Sabouret *et al.*, 2009] proposent un modèle computationnel du modèle de [Svennevig, 1999] qui définit une relation sociale avec quatre variables principales : le degré d'appréciation d'un agent pour un autre [Isbister, 2006], [Prendinger *et al.*, 2001], la dominance [Rousseau *et al.*, 1998], [Prendinger *et al.*, 2001], la solidarité [Bickmore *et al.*, 2001] et la familiarité [Bickmore *et al.*, 2001]. A ces variables, [Ochs, Sabouret *et al.*, 2009] ajoutent une évolution dynamique des comportements sociaux des agents. Ils proposent une composante temps pour montrer que les relations sociales évoluent durant une interaction suivant l'expérience de l'individu. Ainsi, les attitudes et la familiarité d'un agent virtuel envers un autre agent évoluent suivant la valence des émotions déclenchées, *i.e.* leur connotation positive (joie) ou négative (peur). Dans OSSE, les rôles sociaux sont définis comme des paires de rôles complémentaires (employé/manager, patient/médecin, collègue/collègue, police/gangster).

Concernant la **dimension culturelle** des relations sociales, parmi les travaux en psychologie cognitive et études des facteurs humains, on peut s'intéresser aux travaux pertinents de [Helmreich, 2004] sur l'influence de la culture sur les comportements humains dans l'aviation et la médecine. L'auteur montre les liens entre émotions, personnalité, relations sociales et aspects culturels et comment ces facteurs affectent la prise de décision et la compréhension des situations. Le contexte culturel d'un individu regroupe les éléments de l'environnement qui se réfèrent à une communauté d'individus et donnent un sens à la compréhension de la situation (ex : habitudes, coutumes, langues, accent, gestes spécifiques, etc.). Peu de travaux en modélisation d'agents autonomes s'intéressent à la dimension culturelle des relations sociales. Dans ce domaine, on peut citer les travaux de [Raybourn, *et al.*, 2005] pour la simulation des aspects de leadership pour l'entraînement des forces spéciales, les travaux de [Marsella *et al.*, 2004], [Marsella *et al.*, 2010] avec entre autres PsychSim pour diverses applications, les travaux de [Silverman, 2006], [Silverman, 2007] pour la modélisation de groupes terroristes, les travaux de [Ingalls *et al.*, 2004] sur Vector pour la formation à la familiarisation culturelle et à la compréhension des différences entre les groupes de population.

2.3.5 Modèles sur le travail collectif

Selon [Hoc *et al.*, 2000], les activités coopératives peuvent être organisées en trois niveaux. Dans l'ordre où ils sont présentés, ces niveaux impliquent des coûts temporels croissants et des traitements reposant sur des informations de plus en plus abstraites :

- La coopération dans l'action regroupe les activités coopératives prenant place au niveau opérationnel. Cette catégorie inclut la création, la détection et la résolution d'interférences locales. La création d'interférences locales correspond à la volonté délibérée d'un agent d'interférer avec l'autre agent, dans le but de faciliter soit sa propre activité, soit celle de l'autre agent ou encore celle liée à une tâche commune. L'identification des objectifs de l'autre agent, sur la base d'une connaissance préalable de l'activité, permet une détection et une résolution de l'interférence par anticipation ;
- La coopération dans la planification consiste essentiellement en l'élaboration et le maintien d'un référentiel commun (e.g. but et un plan communs, répartition des rôles dans l'équipe, représentation partagée de l'environnement) ;
- La méta-coopération permet aux agents d'améliorer leurs activités coopératives en élaborant ou en maintenant un code de communication commun, des représentations compatibles et un modèle de soi-même et de son partenaire.

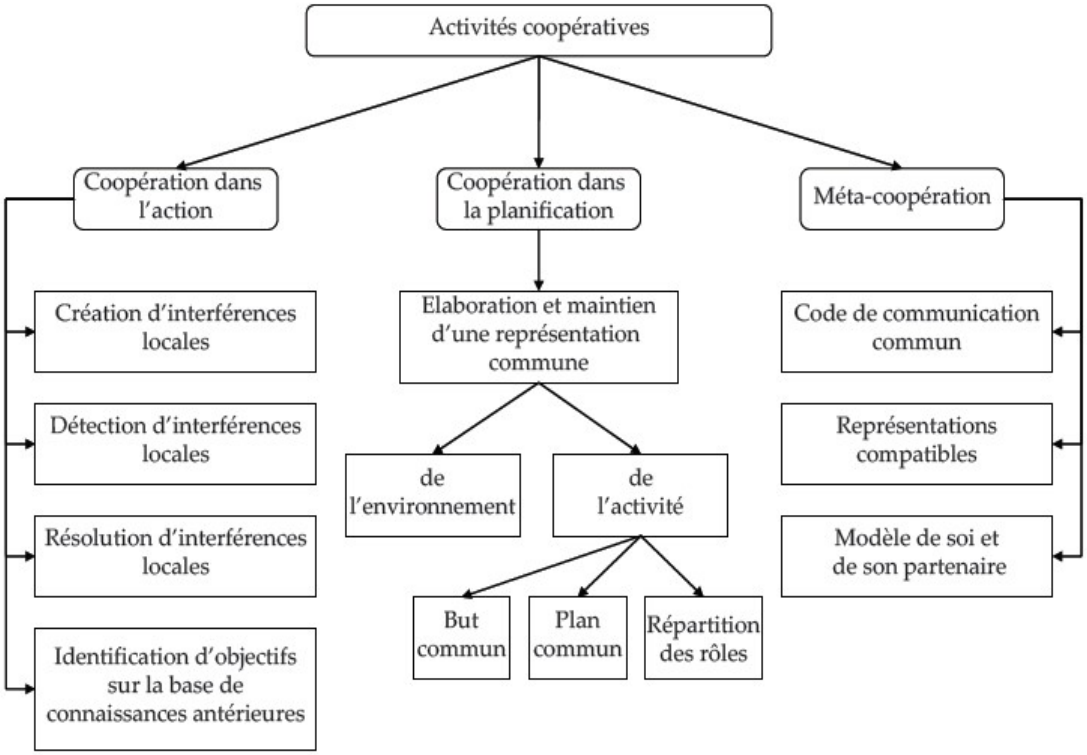


Figure 21 : Les activités coopératives d'après [Hoc et al., 2000]

Si l'idée de collectif de travail remonte aux premiers travaux théoriques sur le management et l'organisation, la dimension collective du concept d'intelligence est relativement récente. « *L'organisation constitue le lien entre l'intelligence individuelle et l'intelligence collective. Même individuelle, l'intelligence s'inscrit indiscutablement dans une perspective organisationnelle plus large que le simple périmètre de travail d'un individu. Elle relève non seulement de la capacité d'un acteur à faire face à une situation de travail particulièrement complexe, mais incidemment de l'aptitude de l'organisation à favoriser la construction d'un comportement adapté et efficient* » [Gresselle, 2007]. Dans [Gresselle, 2007], on trouvera plusieurs définitions de l'intelligence collective. Nous pouvons retenir celle proposée par [Rabasse, 1997] : « *L'intelligence collective est la mobilisation optimale des compétences individuelles à fin d'effets de synergies concourant à un objectif commun. Il y a intelligence collective lorsque l'on observe l'utilisation collective, au sein d'une entreprise, d'informations éparses détenues par différents individus au travail et que cette démarche vise à susciter un consensus d'action collective par le biais de processus individuels et collectifs* ».

Plusieurs travaux en psychologie ont été menés sur la prise en compte dans l'entreprise d'aspects de la dimension collective relatifs aux compétences (compétences collectives ou distribuées) et en lien avec les modalités réelles d'organisation des collectifs de travail afin d'illustrer la complexité de leurs liens [Marc et Amalberti, 2002], [Rogalski, 1998]. À partir d'une étude réalisée au sein d'une grande entreprise [Segrestin, 2004], [Largier, Delgoulet et De la Garza, 2008] montrent comment se construit de façon collective un fonctionnement efficace d'une organisation du travail.

2.3.6 Modèles d'erreurs

2.3.6.1 Définition de « l'erreur »

Comme nous l'avons expliqué au chapitre II.2.1, [Reason, 1990] distingue les erreurs des violations. Les violations sont des infractions intentionnelles à une règle de sécurité alors que les erreurs sont des écarts non intentionnels pouvant être attribués à la méconnaissance, à l'inexpérience. [Reason, 1990] donne la définition générique suivante de l'erreur : elle « *couvre tous les cas où une séquence planifiée d'activités mentales ou physiques ne parvient pas à ses fins désirées, et quand ces échecs ne peuvent être attribués à l'intervention du hasard* ».

L'objectif de définition de l'erreur dépend de la finalité de l'investigation sur l'erreur. Si le but est d'identifier les responsabilités, l'erreur est considérée en tant que résultat. Si au contraire, l'objectif est de comprendre les mécanismes de la production de l'erreur, elle est considérée comme un processus.

[Amalberti, 1996] s'interroge sur la définition de l'erreur : est-ce le fait de ne pas atteindre un objectif qu'on s'est fixé (définition du psychologue), un écart à la norme (conception en vigueur dans l'industrie) ou un accident mesuré par la gravité des conséquences (approche sécurité des systèmes) ?

Selon [Amalberti, 1996], l'erreur n'est grave que si ces conséquences le sont. On peut contrôler ces conséquences par des mécanismes de récupération d'erreur. Elle est le reflet des stratégies mises en place par l'intelligence qui, par un souci de performance (réduction de la complexité, anticipation), comporte une prise de risque. Mais ce risque est assumé, et même utilisé dans les stratégies d'adaptation et de récupération. Un accident n'est pas le résultat d'une erreur. C'est le résultat d'un enchaînement de causes qui fait que l'erreur n'est pas détectée, ou trop tard, ou que sa gravité est mal évaluée. L'accident est révélateur d'une faiblesse des défenses du système. En effet, il faut considérer que les erreurs font partie de son fonctionnement normal. Un système bien conçu possède des défenses contre les conséquences des erreurs qui surviennent inévitablement.

Malgré la responsabilité de l'homme dans l'apparition de l'erreur, [Hollnagel, 1998] insiste sur sa place en tant qu'agent de fiabilité irremplaçable. De par sa capacité d'adaptation, l'homme peut s'accommoder aux exigences de l'environnement et de la tâche. De nombreux travaux se sont intéressés aux modèles d'erreurs et aux mécanismes de production de l'erreur. Les travaux sur l'erreur humaine sont très vastes, nous ne présentons ici qu'une infime partie de ces modèles.

2.3.6.2 Modélisation de l'erreur

Les erreurs humaines sont très variées et n'ont pas de taxinomie unique. Plusieurs modèles ont été proposés, comme le modèle de [Norman, 1981], de [Reason, 1990], de [Ben Amhed, 2001], de [Amalberti *et al.*, 2001]. Nous détaillons ici le modèle CREAM.

[Hollnagel, 1993] s'intéresse à l'étude de l'erreur humaine dans le cadre de la fiabilité humaine dans les systèmes critiques. Dans son travail, il représente l'erreur comme une dérive entre les caractéristiques de l'action réelle et celles de l'action prescrite. Il ne s'est pas uniquement intéressé à la classification des erreurs, mais met en place un mécanisme de recherche des causes de ces erreurs. Pour ce faire, il a proposé la méthode CREAM (Cognitive Reliability for Error Analysis Method) composée de trois éléments : un modèle de cognition (décrit au chapitre III.2.4.1.3), un schéma de classification et une méthode d'analyse [Hollnagel, 1998]. Cette dernière décrit, dans le cas d'une analyse rétrospective, comment effectuer l'analyse des actions erronées en vue d'inférer leurs causes probables et comment des concepts et des catégories sont appliqués pour fournir des explications sur ces inférences. Pour rechercher ces causes, la méthode utilise le schéma de classification qui regroupe l'ensemble de toutes les causes possibles. Dans ce schéma, les causes sont répertoriées en trois principaux ensembles de facteurs qui ont une influence sur les actions erronées : les facteurs individuels, technologiques et organisationnels. L'objectif du schéma de classification est de fournir des liens explicites entre les causes et les effets, c'est-à-dire les liens de causalité. Le plus haut niveau du schéma de classification fait la distinction entre une action observable que peut réaliser un agent, et les facteurs et processus qui ont généré cette action. De ce fait, Hollnagel rejette le terme « *erreur humaine* », qui désigne de manière confuse ces deux aspects, et utilise le terme « actions erronées » pour faire référence aux actions observables. Pour mettre en évidence cette distinction, Hollnagel utilise l'analogie des « *phénotypes* » et « *génotypes* », pour désigner respectivement les actions erronées et les mécanismes causaux sous-jacents. Il présente les phénotypes simples suivants (Figure 22) :

- Répétition : une action est répétée dans une tâche ;
- Inversion : deux actions adjacentes sont inversées ;
- Omission : une action est omise dans une séquence ;
- Délai/Retard : une action est réalisée trop tard ;
- Prématurité : une action est réalisée trop tôt.
- Remplacement : une action dans une tâche est remplacée par une autre ;
- Insertion : une action qui existe ailleurs est insérée dans cette tâche ;
- Intrusion d'une action externe qui n'a aucun rapport avec la tâche actuelle.

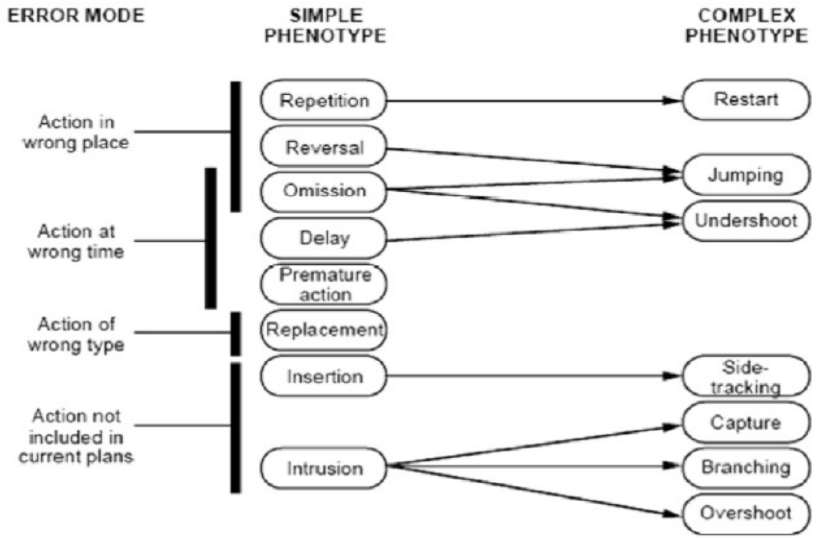


Figure 22 : Classification des erreurs selon [Hollnagel, 1993]

[Hollnagel, 1998] précise la signification de ces phénotypes comme résumée dans le tableau suivant :

Groupe	Phénotype	Définition/Explication
Temps	Trop tôt	Action effectuée avant qu'un signal ne soit donné ou que les conditions requises pour son exécution ne soient satisfaites (action prématurée)
	Trop tard	Action commencée trop tard (action retardée)
	Omission	Action qui n'a pas du tout été effectuée (dans l'intervalle autorisé)
Force	Pas assez	Force insuffisante
	Trop	Surplus de force, trop d'efforts
Durée	Trop longue	Action continuéé au-delà du point où elle devrait être arrêtée
	Trop courte	Action arrêtée plus tôt qu'elle ne le devrait
Distance Magnitude	Trop loin	Mouvement pris trop loin
	Trop courte	Mouvement pris trop près (pas assez loin)
	Trop vite	Action effectuée trop vite, avec trop de vitesse ou achevée trop tôt
	Trop lent	Action effectuée trop lentement, avec trop peu de vitesse ou achevée trop tard
Direction	Mauvaise direction	Mouvement dans la mauvaise direction, i.e. avant au lieu de arrière ou gauche au lieu de droite
	Mauvais mouvement	Le mauvais type de mouvement (e.g. appuyer sur un bouton au lieu de le tourner°
Mauvais objet	Proche	Objet qui est à proximité (physique) de celui qui devrait être utilisé
	Objet similaire	Objet qui est similaire en apparence à celui qui devrait être utilisé
	Objet sans rapport	Objet qui a été utilisé par inadvertance, bien qu'il soit sans rapport avec celui qui devrait être utilisé
Séquence	Omission	Action qui n'a pas été effectuée
	Sauter en avant	Une ou plusieurs action(s) d'une séquence ont été sautée(s)
	Sauter en arrière	Une ou plusieurs action(s) déjà effectuées, sont effectuées à nouveau
	Répétition	L'action précédente est répétée
	Inversion	L'ordre de deux actions adjacentes est inversé
	Mauvaise action	Action externe (extraneous) ou action non pertinente est effectuée

Figure 23 : Signification des différents phénotypes [Hollnagel, 1993] (traduit dans [El-Kechaï, 2007]

Dans son modèle, [Hollnagel, 1993] va au-delà de la classification des erreurs pour rechercher leurs causes. Ces causes représentent les génotypes et rassemblent trois classes principales :

1. les causes liées à l'individu (e.g. les fonctions d'observation, d'interprétation, de planification, les facteurs émotionnels, psychologiques, etc.),
2. les causes externes à l'individu et
3. les causes internes à l'individu (e.g. les conditions de travail telles que les défaillances de communication, la température, le bruit, etc.).

2.3.7 Modèles spécifiques (piéton, conducteur automobile)

Il existe une littérature abondante sur la modélisation du piéton et du conducteur automobile.

Parmi les travaux sur la modélisation du piéton, de nombreux travaux se fondent sur des études psychologiques et sociologiques, notamment sur les processus de navigation ou sur la représentation mentale de l'environnement de navigation. Le lecteur intéressé trouvera une étude dans [Donikian, 2004]. Parmi les applications de ces modèles en animation comportementale on peut citer :

- Les travaux de [Shao and Terzopoulos, 2005] sur les piétons virtuels en environnement urbain. Ces travaux s'appuient sur le modèle cognitif de [Funge, 1999] ;
- Les travaux sur la planification de chemin [Paris, 2007], [Thomas, 2000], etc.

Parmi les travaux sur la modélisation du conducteur on peut citer :

- Le modèle COSMODRIVE [Bellet, 1998] s'appuie sur des données empiriques issues de situations de conduite réelles et plus précisément celle de « *tourne à gauche dans un carrefour* ». L'architecture est composée de 7 modules : 1) le module stratégique, 2) tactique, 3) opérationnel, 4) gestion d'urgence, 5) perception, 6) exécution, 7) contrôle et gestion ;
- Le modèle ARCHISIM [Espié, 1999], [Saad *et al.*, 1989] s'appuie sur des travaux dans le domaine de la psychologie cognitive. [Saad, 1989] s'appuie sur une analyse approfondie de l'activité en situation réelle de conduite pour mettre en évidence les connaissances et stratégies que les conducteurs mettent en œuvre pour assurer la maîtrise de diverses situations routières (e.g. franchissement d'intersection, etc.).

2.3.8 Modèles de foules

Quant aux travaux concernant la modélisation de foule, l'accent est mis sur l'animation comportementale (perception, déplacements, évitements). Ces travaux sont largement suffisants pour les objectifs qu'ils visent : films d'animation [Thalmann, 2000], simulations pour l'évacuation de bâtiments, piétons pour l'animation de villes, etc. mais ils ne permettent pas (ou peu) d'interaction entre la foule et l'utilisateur. [Musse et Thalmann, 2001] proposent viCrowd, un modèle de foule dont les comportements sont définis à trois niveaux (individu, groupe et foule) qui permet de modéliser de larges foules dans lesquelles les individus présentent des comportements crédibles réactifs, bien que ne permettant pas d'interaction avec l'utilisateur. De plus, ils ne prennent pas en compte les émotions et la personnalité. [Silverman *et al.*, 2002] implémentent des foules composées d'agents émotionnels répondant à des normes socio-culturelles pour réaliser des simulations pour l'entrainement militaire (e.g. la gestion de manifestants). L'appartenance des individus à des groupes d'intérêt commun est fixe et le modèle ne prend pas en compte la contagion des émotions. [Adamatzky, 2005] propose un modèle de foule dans lequel la contagion des émotions se fait via un modèle issu de la chimie artificielle : les émotions sont représentées par des molécules et les interactions par des formules chimiques. Le comportement des agents est déterminé par une machine à états. [Durupinar, 2010] présente un modèle de foule composé d'agents dotés de personnalités, d'émotions et d'humeur. À chaque agent est assigné un rôle (par exemple manifestant, leader, policier) qui détermine les actions qu'il peut réaliser. La prise de décision est directement déterminée par des tendances à l'action reliées à la personnalité.

2.4 Modèles de la cognition humaine : approche cognitiviste vs située

Il existe deux cadres théoriques forts visant à modéliser la cognition humaine. Le premier, la psychologie cognitiviste, considère la cognition humaine comme un système de traitement de l'information et met en évidence la place des représentations symboliques comme connaissances pour raisonner et agir. Le second, la cognition située, met en évidence la place de la contextualisation de l'action située et l'émergence des représentations à partir d'interactions sociales, i.e. en agissant.

2.4.1 Modèles issus du cadre théorique de la psychologie cognitive

Les théories **cognitivistes** traditionnelles considèrent que la cognition humaine est semblable à un système de traitement de l'information. Le cerveau est vu comme un calculateur permettant de sélectionner le bon schéma à appliquer selon les situations. La modélisation descriptive a révélé comment les personnes mettent en relation les mots et leur signification quand on les lit ; comment, en

résolution de problème, les buts sont mis en relation, de manière opportuniste et stratégique, avec des plans et des ressources limitées ; comment les décisions sont prises face à des données ambiguës, incertaines, etc. L'ingénierie logicielle s'est orientée progressivement vers le paradigme « fondé sur les connaissances ». La mémoire consiste alors à stocker des descriptions.

Après avoir distingué les modèles psychologiques théoriques et ceux ayant abouti à des modélisations informatiques, nous décrirons quelques modèles se rattachant à la forme forte du cognitivisme puis des évolutions ultérieures suite aux critiques de l'approche située de la cognition.

2.4.1.1 Modèles psychologiques et implémentation informatique

A la suite d'autres (e.g. [Sperandio, 2003]), il nous paraît utile de distinguer le modèle psychologique de sa modélisation informatique. D'un côté, des modélisations cognitives intéressantes à considérer ne sont pas forcément, à ce jour, implémentées. D'un autre côté, il est rare que les modélisations informatiques respectent la contrainte de validité psychologique dans l'intégralité de leur implantation. Dans la majeure partie des cas, seul un sous-ensemble des composants et des mécanismes « cognitifs » implémentés a pour vocation à opérer la « simulation » du modèle. Dans le cas où la modélisation informatique se place explicitement dans le champ de la psychologie, il doit d'ailleurs être clair que toute implémentation informatique ne peut être considérée sans précaution comme un modèle. Une perspective complémentaire associant Psychologie, Ergonomie et Intelligence Artificielle consiste à s'intéresser aux modèles psychologiques et informatiques du comportement dans le but d'améliorer la puissance de simulation des premiers, en même temps que la validité écologique et l'utilisabilité des seconds. Cette approche a donné lieu à des travaux récents, centrés sur les techniques de simulation du comportement [Pew *et al.*, 1998] ou sur l'intégration et l'utilisabilité de la simulation informatique des modèles cognitifs [Ritter *et al.*, 2003].

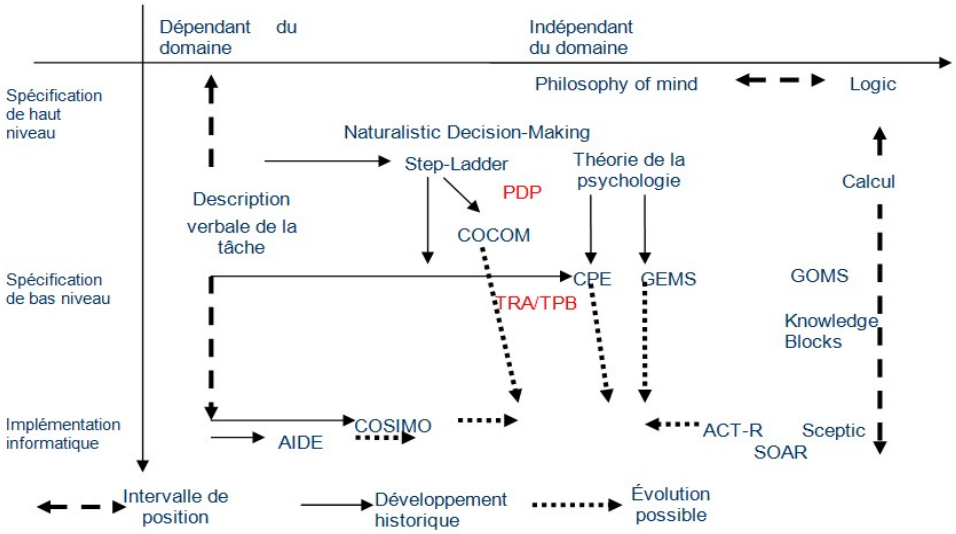


Figure 24 : Répartition des modèles psychologiques dépendants du domaine et de leur implémentation

Il existe de nombreux modèles de la cognition humaine ([Rasmussen, 1983], [Rouse *et al.*, 1986] et ACT-R [Anderson, 1993]. Nous décrivons ici Soar [Laird, 1986] et COCOM [Hollnagel, 1994].

2.4.1.2 Soar

Description

Soar [Laird, 1986] est l'acronyme de State, Operator And Result. Cette architecture fait suite au GPS-General Problem Solver [Newel, 1972] pour modéliser les processus cognitifs adoptés par un sujet pour effectuer différents types de tâches. La structure de Soar s'appuie sur trois contraintes fonctionnelles : une flexibilité et un comportement guidé par les buts, un apprentissage continu à partir de l'expérience et une « cognition » en temps interactif. Afin de se conformer à ces contraintes, Soar repose sur la génération d'un espace problème associé à chacune des tâches qu'il doit effectuer. Le système doit se créer une représentation de la tâche actuelle et c'est cette représentation qui guidera l'accomplissement de la tâche. Soar est doté :

1. D'une mémoire de travail qui contient la représentation de la situation actuelle sous la forme d'un réseau sémantique organisé dans une hiérarchie d'états, de buts (états à atteindre) et d'opérateurs permettant de procéder à des transformations d'états ;
2. D'une mémoire à long terme qui contient des connaissances procédurales codées sous la forme de règles de production ;
3. De connaissances portant sur les préférences pour la sélection d'une action parmi les actions possibles. Ces préférences peuvent être données *a priori* ou apprises lors de précédents cycles.

Pour raisonner, le système tente d'appliquer un certain nombre d'opérateurs en partant d'un état initial pour arriver à l'état désiré. Les règles dont les prémisses sont appariées avec le contenu de la mémoire de travail sont déclenchées les unes après les autres, avec comme effet possible la modification du contenu de cette mémoire. Le processus continue jusqu'à ce qu'aucune règle ne puisse plus être appariée ni aucune **transformation** appliquée. Lorsque le but final n'est pas atteint et que la sélection d'une action est impossible pour différentes raisons, il y a situation d'impasse. Soar crée alors un nouveau sous-but qu'il cherche à traiter au moyen de règles de résolution génériques (e.g. heuristique fins-moyens). Ce mécanisme appelé « *universal subgoaling* » est appliqué à chaque nouvelle impasse. Dès lors qu'une impasse est résolue, il y a création d'une nouvelle règle de production (mécanisme d'apprentissage de Soar, appelé *chunking*).

Si l'architecture Soar a fait l'objet de nombreux travaux et est généralement citée comme une architecture cognitive s'appuyant sur des fondements psychologiques, ceux-ci sont pourtant faibles. Bien que les recherches montrent une certaine similitude entre le comportement de Soar et celui des êtres humains, plusieurs aspects de la cognition humaine ne sont pas intégrés. Par exemple, dans les premières versions de Soar, si la mémoire à long terme permettait de modéliser aisément des connaissances procédurales, elle permettait moins facilement de modéliser les connaissances sémantiques et épisodiques. Pour répondre à ces critiques, des chercheurs ont enrichi Soar d'une mémoire sémantique [Wang et Laird, 2006] et d'une mémoire épisodique [Nuxoll et Laird, 2007]. Par ailleurs, Soar se prête bien pour l'implémentation de modèles psychologiques du comportement humain. Néanmoins, ce n'est pas parce qu'un modèle psychologiquement valide a été mis en œuvre à l'aide de Soar, que Soar est une architecture cognitive humaine valide [Cooper et Shallice, 1995]. Il reste que Soar est une architecture très puissante pour modéliser et rendre compte de certains phénomènes psychologiques. Un avantage non-négligeable est qu'une communauté de pratique assez large, notamment aux Etats-Unis, apporte sans cesse des améliorations à cette architecture.

Applications en modélisation décisionnelle

L'architecture Soar fait l'objet de nombreuses applications et parmi les travaux en modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes, les travaux les plus connus sont certainement ceux de Rickel et Johnson sur les différentes versions de STEVE (formation à la maintenance [Johnson *et al.*, 1998] et formation à la réalisation de missions de maintien de la paix [Rickel, 2002]). Dans sa première version, STEVE est un tuteur intelligent programmé pour aider l'apprenant à déterminer la procédure à mettre en œuvre en fonction du contexte et du but recherché par planification de l'activité. Dans sa seconde version, STEVE est un modèle d'agent permettant à des personnages virtuels autonomes de prendre des décisions de très haut niveau, comme décider de la procédure à réaliser ou de résoudre une situation de crise, en évitant que la situation ne dégénère [Rickel, 2002], [Gratch, 2003]. Gratch a notamment exploité le modèle STEVE dans lequel il a adjoint des modèles d'émotions, de personnalité, d'interactions sociales, BDI, etc.. Silverman utilise aussi l'architecture Soar pour modéliser des personnages virtuels autonomes [Silverman, 2002], [Silverman, 2006], [Silverman, 2007].

2.4.1.3 COCOM

Le modèle de contrôle contextuel COCOM (COntextual COntrol Model) [Hollnagel, 1994] est un modèle de la cognition en situation. Il suppose que les actions sont déterminées par le contexte, défini comme l'interprétation (ou compréhension) de la situation par l'opérateur, qui est influencée par ses connaissances concernant le but à atteindre, les liens entre les actions, les ressources et contraintes. L'idée de base du modèle COCOM est de séparer les connaissances sur les actions (modèle des compétences) du contrôle des actions (modèle de contrôle).

Le **modèle des compétences** concerne les connaissances sur les actions. En fonction de l'expérience de l'opérateur, une action peut être vue comme un processus complexe se décomposant en une série d'actions élémentaires, nécessitant de nombreux pas, ou au contraire comme un processus simple, élémentaire, ne nécessitant qu'un seul pas (en fait dans ce cas la séquence complexe est regroupée au sein d'une procédure d'exécution acquise au cours de l'expérience).

Par ailleurs, le **modèle de contrôle** détermine le choix de la prochaine action, dans le cadre d'une planification à court terme. Le choix d'une action dépend de l'expérience de l'opérateur, des indices externes, du niveau de détail (granularité) de l'analyse. Il est même possible pour les besoins d'un problème que les actions soient représentées à différents niveaux de détails, c'est-à-dire que la séquence corresponde à un assemblage d'actions simples ou d'actions composées. Hollnagel définit quatre modes de contrôles, correspondant à des zones temporelles même si en réalité le mode de contrôle est continu et que les frontières entre les modes de contrôles n'existent pas. Le mode de contrôle représente l'état cognitif dans lequel peut se trouver un agent, on distingue le mode :

- **Stratégique** (Strategic) : l'agent a un large horizon temporel, il cherche des solutions performantes. Il n'a pas de pression temporelle, il anticipe et planifie toutes ses actions à long terme. Il anticipe les dépendances entre les tâches et va chercher les ressources nécessaire ;
- **Tactique** (Tactical) : l'agent a un horizon temporel moins large, la planification est limitée. Il peut faire des erreurs, et choisit la situation qui lui semble la plus simple, ce qui l'amène parfois à ne pas respecter les contraintes de sécurité, certaines règles ne sont pas respectées, des compromis peuvent être faits selon les alternatives ;
- **Opportuniste** (Opportunistic) : l'agent n'a pas de temps disponible ou la situation est chaotique (par exemple il n'a pas les connaissances nécessaires). La planification ne concerne que la tâche suivante. Le résultat de l'action est peu efficace et l'agent devra peut-être effectuer plusieurs essais. Dans ce cas, il choisit la situation à laquelle il est le plus habitué. le contexte est mal compris, il raisonne par analogie (exemple : l'agent prend un tournevis comme sorte de marteau). Il se concentre sur les tâches principales et sur les indices principaux ;
- **Brouillé** (Scrambled) : l'agent n'a plus aucun contrôle sur ses choix. La pression temporelle est inacceptable, l'agent fonctionne par essais/erreurs, le choix de l'action suivante est irrationnel, il ne raisonne pas, il n'y a aucun lien entre l'action effectuée et le contexte, il n'a pas de vision de toutes les alternatives. L'action à suivre est aléatoire et absolument imprédictible.

[Hoc et Amalberti, 2003] notent que si le comportement dans le mode brouillé paraît erratique, il n'est pas non plus complètement incontrôlé comme il semble souvent décrit. La différence entre le mode opportuniste et le mode brouillé repose sur la distinction entre affordances basiques et expertes. Dans le premier cas, l'opérateur est dépendant d'affordances de l'environnement. Dans le second cas, le comportement est modelé par des affordances expertes qui sont plus cohérentes avec la tâche à accomplir et qui peuvent orienter l'activité sur des séries d'action, par opposition à des actions isolées.

Dans ce modèle à quatre niveaux de contrôle, l'accent est mis sur les différentes activités de régulation mises en œuvre par l'acteur et l'organisation pour obtenir une situation de travail acceptable. Dans le meilleur des cas l'équilibre de la situation de travail est - principalement - assuré par l'organisation du travail (conditions de travail, mais aussi maintien d'un niveau de compétence adéquat des différents acteurs via la formation). En situations dégradées, l'équilibre de la situation de travail est alors transféré aux seules compétences de l'acteur, charge à lui de « *se débrouiller* » en fonction de ce qu'il a à sa disposition ou de ce qu'il peut mobiliser. Le focus des moyens d'action s'est ainsi déplacé d'une compétence collective ou organisationnelle vers une compétence individuelle. En situations extrêmement dégradées, le focus se déplace alors des capacités de régulation individuelles vers l'existence de solutions opportunistes disponibles dans l'environnement.

A notre connaissance et à ce jour, hormis nos travaux (chapitre 3.2.3), il n'existe pas d'applications de ce modèle en modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes.

2.4.1.4 Evolution des travaux en psychologie cognitive

[Rogalski, 2004] retrace l'évolution des travaux en psychologie cognitive dans ce domaine. Elle montre que les architectures cognitives telles que ACT-R, Soar, etc. se révèlent de la forme « forte » du

cognitivisme. Elles postulent l'invariance des opérations des modules (mémorisation, catégorisation, inférences, etc.) quel que soit le contexte. Ces travaux ont été remis en question et les chercheurs dans ce domaine ont apporté des évolutions menant à une forme plus « faible » du cognitivisme.

Une première évolution est introduite par Gibson [Gibson, 1977], dans le domaine de la perception, avec la théorie des **affordances** visuelles. On retrouve la condition de l'opportunisme de l'action (en opposition avec la planification de l'action) dans la notion d'affordance. Gibson propose d'associer les capacités d'action directement aux objets perçus dans l'environnement. Il introduit le terme d'affordance, qui exprime une « opportunité » d'action offerte par un objet à un individu. La notion primitive d'affordance est la « lecture » d'une opportunité d'action dans les propriétés (visuelles) d'un objet. Les propriétés perçues du monde « déclenchent » l'action. L'affordance, qui est le fait de l'objet, fait correspondre des propriétés fonctionnelles à des propriétés perceptives. [Donikian, 2004] a mené des travaux pour appliquer ce modèle en animation comportementale d'agents virtuels.

A l'inverse de cette théorie, Ochanine défend l'idée que la représentation est le fait du sujet, qu'il ne retient de l'objet que les propriétés pertinentes pour l'action [Ochanine, 1978].

[Neisser, 1987] introduit la **psychologie écologique**. On sort le sujet du laboratoire pour prendre en compte 1) les situations dans lesquelles on veut étudier les processus cognitifs de base et 2) le fait que le sujet se constitue une représentation de la tâche dans laquelle on le place. On passe du sujet cognitif type système de traitement de l'information à un sujet écologique.

[Borghi, 2004], défend l'idée que la cognition dépend du type d'expérience et que ces expériences découlent du fait que le sujet a un corps et un système sensori-moteur. Pour lui, les concepts doivent être conçus comme situés et incarnés (**embodied**), car ils varient selon la situation et les relations entre référents et notre corps. Le paradigme de l'énaction défend aussi l'idée que la cognition est d'abord incarnée, c'est-à-dire qu'elle prend en compte le fait que chaque espèce a son propre « Umwelt » (ou milieu), évolue dans son propre monde, avec ses propres règles. Toute activité cognitive sensori-motrice s'inscrit dans une interaction physique avec l'environnement. L'approche énactive de la cognition est inspirée des travaux de F. Varela [Varela, 1996].

2.4.2 Modèle de la cognition située

Le cadre théorique de la cognition située, introduit par [Suchman, 1987] et [Winograd et Flores, 1986], met en cause les modèles fondés sur une approche cognitiviste forte. Les auteurs montrent que les processus mentaux ne peuvent être isolés du contexte. Les auteurs s'attachent à développer une conception « située » de la notion d'action, qui « *1) insiste sur la détermination de l'action par différentes variables situationnelles, 2) limite le rôle fonctionnel des plans et 3) remet en cause l'existence de représentations symboliques internes comme support des activités cognitives* » [Salembier, 2002].

[Suchman, 1987] critique la conception classique de la planification et du rôle fonctionnel des plans hérités de la tradition cognitiviste sur laquelle s'appuie l'intelligence artificielle symbolique classique. Selon cette tradition, le plan constitue non seulement une description mais aussi une prescription intégrale de l'action qui ne serait alors que la réalisation effective d'un programme totalement pré-déterminé. *« Pour les tenants de l'Action Située au contraire, le plan n'est qu'une ressource qui ne détermine pas l'action ; c'est un épiphénomène, une propriété émergente de l'action située* » [Salembier, 2002]. L'autre point de divergence entre Action Située et cognitivisme orthodoxe concerne la notion de représentation interne. Pour le cognitivisme orthodoxe la cognition peut être définie comme la manipulation formelle de représentations symboliques (l'accent est mis sur les processus de représentation et de traitement qui siègent dans la tête de l'agent). Pour l'Action Située, le rôle des facteurs situationnels (historiques, sociaux,...) est déterminant et la notion de traitement symbolique perd tout intérêt (l'accent est mis sur les processus d'interaction entre acteurs et entre acteurs et environnement). Dans le camp même des partisans de l'Action Située, il existe plusieurs positions : certains rejettent la notion même de cognition symbolique, alors que d'autres en font un cas particulier de l'activité cognitive [Greeno et Moore, 1993] ; certains acceptent l'existence de représentations internes mais refusent leur nature symbolique [Salembier, 2002].

Le courant de la **cognition située distribuée,** introduit par [Hutchins, 1995], s'intéresse à la structure des connaissances (aux représentations) et à leur transformation. Il se démarque des modèles traditionnels issus des sciences cognitives en ce que l'objet d'étude ne se trouve plus uniquement dans

la tête des sujets mais inclus les processus de coopération et de collaboration entre les sujets. Par rapport à la théorie de la cognition située, l'accent de ce courant est mis sur les déterminants historiques et culturels des processus cognitifs. Il existe des modèles de la cognition distribuée/collective en sciences cognitive ou en psychologie ergonomique mais elles sont élaborées sur la base soit d'études expérimentales (hors situations réelles) soit d'études de situations de travail complexes mais généralement très confinées. Des exemples de ces situations sont le modèle de [Hutchins, 1995] sur le pilotage d'avions ou les travaux de [Salembier, 2002] sur la régulation aérienne. Dans ces situations, les acteurs ne peuvent généralement pas transformer le cadre organisationnel, la structure du groupe et de ses rôles, ni les caractéristiques fonctionnelles des artefacts. Il est notamment reproché à ces modèles de sous-évaluer le rôle fonctionnel joué par les représentations externes dans l'environnement et de ne pas considérer les aspects socioculturels

Le courant de la Cognition Socialement Partagée (CSP) rejoint la Cognition Située avec l'idée de la réhabilitation du rôle du fonctionnement social dans l'étude de la cognition humaine [Resnick *et al.*, 1991]. Pour la CSP, « *le social ne constitue pas seulement une composante d'arrière-plan ou un élément du contexte à prendre en compte dans l'étude des mécanismes cognitifs : il détermine largement la nature des processus cognitifs mis en œuvre et la performance d'un individu rapportée à un contexte social de référence* » [Salembier, 2002]. [Resnick *et al.*, 1991] montrent que la cognition même individuelle peut être influencée par l'histoire, la tradition intellectuelle, le contexte culturel, etc.

Dans ces cadres théoriques, la cognition est socialement distribuée. Chaque pensée ou action humaine est adaptée à son environnement, i.e. située. Toute action humaine est au moins partiellement improvisée par le couplage direct de la perception, de la conception et du déplacement. Le couplage direct de la perception, de la conception et du mouvement implique une sorte d'auto-organisation avec une mémoire que nous ne savons pas encore émuler avec un ordinateur. Notre comportement est toujours immédiat à un certain niveau, il n'y a pas d'intervention de représentations. Les représentations émergent des interactions sociales. La cognition située fait suite à la **théorie de l'activité** qui décrit trois niveaux : l'activité (motivation), l'action (buts) et l'opération (conditions). L'activité est une suite d'actions construites socialement et situées dans un contexte. Selon [Clancey, 2002], une personne n'effectue pas plusieurs tâches en parallèle mais plusieurs tâches vont se dérouler en fusionnant plusieurs intérêts parallèles. « *Clancey, à l'inverse de l'approche résolution de problème, défend l'idée qu'une activité n'est pas forcément interrompue lorsque le besoin s'en fait sentir comme, par exemple, si une activité devient pressente ou si une condition externe vient interrompre ce que la personne était en train d'effectuer. Un mécanisme d'activation compétitive est impliqué. La terminaison et le processus de démarrage d'une activité sont plus subtils qu'une décision purement orientée buts* » [Donikian, 2009].

2.4.3 Conclusion

« *Les évolutions de la cognition située et de la psychologie cognitiviste se sont accompagnées d'une grande diversité — voire une certaine confusion — des références à l'une ou à l'autre des théories* » [Rogalski, 2004]. La cognition située distribuée et l'énaction sont des courants très porteurs pour la modélisation des utilisateurs interagissant en environnement virtuel [Lenay, 2006]. Ils peinent plus à s'affirmer pour la modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes. On note quelques tentatives [Donikian, 2004], [De Loor *et al.*, 2009], [Tisseau et Parenthoën, 2007], [Kallmann et Thalmann, 1999], etc. qui restent toutefois fortement ancrées dans des approches symboliques. En effet, [Greeno et Moore, 1993] pensent que « *se couper complètement des théories symboliques de la cognition serait la mauvaise chose à faire mais [..] on a besoin de faire quelque chose qui se distingue fondamentalement* ».

2.5 Sélection d'action et planification

Comme nous l'avons vu au chapitre II.1.3.1, les approches informatiques pour décrire l'activité humaine se contentent d'opérer une sélection d'action et de sélectionner des actions dans des chemins/graphes déjà décrits (e.g. automates). Par contre, les systèmes cognitifs et orientés buts recherchent une suite d'actions permettant de satisfaire un but donné. « *Le comportement n'est donc plus complètement décrit mais bel et bien calculé. La recherche des actions permettant de satisfaire un but utilise une forme de projection dans le futur permettant de raisonner sur les conséquences des actions* » [Lamarche, 2009].

Dans cette section, nous présentons un ensemble de modèles pour la gestion de tels comportements.

2.5.1 Planification

2.5.1.1 Langages de spécification et algorithmes

Le problème de planification est souvent ramené à un problème de recherche dans un espace bien défini. L'espace n'est cependant pas représenté explicitement. On utilise une représentation du domaine et du problème à résoudre (état initial, but à atteindre, opérations possibles) exprimée dans un langage de spécification (STRIPS, ADL, PDDL, etc.). A partir des spécifications dans ce langage, le planificateur déduit automatiquement une fonction de transition. Celle-ci est utilisée par un algorithme de recherche qui « *manipule ces descriptions pour produire un plan-solution (ensemble d'actions complètement ou partiellement ordonnées et instanciées, et contraintes temporellement) et des heuristiques, connaissances indépendantes du domaine ou du problème posé [Pearl, 1985] qui permettent de guider la recherche d'un plan-solution de façon à être plus efficace qu'en procédant de manière aléatoire* » [Maris, 2009]. Un critère de qualité, dépendant du type de problème résolu, est associé à chaque solution. En fonction de ce critère de qualité, on distingue deux types de planificateurs : les planificateurs non-optimaux qui recherchent des plans indépendamment de leur qualité et les planificateurs optimaux qui recherchent des solutions optimales. La résolution d'un problème réaliste est un problème ambitieux car trouver un chemin solution peut demander d'explorer un nombre exponentiel d'états. Pour faire face à cette explosion combinatoire, des algorithmes efficaces utilisent des heuristiques, qui guident la recherche dans des chemins optimaux mais possiblement sans-issues, des solutions approximées ou même des méthodes hiérarchiques qui décomposent successivement le problème en des problèmes de plus en plus simples. Plusieurs méthodes algorithmiques sont en concurrence : la recherche heuristique dans les espaces d'états (HSP, FF, etc.), la recherche dans les espaces de plans partiels (TWEAK, ICPOP, etc.), la méthode GRAPHPLAN, la planification SAT (satisfaction à base de clauses), la planification CSP (satisfaction de contraintes), etc.

2.5.2 Sélection d'action

« *Les mécanismes de sélection d'action ont été introduits pour gérer deux aspects du comportement situé : la réactivité et l'opportunisme face aux changements de l'environnement ainsi que la recherche d'une suite d'actions visant à satisfaire un but. Contrairement aux approches précédentes, le mode de fonctionnement de ces systèmes n'est pas de générer un plan complet d'actions permettant de réaliser un but donné, mais de choisir, de manière incrémentale, des actions promettant de converger vers le but. Lorsqu'une action est choisie, elle est réalisée. Une fois cette action réalisée, un nouveau choix d'action est effectué, prenant ainsi en compte les changements de l'environnement et l'acquisition de nouvelles connaissances* » [Lamarche et Donikian, 2009]. D'après [Brooks, 1999] ou Maes [Maes, 1990], il n'est pas indispensable d'être capable de raisonner sur une représentation abstraite du monde pour présenter un comportement intelligent. En couplant les capteurs et les effecteurs d'un agent situé, il est en effet possible de produire des comportements de survie correspondant à une certaine forme d'intelligence et il suffit à l'agent de savoir interpréter les informations en fonction de sa perception de l'environnement et du but poursuivi [Richard, 2001].

Le problème de la sélection d'action consiste à choisir parmi un ensemble d'actions réalisables la mieux adaptée selon : l'état de l'environnement, l'état de l'agent, les objectifs de l'agent. Le problème de la sélection de l'action ne se résume pas seulement à choisir une séquence d'actions nécessaires à la satisfaction d'un objectif : il faut faire des compromis ou encore combiner des actions dépendantes.

On trouvera dans [Edward, 2011], un descriptif des architectures proposées par [Steels, 1994], [Brooks, 1986], [Maes, 1989], [Donikian, 2009] (HPTS), [Rhodes, 1996], [Terzopoulos, 2008], etc..

« *Les mécanismes de sélection d'actions présentent de très bonnes propriétés pour l'animation comportementale. Le monde est ici considéré comme dynamique et peut donc changer sans l'intervention de l'agent… Ces mécanismes permettent donc d'allier réactivité et planification. Cependant, ces systèmes souffrent de deux défauts. D'une part, ils peuvent osciller dans le choix des actions. D'autre part, ils ne sont pas complets. Autrement dit, même si un plan d'action existe pour satisfaire un but, rien ne garantit que ces systèmes puissent le trouver* » [Lamarche et Donikian, 2009].

2.5.3 Conclusion

Les modèles que nous venons de décrire diffèrent principalement par leur coût de calcul, le niveau d'abstraction qu'ils proposent, l'exploitation d'une connaissance opératoire, leur réactivité face à des changements imprévus de l'environnement ainsi que leur capacité à exploiter des opportunités. [Lamarche et Donikian, 2009] proposent un comparatif détaillé des différentes techniques de modélisation comportementale notamment les systèmes cognitifs et orientés buts avec d'un côté l'approche planification (STRIPS, HTN) et de l'autre, l'approche sélection d'action. Les auteurs proposent un guide pour aider les concepteurs à choisir l'une ou autre approche (« *L'utilisation d'un modèle cognitif / orienté but est-elle nécessaire ou un modèle réactif est-il suffisant ? L'environnement de simulation est-il hautement dynamique ? Les temps de réaction des modèles sont-ils importants ? etc.* »). Les auteurs proposent une synthèse des avantages et inconvénients de ces approches résumées ici :

- Les mécanismes de sélection d'actions ne génèrent pas des plans complets des actions permettant de réaliser un but. Ils n'évaluent pas *a priori* tous les chemins possibles et choisissent de manière incrémentale l'action permettant de converger vers un but. Cela permet à ces mécanismes d'être très adaptatifs, dynamiques et réactifs aux imprévus et aux changements opérés dans l'environnement virtuel par d'autres agents (virtuels ou réels) ;
- La planification d'action permet de générer des plans complets et de résoudre des problèmes très complexes. Par contre, hormis HTN qui a des capacités de traitement plus rapides, la planification est relativement coûteuse en temps : dès qu'un événement extérieur non-prévu invalide un plan, une planification complète doit être refaite.

3 Nos approches

Nos travaux dans le domaine de la modélisation de comportements de personnages virtuels autonomes ont tout d'abord porté sur la modélisation de comportements en situation d'urgence, puis sur des comportements individuels en situation de travail et enfin sur des comportements collectifs.

3.1 Comportements réactifs en situation d'urgence

Dans le cadre de la thèse de Wajih Bouslimi en thèse au LAB (Laboratoire d'Accidentologie, de Biomécanique et d'études du comportement humain PSA-Renault), nous avons exploré la faisabilité d'un modèle numérique du conducteur dans les situations d'urgence fronto-arrières. Ce modèle s'inscrivait dans la continuité de précédents travaux du LAB, qui avaient permis de mettre en place une base de connaissances comportementales grâce à des expérimentations sur piste d'essai et sur simulateur de conduite. Le choix d'une approche numérique était justifié par le constat que si les études accidentologiques de la littérature apportent beaucoup de connaissances sur les aspects psychologiques des conducteurs en situation d'urgence, elles restent relativement pauvres dans la caractérisation des actions des conducteurs sur les commandes du véhicule, données nécessaires pour la conception de systèmes de sécurité active.

Les différentes études accidentologiques soulignent le rôle important du conducteur dans l'apparition des situations à risque. Lors d'une manœuvre d'urgence, il doit agir vite et souvent solliciter le véhicule dans des domaines de comportements dynamiques que la conduite normale ne permet pas d'explorer. Pouvoir comprendre le choix du conducteur, ses modes de régulations en les mettant en relation avec des facteurs internes et externes et concevoir ces relations sous la forme d'un modèle numérique permet d'appréhender la problématique des systèmes de sécurité active sous un autre angle et de tester en amont certaines prestations de sécurité.

Les principaux modèles du conducteur s'intéressent généralement aux situations de conduite normale. Les principaux travaux sur les situations d'urgence se caractérisent pour la plupart par leur approche analytique. Les auteurs cherchent à analyser et à comprendre le comportement et très peu ont essayé de procéder à sa modélisation comme l'a fait [Bellet, 1998]). Le travail réalisé par Wajih Bouslimi consistait à**modéliser et à caractériser les actions microscopiques du conducteur sur les commandes du véhicule et ceci dans les différentes phases de la situation accidentogène**.

Disposant de données d'une étude menée sur piste d'essai avec 114 conducteurs, le modèle prédictif entrées-sorties établi par Wajih Bouslimi a permis de lier les paramètres intrinsèques du triptyque

Conducteur-Véhicule-Environnement aux actions et aux performances du conducteur. Tout d'abord, l'ensemble des variables enregistrées est projeté suivant les différentes phases de la situation accidentogène définies par le modèle temporel. En procédant par analyses statistiques, les variables d'entrée et de sortie les plus pertinentes sont sélectionnées et les relations de cause à effet sont identifiées. Au total, huit variables comportementales ont été retenues. Afin d'apprendre les relations entre ces variables et être capable de les restituer, deux familles de techniques ont été appliquées :

- les réseaux bayésiens pour des prédictions qualitatives ;
- les structures neuronales pour des prédictions quantitatives. L'optimisation des structures est fondée sur un processus utilisant des algorithmes génétiques et des techniques bayésiennes.

Afin de tester la robustesse des différents modèles développés, deux bases de données différentes ont été exploitées. La première est issue d'une étude sur un simulateur de conduite et la deuxième d'une étude menée sur piste d'essai. Les tests de robustesse des modèles numériques développés donnent des résultats de prédiction encourageants et laissent entrevoir des possibilités d'exploitation intéressantes en termes de conception. Parmi toutes les variables prédites, la précision du résultat de la manœuvre arrive en pole position. Par contre, la prédiction des variables de vitesse de lâcher d'accélérateur et d'enfoncement de la pédale de frein donnent des résultats moins précis ce qui soulève des questions quant à la nature des mécanismes sous-jacents à ces actions.

3.2 Comportements décisionnels individuels : co-activités et risques

Nos travaux sur la modélisation de comportements individuels de personnages autonomes sur des sites à haut-risques ont été menés dans le projet V3S (Virtual Reality for Safe Seveso Substractors).

3.2.1 Objectifs et motivations

V3S a pour objectif de proposer des modèles pour la simulation de situations de travail dangereuses touchant aux activités de sous-traitance sur des sites à haut risque (sites Seveso notamment). Les problématiques à traiter sont des **problèmes de formation** et **d'aide à la décision**. Par l'immersion des opérateurs finaux, des équipes, des analystes de sécurité, des directeurs, dans les environnements virtuels spécialement modelés pour l'apprentissage, il doit être possible de presque « vivre » des situations critiques, amplifiant ainsi l'expérience des personnes et leur permettant d'exploiter convenablement les concepts de Facteurs Humains et les bonnes pratiques d'Organisation. Le lecteur intéressé pourra se reporter à une description détaillée à l'url http://v3s.fr.

Pour mener à bien ce projet, j'ai encadré, avec les doctorantes, plusieurs ingénieurs (M. Sbaouni, A. Ben Ayed, M. Fraslin), stagiaires (P.Y. Gicquel, N. El-Mawas, R. Ali) et étudiants (R. Perney, V. Lanquepin, J. Arce, M. Lhommet, etc.). J'ai co-encadré avec J.P. Barthès, la thèse de L. Edward. Mon collègue D. Lenne a aussi participé à ce projet, notamment avec l'encadrement de la thèse de F. Camus.

3.2.2 Positionnement

3.2.2.1 Implication de personnages virtuels autonomes

Dans le cas d'activités collectives, il est nécessaire d'entrainer à des situations de co-activité difficiles. Qu'il s'agisse de co-activités, d'activités collaboratives voir coopératives, il serait difficile de faire jouer ces différents intervenants par des animateurs voir d'autres apprenants. De plus, les situations seraient difficilement contrôlables. Dans cette optique, nous avons proposé de faire jouer ces rôles par des personnages virtuels autonomes capables de créer des situations pertinentes. Ces situations doivent alors permettre de créer une véritable réflexion et mener à une prise de conscience des risques aussi bien pour l'aide à la décision que pour des apprentissages.

Afin de proposer un simulateur générique, les rôles sont interchangeables : l'apprenant peut jouer n'importe quel rôle et les autres rôles peuvent être joués par des personnages virtuels autonomes.

3.2.2.2 Comportements adaptatifs et situés

Activité finalisée

Nous souhaitons pouvoir aider des décideurs ou entraîner des apprenants à adopter les bonnes

pratiques dans des **situations complexes de co-activité**. Nous nous situons ici dans le cadre de l'entraînement ou de l'aide à la décision mettant en scène des situations complexes centrées sur la dimension organisationnelle du travail collectif avec un fort ancrage dans l'apprentissage situé. Comme le montre le modèle de la double régulation de l'activité et les travaux en sociologie du travail, « *il existe des règles descendant de la hiérarchie de l'organisation du travail définissant des conditions de réalisation de l'activité et des règles ascendantes émergeant de l'activité des collectifs d'opérateurs confrontés à des situations singulières exigeant autre chose que la mise en œuvre de procédures formelles* » [Rogalski, 2007]. La conceptualisation des compétences professionnelles en situation de co-activité émerge des situations de travail dans un cadre social. Nous nous intéressons à l'activité collective finalisée en considérant le groupe comme un tout, sans pour autant en perdre les composants.

L'environnement doit être ouvert, non-contraint, cohérent et pertinent. Les personnages virtuels doivent s'adapter à toutes les interactions de l'utilisateur réel (e.g. enchaînement d'actions, erreurs, écarts, etc.). Prévoir tous ces cas, est extrêmement fastidieux et contraignant voire impossible si l'environnement est fortement complexe et ouvert. Nous souhaitons que les personnages virtuels ne déroulent pas seulement les bonnes procédures mais qu'ils aient des **comportements adaptatifs et situés**, qu'ils soient dotés **de capacités d'adaptation dans des environnements fortement dynamiques** et qu'ils rendent compte **de comportements émergeant du collectif.**

Il ne s'agit pas de reproduire le raisonnement humain, comme dans le cadre des approches cognitivistes, mais de rendre compte de certains processus cognitifs et d'une activité située. Le **verrou scientifique** est donc de pouvoir opérationnaliser dans une architecture informatique ces processus cognitifs. Pour lever ce verrou, nous avons proposé de nous inspirer du cadre théorique de la psychologie cognitive ergonomique. En effet, les travaux dans ce domaine ont pris en compte dans leurs cadres conceptuels et méthodologiques, l'essentiel des dimensions critiques des approches cognitivistes ayant motivé le développement de la cognition située. Cette approche s'appuie sur l'observation des activités situées, socialement distribuées et incarnées. Nous avons fait le choix de fonder les comportements des personnages virtuels autonomes sur des modèles d'activités finalisées (chapitre II.1.5). Ces modèles permettent de prendre en compte d'une part, les situations dans lesquelles on souhaite étudier les processus cognitifs et, d'autre part, l'existence du fait que le sujet se constitue une représentation de la tâche dans laquelle on le place [Rogalski, 2004]. Ils permettent alors de rendre compte de la complexité, de la flexibilité et de la variété de ce qui est observé par les ergonomes dans ces situations écologiques.

Pour exprimer ces modèles, nous avons proposé le langage de description **HAWAI-DL** (chapitre II.1.5). Si le cadre théorique de la cognition située « fort » s'abstrait de toute représentation symbolique, nous nous basons cependant dans un cadre cognitiviste et symbolique. En effet, nous souhaitons à la fois prendre en compte la situation et le contexte mis en avant par la cognition située et utiliser des représentations postulées par la psychologie cognitiviste. Ainsi, pour rendre compte de ces processus et activités situées, nous proposons de les mettre en œuvre à l'aide d'architectures et modèles cognitifs. Nos personnages virtuels autonomes doivent alors être dotés d'une architecture capable d'interpréter et d'exécuter ces modèles d'activité. Le modèle d'activité décrit en partie les plans possibles pour un but donné sous forme d'un arbre partiel. Le langage permet de définir les conditions de sélection des tâches, de préférence, de contexte, etc. Chaque agent peut avoir un modèle d'activité différent correspondant à sa mémoire à long terme (connaissances procédurales).

Planification et sélection d'action

En fonction du contexte et de ses caractéristiques, le personnage virtuel autonome doit être capable de choisir les chemins les mieux adaptés du modèle d'activité. L'architecture doit être dotée de **mécanismes de sélection d'actions**. Il reste néanmoins, selon les buts, à sélectionner les tâches de haut niveau qu'il a l'intention de réaliser. Le personnage virtuel, avant de réaliser son travail, doit prévoir un certain nombre de ressources. Il est possible que le modèle d'activité prévoit les tâches de préparation du matériel. Cependant, nous souhaitions rendre compte de la planification du travail, donc la préparation du matériel peut différer selon les caractéristiques intrinsèques des opérateurs (e.g. un opérateur qui a du temps et qui est prévoyant anticipe son travail sur le long terme, alors qu'un opérateur pressé ou stressé n'anticipe pas toutes les possibilités). Par ailleurs, il est possible qu'un

contexte imprévu survienne et que le personnage virtuel doive planifier de nouvelles tâches nécessitant d'autres ressources qu'il n'avait pas prévues (même pour un opérateur qui avait envisagé des imprévus). Il s'agit de mettre en place un système **orienté buts** et de pouvoir raisonner sur les conséquences des actions. Notre architecture doit donc proposer un mécanisme de **planification** des activités. Nous avons dans un premier temps choisi un modèle simplifié de planification.

Perception et croyances

Comme nous venons de l'expliquer, notre architecture doit permettre de programmer un niveau de contrôle fondé sur des **connaissances**. Les personnages virtuels doivent pouvoir raisonner sur des modèles à base de connaissances comme le modèle d'activité (chapitre II.1.5) mais aussi sur le modèle du domaine (chapitre II.4.4) et la représentation qu'ils s'en font ainsi que sur l'état dynamique du monde. Chaque personnage virtuel peut charger un modèle d'activité et un modèle du monde différent et ainsi refléter le fait qu'ils peuvent avoir des représentations et des perceptions de l'activité et du monde différentes. La mise à jour dynamique de l'état du monde est assurée par le module **COLOMBO** (chapitre II.4.4.1). COLOMBO a une vue omnisciente, il sait tout et voit tout. Par contre, les personnages virtuels ne sont pas omniscients, ils ne doivent être au courant que des changements d'états sur les objets auxquels ils portent une attention particulière. Pour autant, dans la réalité, des personnes peuvent voir les mêmes choses sans se les représenter de la même manière. La perception des événements doit donc être différente selon des caractéristiques internes comme la fatigue, le stress, la charge mentale, la personnalité, etc. Elle peut être partielle voire erronée. C'est pourquoi nous avons choisi le modèle **BDI** (Beliefs Desires Intentions). Ainsi, le personnage virtuel possède un module de croyances qui stocke ses propres connaissances selon ses perceptions.

Dimension décisionnelle vs comportementale

Il existe de nombreux travaux sur les déplacements d'humains virtuels ou sur la gestion des ressources (voir état de l'art complet dans [Donikian, 2004], [Paris, 2007]). Ces travaux solutionnent la problématique de l'animation comportementale et du mannequin virtuel avec un focus sur les aspects comportementaux en environnement virtuel. Nos travaux visent plus la dimension décisionnelle de haut niveau en situation de travail, et plus particulièrement l'application de procédures ou de tâches de surveillance. Par exemple, un personnage virtuel pourra prendre la décision de tourner une vanne, mais nous ne nous préoccupons pas de savoir comment il doit se positionner, placer ses mains, etc. Nous ne considérons pas non plus les problématiques de déplacements et de planification de chemins. Pour le moment, même si cette problématique est intéressante, nous n'abordons pas non plus les problèmes liés à la gestion des ressources et d'inter-blocage.

3.2.2.3 Comportements cognitifs, erreurs et violations en situations perturbées

Les automates rencontrent un vif succès en modélisation comportementale car leur formalisme permet une grande puissance d'expression et ils permettent de décrire des processus complexes [Lamarche et Donikian, 2009]. Néanmoins, il est difficile de décrire le raisonnement, les écarts à la procédure et des comportements erronés. Il faudrait pouvoir décrire, comme pour les comportements idéaux, tous les comportements possibles voire moins idéaux. En effet, l'exécution d'un automate ne peut pas faire d'omission de tâches ou d'inversion si toutes les transitions n'ont pas été pensées à l'avance.

Comme décrit au chapitre II.2.1, nous nous intéressons à deux types d'écarts : les violations intentionnelles et les erreurs non-intentionnelles.

Violations

Concernant, les **violations** intentionnelles, nous avons choisi le modèle des activités et des conditions limites tolérées par l'usage (ALU/CLU) [de la Garza *et al.*, 2007]. Ce modèle est décrit au chapitre II.2.4. Ainsi, les personnages virtuels autonomes représentant des opérateurs experts, sont amenés à faire des compromis entre sécurité et productivité lorsque la situation se dégrade et qu'ils sont soumis à des pressions temporelles. Ces compromis peuvent être différents selon les sites puisqu'ils reflètent des zones de compromis tolérés par l'usage par un site ou un groupe de personnes donnés. Comme nous avons choisi d'intégrer cette notion de compromis dans le modèle d'activité, il est possible de

sélectionner les modèles d'activité adaptés à chaque site modélisé et joué.

Erreurs

Concernant les **erreurs**, nous souhaitons rendre compte de certaines erreurs qui peuvent survenir lorsque les opérateurs sont soumis à des pressions temporelles et/ou selon certaines caractéristiques internes des opérateurs (e.g. expertise, charge cognitive, prudence, etc.). Il ne s'agit pas de comprendre comment les erreurs se construisent et s'appliquent d'un point de vue général, mais plutôt quand elles surviennent et quelles conséquences elles peuvent avoir dans un contexte précis. Toujours, dans le cadre d'une approche située, nous nous sommes donc orientés vers le modèle **CREAM** de E. Hollnagel. Hormis E. Hollnagel, la plupart des chercheurs privilégient une approche mixte entre les causes profondes des erreurs qu'Hollnagel appelle génotype et leurs manifestations, les phénotypes. L'approche proposée par E. Hollnagel permet non seulement de décrire les erreurs mais aussi d'en avoir une approche plus explicative. De ce fait, ces approches sont plus contextualisées, plus opportunistes et moins généralisables. Elles sont construites en fonction de la tâche à évaluer et elles peuvent donc introduire des composantes temporelles dans la classification des erreurs ou des informations plus en relation avec le domaine [Marc, 2002]. A partir de cette approche, les personnages virtuels autonomes vont reproduire aussi bien les génotypes (actions erronées) que les phénotypes (mécanismes causaux de l'erreur). Ces erreurs sont générées par des raisonnements biaisés sur les connaissances (e.g. mauvaise interprétation des préconditions, du contexte, etc.).

Raisonnement

Le raisonnement qui mène à ces violations et à ces erreurs peut être induit par un modèle de la cognition (architecture cognitive) (voir chapitre III.2.4.1). Les théories cognitivistes traditionnelles et les modèles comme Soar, ACT-R ou encore SRK, considèrent que la cognition humaine est celle d'un système de traitement de l'information. A l'opposé, le cadre théorique de la cognition située considère que la cognition est socialement distribuée et essentiellement opportuniste. Notre choix s'est porté sur le modèle **COCOM** d'E. Hollnagel. Ce modèle, même s'il se rapproche des théories cognitivistes, permet de décrire le passage de compétences collectives ou organisationnelles vers une compétence individuelle. Par ailleurs, le **modèle de compétences** présent dans ce modèle permet de décrire les connaissances sur les actions. L'action peut être décrite comme un processus complexe pouvant être décomposé en plusieurs actions élémentaires. Cette décomposition dépend du but et de l'analyse du contexte. Pour nous, la question est moins de reproduire des connaissances que d'activer ou de mobiliser les connaissances mobilisables en situation. Ainsi, nous avons choisi d'apparenter ce modèle de compétences au **modèle d'activité** construit avec HAWAI-DL. Les **modes de contrôle** permettent alors de savoir comment contrôler et interpréter ce modèle d'activité en fonction des objectifs, de la planification, du temps disponible, etc. (Figure 25). Les quatre niveaux de contrôle décrivent les types de contrôle exercés par le sujet en fonction de la dégradation de la situation.

Le mode de contrôle est déterminé par un **état cognitif ou des pressions temporelles** (Figure 25).

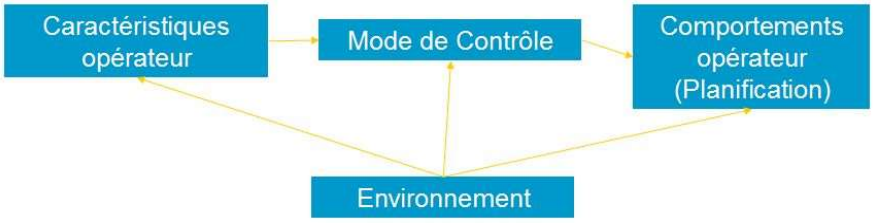


Figure 25 : Influence de l'environnement et des caractéristiques humaines sur les comportements des opérateurs

Caractéristiques personnelles

Les modèles cognitifs d'émotions et de personnalité, présentés au chapitre III.2.3, sont des modèles complexes. Dans V3S, nous n'avions pas la nécessité de reproduire autant de **caractéristiques personnelles influençant la cognition**. Nous avons considéré deux types de caractéristiques : des caractéristiques statiques et des caractéristiques évolutives.

Comme **caractéristiques statiques**, nous souhaitions pouvoir reproduire des comportements de compromis cognitifs entre productivité et sécurité. Ces compromis sont des violations généralement

opérées par des experts qui ont conscience du risque pris mais de nature plus « imprudente » à cause des circonstances/contexte. Des novices imprudents peuvent aussi ne pas faire certaines tâches liées à la sécurité, non pas parce que ce sont des compromis mais parce qu'ils n'ont pas les connaissances nécessaires. Dans ce cas, ce sont bien des erreurs. Nous proposons donc de modéliser des personnages **novices ou experts** et **prudents ou imprudents**. Même si dans la réalité, l'expérience évolue avec le temps, ici l'expertise est une caractéristique statique car nous nous intéressons au cadre limité d'une session. Et même si au cours d'une session le personnage virtuel acquiert des connaissances, elles ne modifient pas profondément son expérience. Le caractère prudent/imprudent peut être apparenté au facteur d'influence lié au caractère consciencieux (Conscientiousness) du modèle OCEAN.

Comme **caractéristiques évolutives**, nous souhaitions modéliser essentiellement des caractéristiques physiologiques directement liées aux tâches et au temps de travail comme la fatigue, la faim, la soif, la charge cognitive, la force physique. Nous souhaitions aussi modéliser des caractéristiques physiologiques résultant de ces premières caractéristiques comme le stress, la capacité de perception, la vigilance. Au niveau des émotions, le modèle OCC est bien trop complexe pour nos besoins dans le cadre des co-activités modélisées. Dans un premier temps, nous souhaitions représenter la joie/énervement, la motivation et la confiance en soi.

Ces caractéristiques évolutives sont calculées de manière ad-hoc, i.e. sans réel fondement sur le modèle OCC ou sur des modèles de physiologie. Un réseau comportemental très simplifié permet de faire évoluer ces caractéristiques selon :

- Les buts : e.g. la réussite ou l'échec d'une tâche peut modifier la joie/énervement et la confiance en soi ;
- Les tâches : e.g. l'urgence des tâches à gérer peut augmenter le stress, la répétitivité, la durée des tâches, des tâches physiques ou un équipement lourd peuvent augmenter la fatigue, la charge cognitive peut rendre moins vigilant ;
- L'environnement : e.g. les conditions météorologiques, particulièrement la température fait varier certaines caractéristiques (e.g. selon l'heure de la journée la faim et la fatigue évoluent différemment) ; un environnement trop sonore ou lumineux peut faire baisser la vigilance;
- Les relations aux autres agents : e.g. la pression, des reproches ou des félicitations du manager peuvent modifier le stress et la motivation ; la non-réalisation d'une tâche devant être réalisée par un autre agent peut augmenter la colère.

3.2.3 L'approche : MASVERP

Dans la thèse de Lydie Edward, co-encadrée avec Jean-Paul Barthès, nous avons proposé l'architecture **MASVERP** (Multi-Agent System for Virtual Environment for Risk Prevention) pour modéliser les comportements des personnages virtuels autonomes. MASVERP est développé sur plateforme **multi-agent OMAS.** OMAS a été développé au laboratoire Heudiasyc UMR7253 par Jean-Paul Barthès pour construire des agents cognitifs intelligents (plateforme développée en LISP). MASVERP a été conçu en appliquant la méthodologie agent GAIA [Wooldridge *et al.*, 2000]. Le lecteur intéressé par plus de détails sur cette phase de conception peut se reporter à la thèse de Lydie Edward [Edward, 2011].

3.2.3.1 Architecture multi-agent MASVERP

MASVERP est composé de plusieurs agents : un agent manager qui met à jour l'état du monde, des agents opérateurs, un agent communication qui se charge des échanges entre l'environnement virtuel et les agents opérateurs. Un agent opérateur doit pouvoir sélectionner, parmi un ensemble d'actions réalisables à un instant t, celles qui sont les mieux adaptées en fonction de l'état de l'environnement, de son état interne, de ses objectifs et de sa perception. Chaque agent opérateur a donc une boucle « perception-décision-action » et est composé de cinq modules principaux (Figure 26) :

- **Module de perception** : la perception de l'agent représente toutes les informations provenant de l'environnement qui lui sont accessibles. L'agent n'est pas omniscient comme COLOMBO. Il ne possède donc pas une représentation complète de l'environnement mais cette représentation est construite en fonction du résultat de ses interactions avec l'environnement ;

- **Module de croyances** : les croyances de l'agent correspondent à ce que l'agent croit connaître de l'environnement. Ses croyances peuvent être différentes de ses perceptions (e.g. si l'agent perçoit un feu mais qu'il est stressé, il peut ne pas l'avoir intégré comme connaissance) ;
- **Module de buts** : les buts correspondent aux besoins, devoirs et urgences de l'agent (e.g. changer les tuyaux, faire le plan de chargement, faire une pause, gérer un feu, etc.) ;
- **Module comportemental** (C3P) : ce module contient les caractéristiques statiques et la mise à jour des caractéristiques évolutives ;
- **Module décisionnel** : ce module est responsable du choix des plans à mettre en œuvre (sélection d'action et planification).

A chaque modification de l'environnement virtuel, l'agent opérateur perçoit l'environnement. Selon ce qu'il fait et ce qu'il voit, il met à jour ses perceptions. Selon ses perceptions et ses caractéristiques personnelles, il met à jour ses croyances. Ainsi, lorsqu'il effectue une action sur un objet, il met à jour l'état de cet objet (si l'action réussit, il modifie l'état de l'objet et si l'action échoue, il en déduit d'autres états) ; s'il prend connaissance de certains éléments, il met à jour sa perception puis selon son état ses croyances. Les croyances enrichissent la mémoire de travail de l'agent (mémoire épisodique et sémantique). A partir de ses croyances, il adapte ses buts. Si son but change, il cherche les plans de haut niveau à mettre en œuvre pour atteindre ce but (tâches complexes les plus élevées hiérarchiquement). Il s'agit d'une étape de planification pour trouver les plans les plus désirables. Si son but n'a pas changé, il poursuit le plan de haut niveau choisi et sélectionne les tâches à effectuer en fonction du contexte, des préconditions de la tâche et de ses caractéristiques personnelles.

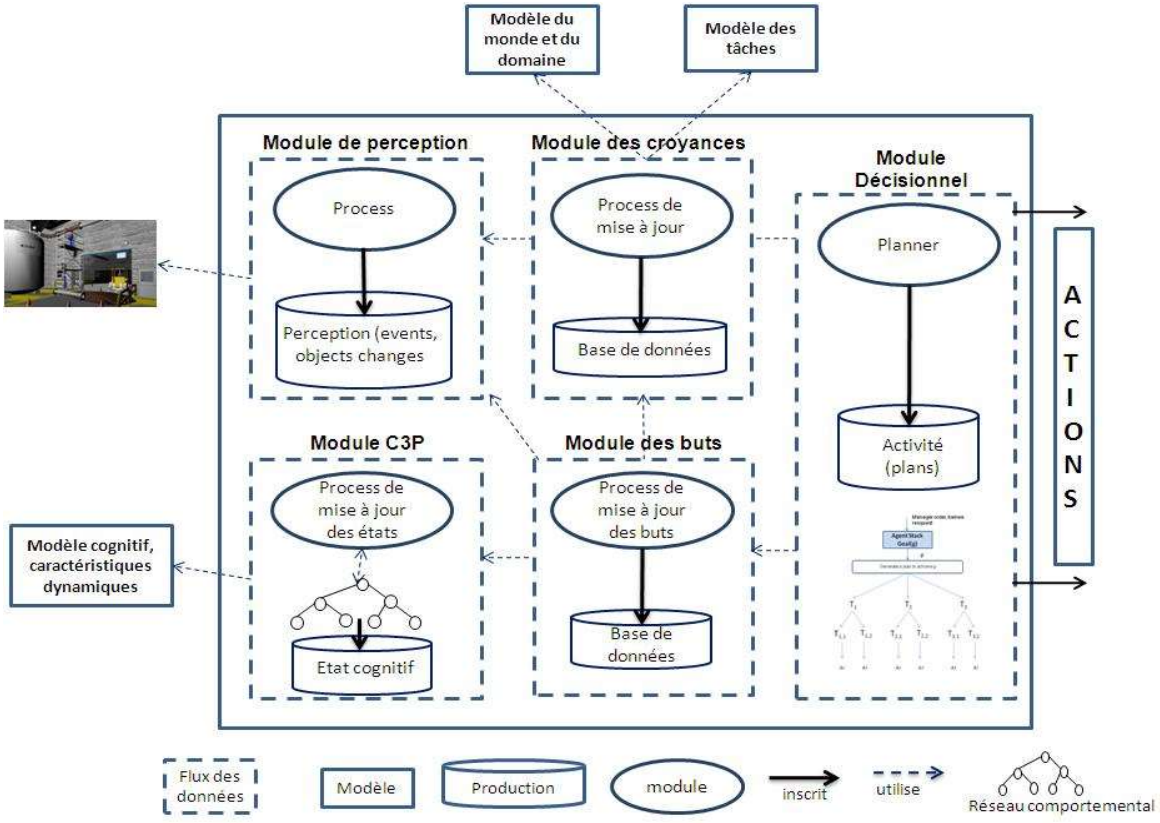


Figure 26 : Architecture d'un agent opérateur dans MASVERP

3.2.3.2 Module comportemental

Le module comportemental permet de mettre à jour les caractéristiques personnelles évolutives. Comme nous l'avons expliqué ce module n'est pas fondé sur des théories cognitives type OCC pour les émotions ni sur des modèles physiologiques mais sur un modèle ad-hoc.

Evolution des caractéristiques

Avec Margaux Lhommet et Lydie Edward, nous avons proposé, dans un premier temps, un réseau comportemental simplifié pour représenter les facteurs d'influence entre les différentes caractéristiques

personnelles (Figure 27). On trouvera une description détaillée des formules mathématiques du réseau comportemental [Edward, 2011] et dans [Lhommet, 2007].

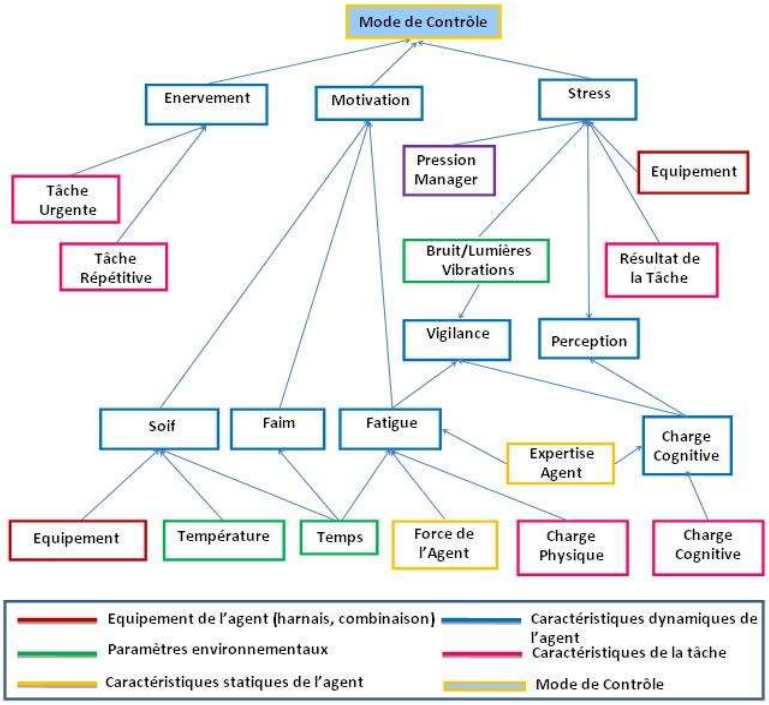


Figure 27 : Module comportemental

Visualisation sur les interfaces

L'agent interface d'un agent opérateur permet d'initialiser et de visualiser, pendant la session, ses caractéristiques personnelles (Figure 28). Pour chaque caractéristique cognitive, il est possible d'éditer son évolution dans le temps (Figure 29).

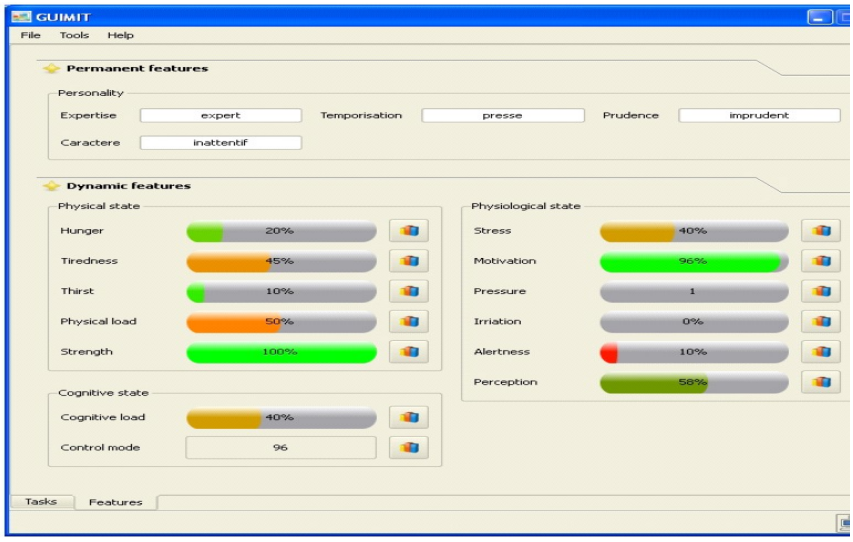


Figure 28 : Suivi des caractéristiques personnelles des PVA

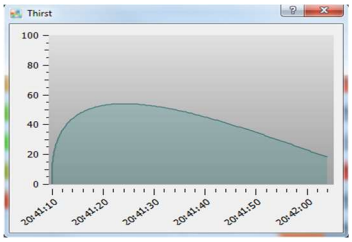


Figure 29 : Evolution des caractéristiques personnelles dans le temps

Il est aussi possible de suivre les tâches réalisées par un personnage virtuel autonome (Figure 30).

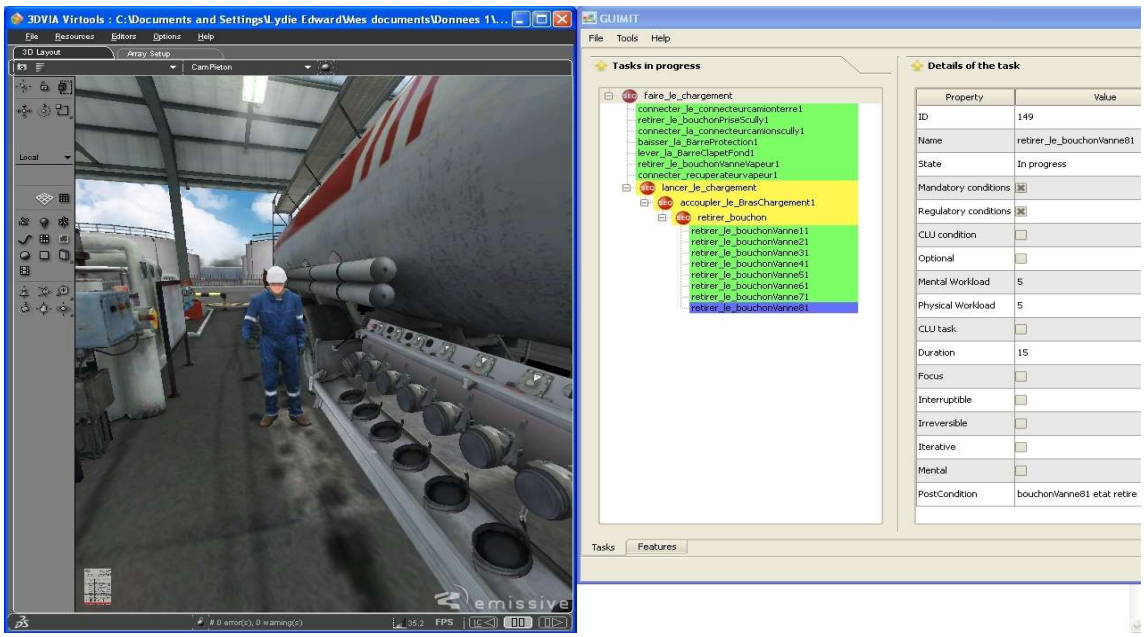


Figure 30 : Evolution de l'activité d'un PVA

3.2.3.3 Relations modèle d'erreurs CREAM et COCOM dans MASVERP

Selon leur mode de contrôle et leurs caractéristiques personnelles, les personnages virtuels autonomes vont opérer certaines erreurs ou compromis.

Les **experts prudents ou imprudents**, en mode stratégique, anticipent de façon large et ne prennent aucun risque. En mode tactique, les **experts imprudents** vont commencer à faire quelques compromis entre productivité et sécurité (« *erreurs d'omissions* »). En mode opportuniste, pour ces experts imprudents le nombre de compromis augmente. Les **novices** prudents ou imprudents, quel que soit le mode, vont opérer des erreurs par méconnaissance de l'environnement ou des procédures (Tableau 7).

Novices ou experts, prudents ou imprudents, en mode **opportuniste**, s'ils n'ont pas les ressources nécessaires, raisonneront par analogie, i.e. ils prendront des objets (« *outils secondaires* ») pouvant servir d'outils et remplaçant l'outil principal (Tableau 7). Aussi, ils se focaliseront sur les tâches principales (tâches focus). En mode **brouillé**, prudents comme imprudents, novices comme experts raisonnent par affordance et réalisent des tâches qu'ils savent faire même si cela n'a rien à voir avec ce qu'ils sont censés faire (Tableau 7).

	Pression temporelle	Anticipation	Planification
Stratégique	Aucune	Large	Décision optimale avec prise en compte des : ▪ Dépendances entre les tâches ▪ Interactions entre les objets multiples
Tactique	Acceptable	Moyenne	▪ Non-respect des règles ▪ Visions des alternatives
Opportuniste	Moyenne	Mauvaise	▪ Contexte mal compris ▪ Planification limitée (par analogie) ▪ Focus
Brouillé	Très forte	Aucune	▪ Essai-erreur ▪ Raisonnement par affordances ▪ Pas de vision des alternatives

Tableau 7 : Erreurs et modes de contrôle

Aussi, si les personnages virtuels autonomes sont **fatigués** physiquement, sur des tâches physiques, ils peuvent des erreurs de type « *pas assez fort* », « *pas assez loin* », etc. Au contraire, s'ils ne sont pas fatigués et sont « **non-méticuleux** », ils peuvent faire des erreurs de type « *trop fort* ». S'ils ont une **charge cognitive** élevée, ils font des erreurs de « *répétition de tâches* » (« ils *ferment deux fois la porte car ne se*

souviennent plus qu'ils l'ont fait »). S'ils sont **pressés**, ils démarrent les tâches « *trop tôt* » (« *erreur d'action prématurée* »). Quelques-unes de ces erreurs sont présentées dans le Tableau 8.

Phénotype Simple	Mode	Paramètres influant
Répétition	Tactique Opportuniste	Inattention, Défaut de mémoire Prudent (très), Novice
Interversion	Brouillé	Stress
Omission	Opportuniste Brouillé	Tâche Focus, Défaut de mémoire Connaissance insuffisante
Retard	Tous les modes	Evénements externes, Environnement bruyant Travail collaboratif Fatigue, Manque d'attention Echec de la communication
Action prématurée	Brouillé Opportuniste	Stress, Pressé, Force
Remplacement	Brouillé Opportuniste	Connaissance insuffisante Imprudent, Inattention
Insertion	Tous les modes	Evénements externes
Inclusion	Opportuniste Brouillé	Pressé Stress

Tableau 8: Erreurs CREAM, mode de contrôle et caractéristiques personnelles

3.2.3.4 Interprétation du modèle d'activité avec COCOM dans MASVERP

A partir des caractéristiques personnelles, et plus particulièrement à partir du mode de contrôle, les algorithmes de décision vont permettre de déterminer les actions à exécuter. Pour ce faire, le module décisionnel va raisonner sur le modèle de tâches, sur les différentes propriétés de la tâche et sur les constructeurs d'ordre des tâches (Tableau 9) . Par exemple :

- *Conditions nomologiques* : si elles sont vraies, la tâche peut être exécutée, sinon l'algorithme cherche à les rendre vraies si cela est nécessaire (e.g. si la tâche doit être réalisée, alors il est nécessaire de les rendre vraies) ;
- *Conditions règlementaires* : si l'agent est en mode tactique ou opportuniste, expert et imprudent alors il ne va pas prendre en compte les conditions règlementaires. Elles ne sont pas bloquantes. Dans le cas d'une tâche alternative si aucune tâche n'est possible, le module décisionnel peut alors essayer de les rendre vraies ;
- *Conditions favorables* : dans le cas de tâches alternatives, parmi les tâches dont les conditions nomologiques sont activables (vraies), les conditions favorables permettent de sélectionner les tâches les plus adaptées/préférées selon le contexte ;
- *Le marqueur* (tag) de précondition « *expert* » indique que cette condition est examinée seulement s'il est expert ;
- *Activité limite tolérée par l'usage* (ALU) : selon le mode de contrôle, le personnage virtuel expert fait ou non cette tâche ;
- *Ressources* : si le personnage virtuel possède la(les) ressource(s) (dans sa main ou dans la boîte à outils) alors la tâche est activable. Sinon, selon le mode de contrôle, il ira la(les) chercher, demandera à un autre personnage virtuel d'y aller ou raisonnera par analogie (i.e. prendre une ressource qui peut être une « *sorte de* », e.g. un couteau suisse à la place d'un tournevis) ;
- *Focus* : en mode opportuniste, le personnage virtuel ne fait que les tâches identifiées comme étant focus (i.e. tâche principale, voir exemple de la carte de crédit Annexe VI.1).

	Mode Stratégique	Mode Tactique	Mode Opportuniste	Mode Brouillé
Conditions nomologiques	Cherche à les rendre vraies			Fait ce qu'il sait faire, ne raisonne plus sur les conditions, raisonne par affordances
Conditions réglementaires	Respecte les conditions réglementaires	Ne respecte pas les conditions règlementaires si cela prend du temps		
Conditions favorables	Alternative : choisit la tâche dont le contexte est le plus favorable			
Conditions liées à la sécurité	Pas de compromis	Fais des compromis proportionnellement à la valeur du mode de contrôle		
Marqueur Expert	Conditions marquées « expertes » : seul l'expert sait les interpréter			
Ressources			Raisonne par analogie	
Marqueur Focus			Ne fait que les tâches focus	

Tableau 9 : Interprétation des conditions et attributs selon le mode de contrôle

3.3 Comportements cognitifs, émotionnels et sociaux

3.3.1 Objectifs et motivations

Notre objectif vise à modéliser des comportements individuels cognitifs évolués afin d'obtenir des comportements collectifs émergents cohérents, adaptables et explicables.

Depuis le 11 septembre 2001, l'hypothèse de devoir affronter et gérer des crises de plus en plus sévères est devenue une menace réelle et permanente. Une difficulté majeure concerne les risques Nucléaires, Radiologiques, Bactériologiques et Chimique (NRBC) : les exercices réalisés en grandeur nature manquent de crédibilité. De ce fait, l'entraînement des acteurs de la sécurité publique (sapeurs-pompiers, SAMU, police, gendarmerie) est un défi majeur. La piste explorée au sein du projet SAGECE (Simulation pour l'Amélioration de la GEstion de CrisE) est de simuler une crise de type NRBC au sein d'un environnement de réalité virtuelle. Notre objectif dans ce projet et plus largement, avec la thèse de Margaux Lhommet, co-encadrée avec J.P. Barthès, est ***la modélisation informatique de l'émergence de comportements de foule à partir des comportements des individus qui la composent.***

Dans le cadre de ce projet, j'ai encadré deux postdoctorants : Julien Saunier (1 an) et Hazaël Jones (2 ans). Nous avons aussi encadré un stagiaire J. Thiery et de nombreux étudiants (V. Lanquepin, V. Palancher, R. Lacaze-Labadie, P. Georges, G. Ricaud, D. Lin, M. Sene, etc.).

3.3.2 Positionnement général

Dans le cadre d'applications pour la formation à la gestion de crise, « *l'apprenant est confronté à la présence d'un grand nombre d'individus susceptibles de céder à la panique et dont il doit s'occuper pour éviter qu'un simple événement ne se transforme en crise aux conséquences désastreuses. Les secours doivent aussi bien canaliser la foule dans son ensemble que gérer des individus de manière isolée (secourir des blessés, procéder à des arrestations). Il est donc nécessaire d'offrir à l'utilisateur la possibilité d'interagir finement avec les individus. Ceux-ci doivent réagir de manière cohérente et les résultats de cette interaction doivent avoir des incidences sur le comportement général de la foule* » [Lhommet, Lourdeaux et Barthès, 2011].

Les apprenants font partie de la chaîne de commandement des secours. Les victimes sont jouées par des personnages virtuels autonomes. En contexte de crise, ces victimes n'agissent pas nécessairement de la meilleure manière possible même si un certain nombre d'études montrent qu'ils n'agissent pas de manière complètement erratique et non-contrôlée comme on pourrait l'imaginer. Une difficulté est alors d'obtenir des comportements cohérents. [Lhommet, 2012] définit la cohérence d'un personage virtuel autonome comme l'adéquation entre sa situation, son état mental (buts, émotions, personnalité, relations sociales) et son comportement. Cette difficulté est d'autant plus grande que les comportements de groupes ne sont pas une simple agrégation de comportements unitaires, mais au contraire des comportements qui émergent des interactions sociales entre agents et de leurs caractéristiques individuelles. Le **verrou** majeur est le problème du passage à l'échelle.

La majorité des simulations informatiques utilise des personnages virtuels dont les comportements sont scriptés, c'est-à-dire que la réponse comportementale est spécifiée pour chaque situation qu'il est possible de rencontrer. Les comportements obtenus sont donc cohérents et explicables car écrits en parfaite adéquation avec les besoins de la simulation. Ils ne sont cependant pas du tout adaptables.

Les **architectures cognitives** permettent de générer des **comportements cohérents** en séparant la connaissance du raisonnement [Newell, 1990], [Laird, 2012]. Par exemple, EMA [Gratch, 2004] **modélise explicitement les émotions et les processus mis en oeuvre pour leur élicitation (*appraisal*) et leur influence sur le comportement (*coping*)**. Cependant, les autres dimensions humaines (comme la personnalité et les relations sociales) sont agrégées et intégrées directement dans le comportement et donc non explicites. Les personnages virtuels générés présentant un comportement cohérent et adaptable, mais, dans une certaine mesure, non explicable.

Le paradigme de la théorie de l'esprit stipule que le caractère social de l'humain réside dans sa capacité à déchiffrer l'état mental des individus qui l'entourent. Dans la thèse de Margaux Lhommet, nous avons restreint le cadre d'étude des interactions entre personnages virtuels à la modélisation des interactions émotionnelles, à savoir l'empathie. Les théories en psychologie sociale définissent deux types d'empathie [Lhommet, 2012].

Tout d'abord, l'**empathie cognitive** est un processus cognitif conscient qui consiste à se projeter mentalement à la place d'autrui pour deviner son état émotionnel. Ce processus nécessite que le personnage virtuel dispose d'une théorie de l'esprit, c'est-à-dire qu'il puisse inférer, à chaque instant, l'état mental des individus qui l'entourent (humains virtuels ou avatars qui représentent l'apprenant). Il doit donc disposer et maintenir en temps réel un modèle de chacun d'entre eux, sur lequel il applique ses propres processus cognitifs afin d'inférer son état mental, en particulier son état émotionnel. Ce processus est très couteux lorsque le nombre d'humains virtuels augmente ce qui pose un problème informatique de **passage à l'échelle**[7].

Le second type, l'**empathie affective**, représente les changements induits chez un individu par la perception de l'état mental d'autrui. Il s'agit d'un processus inconscient et automatique, sur lequel l'esprit n'a aucune prise, et on parle souvent de « contagion émotionnelle ». **Les modèles d'empathie affective existants ne prennent généralement pas en compte les caractéristiques individuelles des humains virtuels**. Le modèle ASCRIBE [Bosse 09] est la seule exception à cette règle et détermine deux composantes individuelles, le pouvoir de contagion qui représente la force avec laquelle un individu observé « émet » son état émotionnel et la susceptibilité à la contagion qui détermine la sensibilité d'un individu à être influencé par les émotions d'autres humains virtuels. Dans ce modèle, ces deux caractéristiques sont déterminées de manière *ad hoc* ce qui nuit à la cohérence et à l'explicabilité du modèle de contagion.

Dans nos travaux, nous souhaitons donc proposer un modèle de personnages virtuels émotionnels et sociaux dont le comportement est cohérent, adaptable et explicable. Pour lever le verrou du passage à l'échelle, nous nous sommes intéressés à trois pistes : 1) au calcul flou pour l'intégration des aspects cognitifs, 2) au phénomène d'effets placebo/nocebo dans la contagion émotionnelle et 3) au phénomène d'empathie affective s'appuyant sur des dimensions humaines. Ces travaux ont été menés parallèlement et ont abouti d'une part, à l'architecture Fuzzy PEP-BDI (Personnality, Emotion and Physiolgy-driven BDI) pour l'intégration des deux premières pistes et d'autre part, à l'architecture REPLICANTS pour la troisième piste. La l'architecture Fuzzy PEP-BDI visait une approche système multi-agent réactif et non cognitif pour optimiser les temps de calcul dans la modélisation de foule. L'architecture REPLICANTS visait une approche cognitive plus conforme à nos travaux sur la modélisation décisionnelle. A termes, nous devrions coupler les modèles de calcul flou dans l'architecture REPLICANTS qui a été retenu dans la suite de nos travaux.

Pour voir l'impact des interactions entre l'apprenant et les individus ou sur la foule dans son ensemble, nous proposons de modéliser chaque humain de manière individuelle au sein de la foule. *« Notre approche est donc celle des systèmes multi-agents où chaque humain est représenté par un agent informatique capable de prendre des décisions de manière autonome. Les agents sont dotés de personnalités variables pour*

[7] De plus, nous ne pensons pas qu'un individu imagine consciemment l'état émotionnel de chaque personne lorsqu'il est entouré par un grand nombre d'individus, mais qu'il a conscience de cet état de manière naturelle [Lhommet, 2012]

simuler des foules hétérogènes. En situation de crise, l'évolution de la situation est étroitement liée au climat émotionnel de la foule » [Lhommet, Lourdeaux et Barthès, 2011a]. Nous représentons donc chaque individu de la foule par un agent autonome cognitif, émotionnel et social. Afin d'avoir un comportement cohérent, l'agent peut avoir des connaissances erronées sur l'état du monde. Il peut ainsi avoir des intentions d'actions décorrélées de l'état réel de la situation et, par son influence sur les autres agents, les conduire à effectuer des actions inappropriées pouvant mener à des situations critiques. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser, dans un premier temps, le modèle BDI. En fonction de l'état du monde perçu (ses croyances), l'agent est capable de générer des plans (intentions) pour parvenir à atteindre ou se rapprocher de ses désirs. Le modèle BDI ne prend pas en compte les émotions. [Jiang *et al.*, 2007] ont proposé le modèle eBDI qui introduit la notion d'émotions primaires et secondaires au sein d'une architecture BDI. Cependant, cette approche ne prend pas en compte la personnalité des agents.

En ce qui concerne la modélisation des émotions, les travaux de [Gratch et Marsella, 2004] proposent le modèle actuel le plus mature en ce qui concerne la représentation des émotions d'un agent. Cependant, il s'applique à la modélisation individuelle d'émotions fines et permet de modéliser un faible nombre d'agents. Dans notre cas, nous cherchons à rendre compte d'émotions à la fois individuelles et collectives. Ces objectifs se rapprochent de ceux de [Silverman et al., 2006], qui proposent une architecture intégrée prenant en compte les émotions, les critères physiques et la personnalité d'un agent de façon à tester et valider les différents modules indépendamment.

L'architecture agent DETT (Disposition, Emotion, Trigger, Tendency) [Parunak *et al.*, 2006] envisage de façon directe le lien entre personnalité et émotions. Elle s'appuie sur les propriétés du modèle OCC. DETT définit la notion de tendance, laquelle se rapporte à la propension du personnage à ressentir et faire évoluer ses émotions au cours du temps. Cependant, deux limites nous amènent à étendre cette approche : DETT n'est pas explicatif (lien direct valeur émotion/action), et ne modélise que deux émotions (peur et courage) en relations avec deux traits de personnalité (couardise et irritabilité).

3.3.3 L'approche FUZZY PEP-BDI

Pour pouvoir prendre en compte les aspects personnalité et physiologie dans le modèle BDI, avec Hazaël Jones et Julien Saunier, nous avons proposé l'architecture Fuzzy PEP—BDI (Personality, Emotion and Physiology-driven BDI) comme une extension du framework eBDI [Jiang *et al.*, 2007].

3.3.3.1 L'architecture globale Fuzzy PEP-BDI

Notre approche diffère des modèles BDI classiques par la prise en compte des émotions, de la personnalité et des caractéristiques physiologiques. La Figure 31 montre l'architecture de notre modèle. L'agent perçoit son environnement. Il va alors générer des croyances candidates en se basant sur ses perceptions et ses croyances antérieures. En fonction de ces croyances, de son état physiologique et de sa personnalité, l'agent va mettre à jour ses émotions et réviser ses connaissances en fonction de ces nouveaux paramètres. Ensuite, on suit le cheminement usuel du modèle BDI : l'agent génère des désirs à partir de ses croyances, puis il sélectionne des intentions. Lorsque l'agent a mis à jour ses intentions, nous vérifions si ses émotions ont évolué. Si c'est le cas, le processus de décision est à nouveau exécuté. Enfin, l'agent sélectionne un plan d'action.

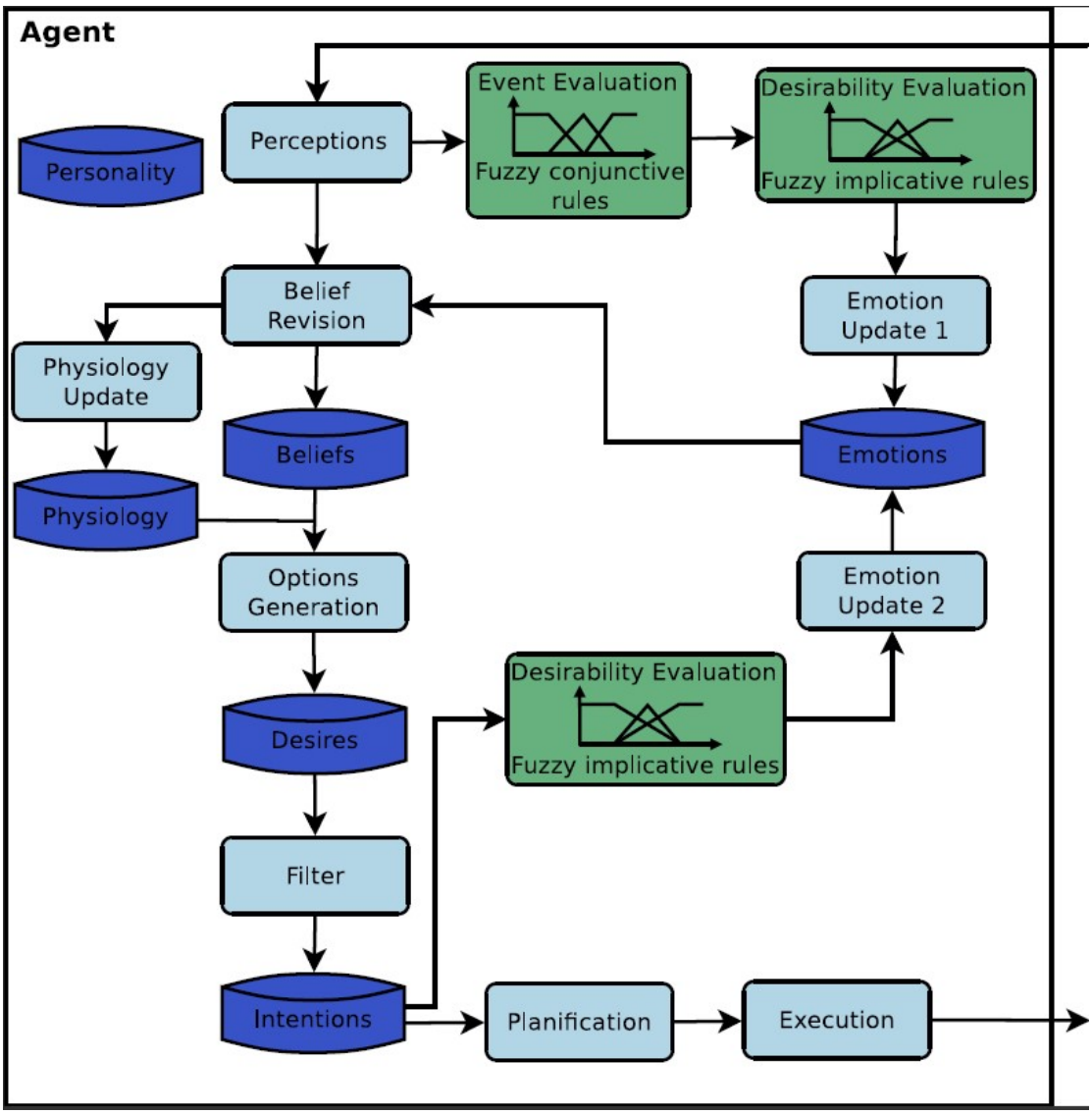


Figure 31 : Architecture Fuzzy PEP-BDI

Nous décrivons dans l'algorithme 1 les différentes étapes du cycle perception-action en pseudo-code. Les étapes 1 à 5 correspondent à l'initialisation de l'agent. La phase 6 correspond à la boucle du cycle de vie. Ensuite, l'agent récupère les croyances candidates, messages et percepts (phase 7). Ces croyances candidates vont générer des émotions immédiates (10), et en fonction de son nouvel état émotionnel, l'agent va modifier ses croyances (11). Pour cela, il peut éliminer des percepts, par exemple s'il est obnubilé par un facteur de stress, où modifier l'importance d'un percept, s'il est empathique. Il est à noter que nous considérons les données physiques comme croyances (12) de façon à pouvoir modéliser les effets nocebo et placebo. La mise à jour des paramètres physiologiques correspond donc à une révision des croyances. Le choix des désirs et intentions (13-14) correspond aux fonctions BDI classiques, hormis la prise en compte de l'émotion et de la personnalité. Une fois ses intentions choisies, l'agent met à nouveau à jour ses émotions (16-17). Cette seconde mise à jour est nécessaire car les émotions de l'agent peuvent changer en fonction des décisions qu'il a prises, par exemple si un objectif entre en contradiction avec ses émotions. De plus, cette fonction n'est pas identique à la première car nous distinguons les émotions primaires, qui s'expriment en réaction à un stimulus, des émotions secondaires, qui sont des conséquences à la fois des émotions primaires et des croyances de l'agent. Si ses émotions ont changé (18), il réévalue alors ses croyances, désirs et intentions en fonction de ses nouvelles émotions (19-22). Enfin, il planifie ses actions (23) et exécute son plan (24). Les désirs et intentions sont des tâches mères du modèle d'activité (décrit avec HAWAI-DL), tandis que les plans sont les chemins d'actions choisis pour les réaliser [Jones, Saunier et Lourdeaux, 2009a].

Algorithm 1 : Fuzzy PEP → BDI main loop

Inputs:
E_0 initial emotions
B_0 initial beliefs
I_0 initial intentions
Ph_0 initial physiology
Pe_0 initial personality
$Pe = PeE \cup PeP \cup PeD$ personality, PeE emotional tendencies, PeP percept tendencies and PeD action tendencies
Ph its physiological state
Ev the events that are able to occur
Fa the facts that are perceived

1-$E \leftarrow E_0$
2-$B \leftarrow B_0$
3-$I \leftarrow I_0$
4-$Ph \leftarrow Ph_0$
5-$Pe \leftarrow Pe_0$
6-**While** *true* **do**:
7- $B_p \cup B_c \cup B_b \leftarrow Sense(Env, PeP) \cup Msg(Env, PeP) \cup Body(Env, PeP)$
8- $Ev \leftarrow event_perception(B_p \cup B_c \cup B_b)$
9- $Des \leftarrow desirability_evaluation(Ev, I)$
10- $E \leftarrow primary_emotion_update(Ev, E, I, Des, PeE)$
11- $B \leftarrow belief_revision(E, Pe, I, B_p, B_c, B_b, B, Ev)$
12- $Ph \leftarrow physical_state_revision(B_b, Ph, E, I)$
13- $D \leftarrow options(B, I, Pe, Ph)$
14- $I \leftarrow filter(E, B, D, I, Ph)$
15- $E' \leftarrow E$
16- $Des \leftarrow desirability_evaluation(Ev, I)$
17- $E \leftarrow secondary_emotion_update(B, Ev, E, I, Des, PeE)$
18- **If** $E' \neq E$ **then**
19- $B \leftarrow belief_revision(E, Pe, I, B_p, B_c, B_b, B, Ev)$
20- $Ph \leftarrow physical_state_revision(B_b, Ph, E, I)$
21- $D \leftarrow options(B, I, Pe, Ph)$
22- $I \leftarrow filter(E, B, D, I, Ph)$
23- $\pi \leftarrow plan(I, actions)$
24- $execute(\pi)$

Une description plus fine des modules et fonctions *perception, émotion, croyances, physiologie, désirs, intention* et *plan* est donnée dans [Saunier, Jones et Lourdeaux, 2009], [Jones, Saunier et Lourdeaux, 2009b]

3.3.3.2 Calcul flou pour les perceptions, émotions et désirabilité

En se basant sur le fait que les êtres humains ont souvent besoin de manipuler des concepts imprécis, Lotfi A. Zadeh a développé la théorie des ensembles flous qui généralise la théorie des ensembles classiques afin de représenter la notion d'appartenance partielle [Zadeh, 1965]. Nous avons donc proposé d'utiliser « *des ensembles flous pour représenter la désirabilité des agents pour un événement particulier. Les règles floues représentent la relation entre événements et désirabilité. L'utilisation de la logique floue permet de travailler avec des descriptions quantitatives et qualitatives dans un langage expressif. Nous avons fondé notre approche sur le modèle FLAME en utilisant la logique floue afin de représenter des émotions [15]. Cependant, dans FLAME, le calcul de la désirabilité utilise seulement l'impact d'un événement sur un but et l'importance de ce but pour l'agent, qui est appliqué au comportement d'un animal de compagnie* » » [Jones, Saunier et Lourdeaux, 2011]. Dans notre modèle, nous souhaitons rendre compte d'un comportement humain en situation de crise. La perception humaine dans ce type de situation est limitée et incertaine. Pour cette raison, nous avons proposé d'utiliser des règles floues pour déterminer si un événement est perçu ou non. Lorsque l'occurrence d'un événement est validée par la perception d'un agent, nous utilisons un mécanisme similaire au mécanisme employé dans FLAME pour calculer la désirabilité de cet événement. Dans les règles floues, selon la typologie proposée par [Dubois et Prade, 1992], il existe 2 types principaux de règles : les règles conjonctives [Mandani et Assilian, 1975] et les règles implicatives [Dubois et Prade, 1992]. Dans notre représentation, Hazaël Jones a décidé d'utiliser ces deux types de règles floues selon le type de connaissances traitées : des règles conjonctives pour l'évaluation de l'occurrence des événements et des règles implicatives pour le calcul de la désirabilité. Cette partie est détaillée dans [Jones, Saunier et Lourdeaux, 2011]. En effet, les règles conjonctives représentent des données d'entrées/sortie conjointement possibles. Elles sont donc adaptées pour représenter des faits, des événements. Les règles implicatives correspondent à des modèles, et sont donc plus adaptées pour modéliser le modèle cognitif de l'agent et pour calculer sa désirabilité vis à vis des événements.

Le calcul des émotions en fonction de la désirabilité s'appuie sur le modèle OCC. Dans ce modèle, les émotions sont calculées selon la désirabilité ou la non-désirabilité des événements et selon leur occurrence (Tableau 10 - a). Les événements désirables provoquent des émotions positives (joie, espoir, satisfaction) et les événements indésirables provoquent des émotions négatives (angoisse, peur, etc.). La vraisemblance est calculée en fonction de la probabilité d'apparition de chaque événement (Tableau 10 - b) et diffère selon la personnalité de l'agent (décrit au chapitre III.2.3.2).

Emotion	Rule
Joy	Occurrence of a desirable event
Distress	Occurrence of an undesirable event
Hope	Waiting for a desirable event
Fear	Waiting for an undesirable event
Satisfaction	In hope state: desirable event occurs
Fear-confirmation	In fear state: undesirable event occurs
Disappointment	In hope state: desirable event does not occur
Relief	In fear state: undesirable event does not occur

(a)

Emotion	Formula for calculation
Joy	If $Des(e) > 0$ then $E_{joy} = Des(e)$
Distress	If $Des(e) < 0$ then $E_{distress} = \|Des(e)\|$
Hope	If $Des(e) > 0$ then $E_{hope} = Des(e) * likelihood(e)$
Fear	If $Des(e) < 0$ then $E_{fear} = \|Des(e) * likelihood(e)\|$
Satisfaction	If E_{hope} & $occurs(e)$ then $E_{satisfaction} = E_{hope}$
Fear-confirmation	If E_{fear} & $occurs(e)$ then $E_{fear-confirmation} = E_{fear}$
Disappointment	If E_{hope} & $not_occurs(e)$ then $E_{disappointment} = E_{hope}$
Relief	If E_{fear} & $not_occurs(e)$ then $E_{relief} = E_{fear}$

(b)

Tableau 10: Emotions selon le modèle OCC

Prenons l'exemple du calcul de l'émotion « angoisse » selon un événement non désirable « *personnes proches contaminées* » (« *ppc* »). Pour commencer, la perception par l'agent de l'occurrence de l'événement « *ppc* » est calculée puis sa désirabilité et enfin l'émotion « angoisse ». « *Le paramètre le plus important pour l'évaluation de l'événement « personnes proches contaminées » est la distance minimale à un agent contaminé. Puis vient le nombre de personnes contaminées à proximité de l'agent et l'importance de leur contamination. En effet, la réaction de l'agent est plus négative si les personnes proches ont des symptômes importants (toux, vomissements, etc.). La distance est modélisée par 3 ensembles flous (small, medium and important), le nombre de personnes proches de l'agent par 2 ensembles flous (Little, Big) et l'importance de la contamination par 2 ensembles flous (weak, strong)* » (Tableau 11) [Jones, Saunier et Lourdeaux, 2011].

	When Distance	and Number of contaminated people	and Symptoms importance	Then Occurrence of event "pnc" is observed
1	small			sure
2	medium	little		almost sure
3	medium	big	weak	sure
4	medium	big	strong	almost sure
5	important	little		not sure
6	important	big	weak	not sure
7	important	big	strong	almost sure

Tableau 11: Règle floue pour le calcul de l'occurrence « personnes proches contaminées »

Ensuite, des règles floues (Figure 32) permettent de calculer la désirabilité de l'événement « ppc » pour chaque but associé à cet événement : rester en vie, éviter la contamination et rester dans la file d'attente.

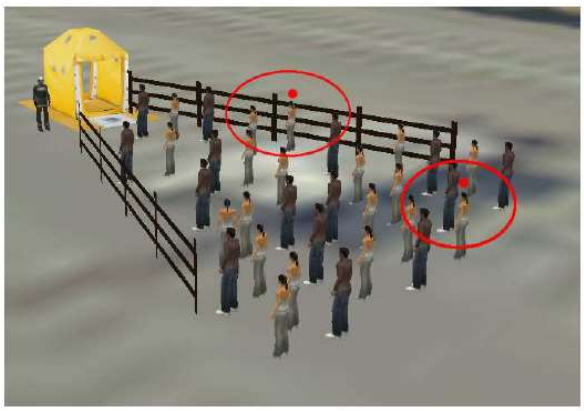
If $EventOccurence(pnc)$ is $Sure(1)$,
and $Impact(StayAlive, pnc)$ is $NoImpact(0.3)$,
and $Importance(StayAlive)$ is $Important(1)$
then $Desirability(pnc)$ is $Neutral$

If $EventOccurence(pnc)$ is $Sure(1)$,
and $Impact(AvoidConta, pnc)$ is $Negative(1)$,
and $Importance(AvoidConta)$ is $Important(1)$
then $Desirability(pnc)$ is $Negative$

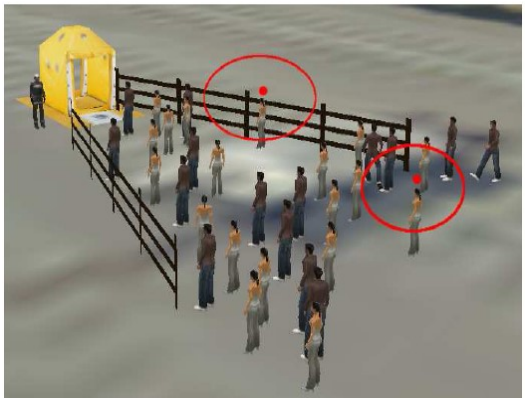
If $EventOccurence(pnc)$ is $Sure(1)$,
and $Impact(WaitQueue, pnc)$ is $Negative(1)$,
and $Importance(WaitQueue)$ is $Slightly_Important(1)$
then $Desirability(pnc)$ is $Negative$

Figure 32: Exemples de règles pour le calcul de la désirabilité de l'événement « personnes proches contaminées »

Ensuite, l'émotion « *angoisse* » est calculée selon le Tableau 10 – b et selon leur personnalité. Sur la Figure 33 – a, on peut voir des ensembles de personnes « *angoissées* » (cercles rouges) près des personnes directement contaminées (rond rouge). Enfin, une action est sélectionnée, par exemple, ici, les personnes « *angoissée* » s'éloignent des personnes contaminées (Figure 33 – b).



(a)



(b)

Figure 33: Calcul des émotions et sélection d'action

3.3.3.3 Effets nocebo/placebo dans l'empathie affective

Pour lever le verrou du passage à l'échelle, avec Hazaël Jones et Julien Saunier, nous nous sommes intéressés à des mécanismes de calcul centralisés : aux phénomènes d'empathie affective (contagion émotionnelle) et d'effets placebo. Comme nous l'avons dit les phénomènes d'empathie affective ne sont pas conscients. Les agents s'influencent mutuellement à travers une interaction du niveau affectif. Dans un contexte où les humains virtuels peuvent être contaminés par des substances chimiques et radiologiques, l'empathie peut mener à des effets placebo ou nocebo [Benson, 1997] : un agent peut croire qu'il est contaminé et/ou exprimer des symptômes physiques alors qu'il est sain.

Des études du domaine de la psychologie telles que [Crocq, 2002] mettent en lumière les dimensions individuelles et collectives des crises. Au niveau individuel, les désastres engendrent de hauts niveaux de stress. Ce stress peut être dit adapté ou dépassé. Le stress adapté mobilise les capacités mentales et énergétiques pour la résolution de la crise que vit l'individu. En revanche, le stress dépassé épuise les réserves d'énergie dans une des modalités suivantes : stupeur/inhibition, agitation incontrôlée, fuite panique, et comportements automatiques. Symétriquement, au niveau collectif, les comportements peuvent être adaptés ou non. Dans le cas inadapté, par exemple la panique et/ou la violence peuvent surgir lorsque les équipes de secours sont désorganisées et que les victimes pensent qu'elles sont mal informées ou mal prises en charge. La conscience mutuelle (*mutual awareness*) [Dugdale *et al.*, 2000] et l'empathie sont nécessaires pour qu'un comportement collectif distinct apparaisse [Le Bon, 1895]. L'empathie affective est le mécanisme de bas niveau qui permet aux agents de mutuellement percevoir leurs états émotionnels et physiques. A un niveau plus haut que l'affect, la conscience mutuelle implique une représentation symbolique des activités de l'autre et donc l'empathie cognitive.

Dans la communauté multi-agent, l'environnement a récemment été mis en avant en tant qu'abstraction de premier ordre qui peut encapsuler une partie des responsabilités du système [Weyns et al., 2007]. Traditionnellement, le cycle de vie de l'agent peut être géré par l'environnement. Il est également possible d'y adjoindre des mécanismes visant à faciliter l'interaction, par exemple [Saunier et Balbo, 2009] et [Julien et Roman, 2004]. Avec Julien Saunier, nous avons considéré la possibilité pour l'environnement de prendre en charge la tâche de propager une partie de l'état des agents. Suivant ce principe, l'agent est divisé en deux parties : son esprit et son corps [Platon, Sabouret et al., 2007]. L'esprit contient le processus de décision. Il s'agit de la partie autonome de l'agent. Le corps est quant à lui influencé par l'esprit, mais contrôlé par l'environnement. Autrement dit, il est toujours possible de décider de l'éviter, cela ne signifie pas que cette action réussira. En pratique, l'état de l'agent est public et ses modifications sont régulées par l'environnement. Ce principe rejoint l'approche énactive de la cognition inspirée des travaux de F. Varela [Varela, 1996].

Ce modèle est intéressant en termes de représentation (corps réactif, incertitude de l'agent quant à son état de contamination réel, etc.). En termes de coûts de calcul, l'encapsulation de services dans l'environnement n'augmente pas la charge globale, voire permet la mutualisation des calculs.

Empathie affective

La modélisation du phénomène d'empathie affective permet aux agents d'être impactés involontairement par l'état des autres agents. La proximité, qu'elle soit physique ou psychologique, est une condition nécessaire à la mise en place de l'empathie [Saunier, Jones et Lourdeaux, 2009].

La séparation fonctionnelle du corps et de l'esprit implique que l'agent peut avoir connaissance de son état physique et émotionnel et qu'il peut l'influencer. Ses émotions sont mises à jour selon trois mécanismes :

- Processus de décision : il s'agit de l'impact émotionnel de connaissances symboliques ;
- Dynamique interne : les émotions et la physiologie évoluent en fonction du temps ;
- Dynamique externe : les émotions et la physiologie varient selon des stimuli et des événements.

La dynamique interne correspond au calcul des émotions décrit par le modèle OCC (Tableau 10 – b) à laquelle, J. Saunier ajoute la tendance à ressentir cette émotion (*emotion_tendency*). Ces tendances font partie de sa personnalité. Notons que la même formule gère la dynamique interne du stress, qui est un critère physiologique :

$$emotion = emotion \times emotion_tendency$$

Concernant le mécanisme de contagion émotionnelle en particulier, l'environnement met à jour régulièrement l'état de l'agent. Le gestionnaire de contagion émotionnelle est un module de l'environnement du SMA (Figure 34). Il récupère (1) l'état courant de l'agent, ici a_1. Il met à jour (2) en fonction l'état du monde. L'état du monde contient les propriétés du corps de chaque agent. Ensuite, le gestionnaire de contagion émotionnelle calcule les effets du phénomène d'empathie affective sur les voisins de l'agent en fonction de leur état précédent et de leur tendance à l'empathie. Finalement, l'environnement propage l'information (3) dans le corps des agents concernés, a_2 dans notre exemple [Saunier, Jones et Lourdeaux, 2009]. La formule utilisée est :

$$\sum \frac{1}{dist(orig, cible)} stress(orig) * t_e(cible)$$

avec dist(orig; cible) la distance entre l'origine et la cible, et t_e la tendance à l'empathie de la cible. Nous calculons de la même façon la propagation des deux émotions, la peur et la colère.

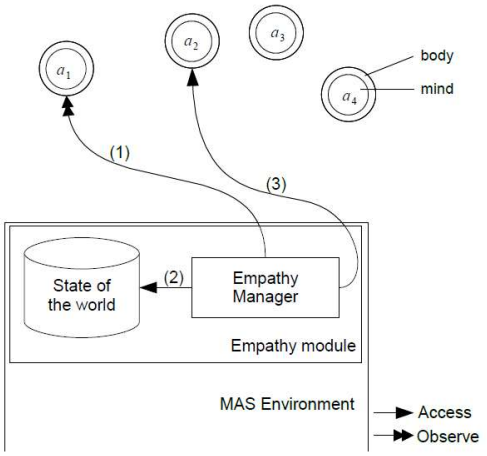


Figure 34 : Module empathie de l'environnement et interactions avec les agents

Effets placebo/nocebo

Dans notre scénario de crise, une partie des civils inhale et/ou touche des substances chimiques et radiologiques. Ces civils développent rapidement des symptômes, lesquels vont des démangeaisons à la suffocation. Un problème majeur pour les secours est d'isoler les victimes contaminées. Une partie de la population mime les réactions aux toxiques sans avoir été exposée [Lacy et Benedek, 2003]. Nous avons proposé de modéliser les quatre catégories de facteurs qui entrent en jeu dans l'effet nocebo : la personnalité, la physiologie, les émotions et les croyances [Saunier, Jones et Lourdeaux, 2009].

La personnalité. Des études montrent que lors d'expériences cliniques, 30 à 40 % des patients sont placebo-répondants, mais que ce taux ne peut pas être corrélé de façon directe à un trait de

personnalité particulier [Harrington, 1997] qui indiquerait *a priori* si le patient est susceptible de l'être. Deux principaux facteurs de personnalités ont, toutefois, été identifiés comme influençant indirectement l'effet placebo/nocebo : 1) l'optimisme : un patient croyant en une issue positive tend à être moins susceptible de subir un effet nocebo ; 2) l'empathie : un patient ayant tendance à assimiler les émotions des autres tend à pouvoir également partager des symptômes perceptibles.

La physiologie. Même si l'optimisme et la tendance à l'empathie jouent un rôle dans la réponse aux effets nocebo, de plus grande importance sont les facteurs immédiats liés à la situation. Le premier de ces facteurs est le stress. [Silverman *et al.*, 2006] a choisi de corrêler le stress à la pression temporelle à laquelle l'agent est soumis, à sa fatigue effective, et à des événements qui l'affectent positivement ou négativement. En général, le stress suit la même courbe que les émotions.

Les croyances. Les nouvelles informations sont obtenues par la perception (vue, ouïe, odorat, etc.), par la communication (messages) ou en sondant son corps semi-contrôlé (blessure, fatigue). Les émotions sont une réaction directe à un percept. Par exemple, un agent percevant plusieurs agents suffocant à proximité ressent de la peur. Dans notre modélisation, les émotions et la personnalité ont un impact sur la façon dont les nouvelles croyances sont interprétées. Cela amène l'agent soit à modifier l'information, par exemple un agent peureux est plus enclin à croire qu'une situation est dangereuse, soit à construire des croyances erronées. Les agents possèdent une représentation du risque. Ceci inclut les croyances de l'agent quant à la contamination des autres, et quant à sa propre contamination. La contamination des autres agents est évaluée par l'agent en fonction de leurs symptômes visibles. Par ailleurs, les émotions influencent la croyance de l'agent en sa propre survie. L'agent commence à montrer des symptômes quand il s'est persuadé (de façon véridique ou erronée) de sa propre contamination.

Le calcul. Ces facteurs augmentent ou diminuent la probabilité de l'agent d'être placebo-répondant, mais il n'y a pas de règle prédictive. Le calcul est réalisé lorsqu'un événement susceptible de causer l'effet placebo survient. Ces événements sont :

- Information ou rumeur à propos de la présence d'une substance contaminante,
- Ajout d'une nouvelle croyance indiquant qu'un agent est contaminé,
- Prédiction de chance de survie passant en dessous d'un seuil minimal.

Le stress et les émotions ont pour domaine de définition [0; 100], les tendances aux émotions appartiennent à [1 - t; 1 + t]. Le calcul est le suivant :

$$seuil(contam(itself)) = \left(\sum \frac{1}{dist(itself,agent)} contam(agent) + stress \times pessimism\right) \times t_e \times p$$

avec p la probabilité d'être sujet au nocebo. Il s'agit d'un paramètre de la simulation. Lorsqu'un événement déclenche ce calcul, un nombre aléatoire est généré et comparé à ce seuil. Si *seuil(contam(itself))* est dépassé, alors l'agent croit qu'il est contaminé et présente des symptômes semblables à ceux d'agents proches qui semblent contaminés. Ce faisant, il déclenche ce même calcul pour les agents à proximité tout en augmentant la probabilité pour que son résultat soit positif.

3.3.4 L'approche REPLICANTS

Dans le modèle REPLICANTS, les relations entre les personnages virtuels autonomes sont modélisées par des interactions émotionnelles.

Ainsi, afin de pouvoir modéliser des processus décisionnels hautement cognitifs, dans la thèse de Margaux Lhommet, nous nous sommes intéressées à l'architecture Soar et à un modèle d'empathie affective pour la contagion émotionnelle et intentionnelle s'appuyant sur des dimensions humaines fines (personnalité, relations sociales, émotions).

3.3.4.1 Dimensions humaines

Puisque nous voulons modéliser une foule hétérogène, les agents qui la composent doivent montrer des **personnalités** variées. Nous avons choisi d'utiliser le modèle OCEAN [Costa et al., 1996].

Les individus qui composent la foule sont sociaux. Nous avons choisi d'utiliser le modèle de **relations sociales** décrit par [Ochs, 2009] intégrant le modèle dimensionnel des relations interpersonnelles de [Svennevig, 1999] (chapitre III.2.3.4). Une description plus détaillée est donnée dans [Lhommet, 2012]

3.3.4.2 Cycle décisionnel d'un agent REPLICANTS

Dans sa thèse Margaux Lhommet a choisi de fonder son architecture REPLICANTS sur l'architecture cognitive Soar [Laird et al., 1987].

Le cycle personnages virtuels autonomes REPLICANTS est basé sur le cycle classique des agents cognitifs : dans un premier temps, ils perçoivent leur environnement et ce qu'il s'y déroule, ils prennent une décision en fonction de leurs caractéristiques internes et enfin réalisent une action dans l'environnement (chapitre III.2.3.3, Figure 20 à gauche). Afin de doter ces personnages d'émotions, Margaux Lhommet a choisi d'intégrer les différentes étapes définies par les théories de l'évaluation cognitive, en particulier définies dans les travaux de Smith et Lazarus [Lazarus, 1991] (chapitre III.2.3.3, Figure 20 à droite). Margaux Lhommet propose cinq étapes du cycle de vie d'un agent (Figure 35). Ce cycle correspond à un cycle classique perception-décision-action des agents cognitifs auquel se rajoute un module d'évaluation cognitive. L'agent (1) perçoit son environnement et met à jour ses croyances en construisant sa représentation de la situation, (2) évalue ses émotions (appraisal), (3) met à jour ses relations sociales et évalue ses stratégies d'adaptation (coping), (4) prend des décisions et enfin (5) agit.

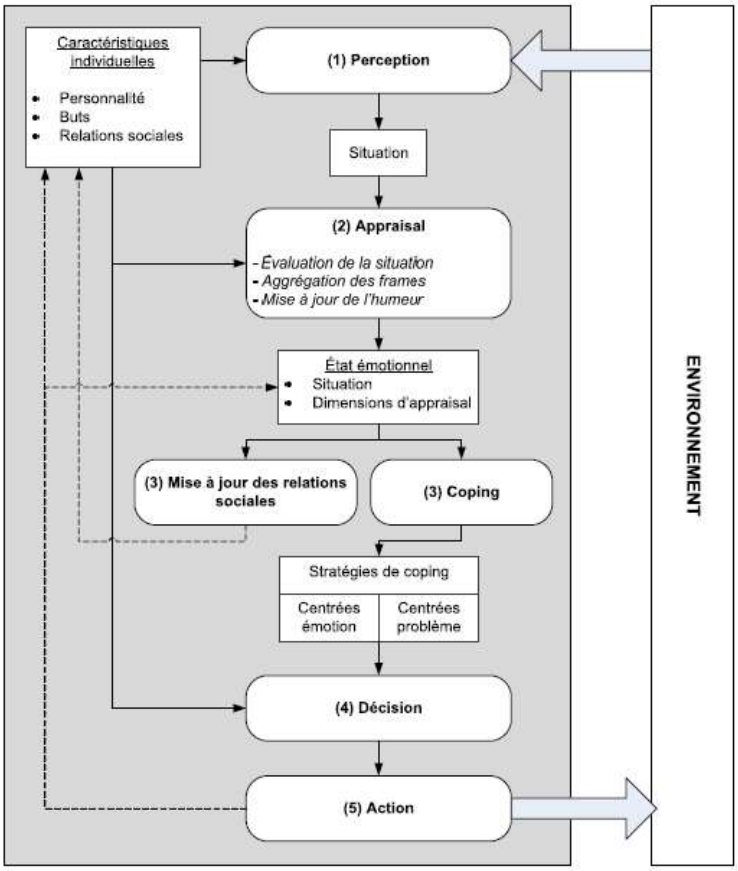


Figure 35: Cycle décisionnel d'un agent REPLICANTS

Perception

Les entités perceptibles sont les éléments de la simulation qui sont visibles. Plus exactement, ce sont les états visibles qui déterminent si les entités et ses états associés sont visibles. On note quatre types d'entités : les objets, les humains virtuels, les évènements et l'humain virtuel lui-même.

L'ensemble des entités perçues par l'humain virtuel est écrit dans la mémoire de travail Soar sous forme de triplets. La mémoire de travail est un graphe sémantique dont le noeud racine est l'état courant [Lhommet, 2012].

Evaluation des émotions (appraisal)

Les évènements et les actions qui surviennent dans l'environnement sont évalués. Pour chaque évènement/action présent sur le noeud *perceptions*, une *appraisal frame contenant les dimensions d'appraisal est définie (*Tableau 12*).*

Dimension	Sous-dimension	Définition
Relevance		degré d'attention à apporter à la situation
Desirability	**Activité**	**impact de la situation sur les buts de l'humain virtuel**
	Personnalité	**impact de la situation par rapport à la personnalité de l'humain virtuel**
Causal attribution	*Agency*	humain virtuel responsable de la situation
	Blame/credit	blâme ou crédit à apporter au responsable
Likelihood		probabilité d'occurrence de la situation (passée ou future)
Unexpectedness		prévision antérieure de l'occurrence de cette situation
Urgency		délai dans lequel traiter la situation
Ego involvement		impact sur l'image de soi (estime sociale, morale,...)
Coping potential	*Controllability*	degré d'influence sur la situation
	Changeability	possibilité que la situation change d'elle-même
	Power	pouvoir d'un humain virtuel de modifier la situation
	Adaptability	capacité à gérer les conséquences d'une situation

Tableau 12 : Dimension d'appraisal dans REPLICANTS

La plupart des dimensions sont tirées de EMA [Gratch, 2004] hormis sur désirabilité. Margaux Lhommet propose, en effet, une évaluation de la dimension ***desirability*** en deux évaluations distinctes, la première liée à l'avancement dans l'arbre d'activité (et donc relative aux buts) et la seconde à la personnalité du personnage virtuel, évaluation qui dans EMA, prenait en compte la valeur d'utilité spécifiée à la main dans le graphe causal. Ces évaluations sont en particulier réalisées sur l'arbre d'activité ACTIVITY-DL. L'évaluation de l'avancement dans l'arbre d'activité permet de favoriser la réalisation des buts et des tâches présentes dans l'arbre d'activité et ainsi de rendre compte de comportements observés sur le terrain retranscrit dans le modèle ACTIVITY-DL. L'évaluation de la désirabilité par rapport à la personnalité d'un individu porte sur la présence des marqueurs personnalisés. Ils peuvent être associés à deux objets : les tâches et les conditions par le biais de l'attribut ***tags***. Les algorithmes sont détaillés dans [Lhommet, 2012].

Pour plus de clarté, Margaux Lhommet associe aux ***appraisal frames*** une catégorie émotionnelle définie par la théorie OCC. La théorie OCC catégorise les émotions tandis que la théorie de Lazarus les place dans un espace continu. Trois dimensions sont utilisées pour déterminer la catégorie associée à une ***appraisal frame*** : la désirabilité (***desirability***) peut être positive (+) ou négative (-) 2 ; la probabilité d'occurrence de l'évènement (***likelihood***) peut être sûre s'il s'est déjà produit (1) ou incertaine (< 1) ; la responsabilité causale des actions peut être l'humain virtuel lui-même (***self***) ou un autre humain virtuel (***other***). Cette correspondance se fait de la manière indiquée par le

Dimension de l'*appraisal frame*			Catégorie émotionnelle OCC
desirability	*likelihood*	*agency*	
+	1		joie
-	1		détresse
+	1	other	admiration
-	1	other	colère
+	1	self	fierté
-	1	self	honte
+	< 1		espoir
-	< 1		peur

Tableau 13 : Correspondance entre les catégories OCC et les dimensions des appraisal frames

Mise à jour des relations sociales

Les théories de l'évaluation cognitive ne prennent pas en compte les relations sociales. Or, pour modéliser des humains virtuels émotionnels et sociaux, il est nécessaire d'étudier l'impact des émotions sur les relations sociales. Cette étape s'appuie sur le modèle de relations sociales proposé par [Ochs, 2009] basé sur OCC adapté ici pour être compatible avec la théorie de Lazarus. Cette évaluation permet de définir définit l'impact des émotions sur la relation d'appréciation entre deux humains virtuels, i et j. Les émotions sont ressenties par i et causées, d'après lui, par j. Cette étape est décrite en détail dans [Lhommet, 2012].

Evaluation des stratégies (coping)

Parmi toutes les stratégies de *coping* proposées par [Lazarus, 1991] et implémentées dans EMA, Margaux Lhommet s'est concentrée sur le *coping* centré problème, c'est-à-dire celui qui vise à agir dans l'environnement.

Afin d'inscrire ses actions dans un cadre rationnel dirigé par des buts, les personnages virtuels sont dotés d'arbre(s) d'activité. À chaque instant, ils tentent d'avancer dans cet arbre en réalisant les actions associées aux tâches feuilles. Dans le cas où l'arbre d'activité est complet et où les conditions de sélection des tâches sont explicites et n'entrent pas en conflit, ce parcours est relativement simple.

Or, comme les arbres d'activité visent à décrire l'activité réelle et sont renseignés par des ergonomes, ils sont rarement complets. Les personnages virtuels doivent donc être capables de raisonner sur leur arbre d'activité et de planifier des actions afin de l'adapter et le compléter.

L'algorithme du coping centré problème dans REPLICANTS est décrit dans [Lhommet, 2012]. Cet algorithme permet d'évaluer les préférences liées aux marqueurs de personnalité et au suivi de l'arbre d'activité.

3.3.4.3 Empathie affective et contagion émotionnelle dans REPLICANTS

Comme nous l'avons expliqué, il existe deux façons de modéliser les interactions émotionnelles pour des personnages virtuels autonomes : l'empathie cognitive et l'empathie affective (contagion émotionnelle). Les premier est un processus conscient et cognitif et le second non-conscient et non-cognitif. Pour modéliser le phénomène d'empathie cognitive, la plupart des agents cognitifs émotifs et sociaux dotés d'une théorie de l'esprit effectuent une planification sociale. Dans ce contexte, l'agent sélectionne l'action qui lui permet d'optimiser son propre état, mais également celui des agents qui l'entourent. Ainsi, il pourra réaliser des compromis et par exemple décider d'effectuer une action qui n'est pas forcément la meilleure pour lui, mais permet de rapprocher ses amis ou d'éloigner ses ennemis de leurs buts. Ceci nécessite, d'une part d'avoir en plus de son propre modèle d'agent, un modèle de chacun des autres agents explicitant leurs buts et caractéristiques individuelles et d'autre part, pour chaque plan et chaque agent, d'imaginer l'impact émotionnel et social de l'action en jeu sur ce dernier. Il s'agit de donc alors de réaliser une évaluation cognitive sur l'agent lui-même et sur chacun des autres agents (partie cognitive représentée dans l'agent Soar dans la Figure 36). La complexité de la planification sociale est donc exponentiellement dépendante du nombre d'agents en présence.
Nous proposons d'ignorer les processus d'empathie cognitive, qui posent des problèmes de performance, et avons mis en place un modèle d'empathie affective qui prend en compte les composantes individuelles de chaque individu afin de gérer les interactions émotionnelles entre les individus de manière plus fine que les phénomènes classiques d'empathie affective [Lhommet, 2012] (contagion émotionnelle en rouge sur la Figure 37).

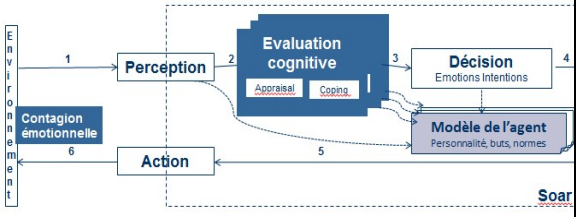


Figure 36:Agent cognitif Soar doté d'empathie cognitive et affective

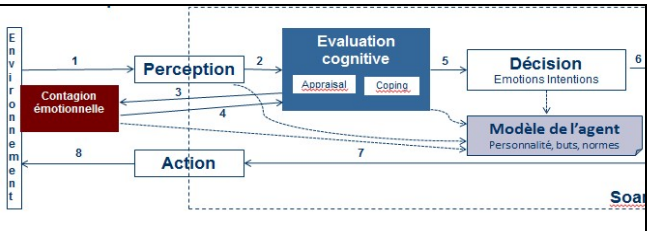


Figure 37 : Agent cognitif Soar doté d'empathie affective influencée par des composantes individuelles (Tableau 14)

Margaux Lhommet propose donc une correspondance entre d'une part, le pouvoir de contagion émotionnelle et la susceptibilité à être influencé, et d'autre part les caractéristiques individuelles telles que la personnalité OCEAN et les relations sociales. Cette proposition s'inspire de modèle ASCRIBE [Bosse, 2009]. Mais, dans le modèle ASCRIBE comme ailleurs, il n'existe pas de théorie formelle reliant les caractéristiques individuelles des agents et la contagion émotionnelle. Or, de nombreuses expériences en psychologie se sont intéressées à ce sujet et ont permis de faire ressortir quels facteurs pourraient influencer la contagion émotionnelle. Selon [Hatfield et al., 1992], la contagion émotionnelle et décisionnelle intervient sur chaque individu, celui-ci étant à la fois contaminant et contaminé. Ils précisent également qu'elle serait modulée par deux facteurs : la capacité d'infection des individus contaminants, et la sensibilité à la contagion des contaminés. Ainsi, deux facteurs modulent la capacité d'infection d'un agent : sa capacité à ressentir des émotions fortes et sa capacité à exprimer des émotions fortes. Au contraire, un agent est susceptible à la contagion : s'il est plus attentif aux autres qu'à lui-même, s'il se considère plutôt comme dépendant des autres qu'individualiste, s'il peut lire les émotions faciales des autres agents et tend à les imiter, s'il est conscient de sa réponse émotionnelle, s'il est émotionnellement réactif. De plus, un agent est plus sensible aux émotions des agents qu'il aime ou qu'il admire et inversement moins sensible à celles des agents qu'il n'aime pas ou ne respecte pas. Ces facteurs, énoncés tels quels, ne sont pas directement intégrables dans notre modèle. Cependant, [Hatfield et al., 1992] décrivent pour chacun d'entre eux les expériences ayant eu lieu afin de les valider. Nous nous basons sur celles-ci pour adapter ces facteurs aux composantes de notre modèle (personnalité OCEAN, relations sociales et émotions OCC agrégées en humeur) (Tableau 14). Des résultats de l'architecture REPLICANTS sont détaillés dans [Lhommet, 2012].

$\eta/\delta/\alpha$	Description	Interprétation
Pouvoir de contagion		
η	Ressent des émotions	E-
	Exprime des émotions	A+
		E+
		C-
Susceptibilité à la contagion		
δ	Attentif aux autres	A+
		Humeur > 0
	Dépendant des autres	O-
		A+
	Imite les émotions des autres	A+
	Conscient de ses émotions	O+
	Émotionnellement réactif	E-
Relations sociales		
α	Amour, admiration	$Affection_{a,b} > 0$
	Respect, pouvoir	$Dominance_{a/b} < 0$

Tableau 14: Influence de différences individuelle sur la contagion dans REPLICANTS

3.4 Conclusion

L'architecture Soar présente un grand nombre d'avantages. Elle permet de modéliser des processus décisionnels très évolués et la communauté de pratique autour de cette architecture permet de bénéficier d'évolutions constantes. Toutefois, Soar couplée à des mécanismes de planification s'appuie sur des théories cognitivistes et comme nous l'avons vu nous souhaitons rendre compte de processus décisionnels situés. Notre approche fondée sur la modélisation de l'activité humaine et des mécanismes mixtes de sélection d'action/planification permet de rendre compte d'une cognition située. Mais les mécanismes de planification mis en place dans MASVERP ne permettent pas de s'adapter à des contextes complètement imprévus. Par ailleurs, MASVERP met en œuvre des modèles cognitifs et physiologiques ad-hoc et REPLICANTS intègre des modèles issus de travaux en psychologie cognitive.

Ainsi, nous avons choisit de poursuivre nos travaux sur l'architecture REPLICANTS. Nous nous situons comme pour MASVERP, dans le cadre théorique de la psychologie cognitive ergonomique, i.e. sur l'observation des activités situées, socialement distribuées et incarnées. Nous ne souhaitons pas planifier les actions des personnages virtuels autonomes comme dans le cadre de l'utilisation classique

de Soar où l'humain est vu comme un système de traitement de l'information raisonnant sur des plans, mais bien planifier les activités situées en regard du contexte et des objectifs d'adaptation. REPLICANTS nous permet aussi d'intégrer les émotions (OCC), les relations sociales et la personnalité (OCEAN). Nous intégrons donc les algorithmes de sélection d'action et de planification COCOM et sur le modèle CREAM pour pouvoir les opérationnaliser en Soar. Il s'agit d'intégrer une approche guidée par des éléments situationnels et de rendre compte d'une cognition située. Le plan, ici, n'est qu'une ressource qui ne détermine pas l'action ; c'est un épiphénomène, une propriété émergente de l'action située. Toutefois, lorsque le modèle d'activité ne permet pas de trouver une solution, REPLICANTS permet de basculer en mode planification et de raisonner sur le modèle de domaine pour trouver des actions adaptées.

IV. Scénarisation adaptative dans les environnements virtuels pour l'apprentissage humain

1 Objectifs

La réalité virtuelle est une technologie qui présente de nombreux avantages pour la formation professionnelle. Mais pour qu'elle soit efficace, il est important de réfléchir à son utilisation pédagogique. L'utilisation d'environnements virtuels associés ou non à des tuteurs intelligents permet de mettre en œuvre différentes approches et méthodes pédagogiques. Selon ces approches, la scénarisation et le degré d'interaction dans les environnements virtuels seront plus ou moins contraints. L'idée que nous défendons est de proposer des modèles informatiques capables de supporter différentes approches pédagogiques. Après un état de l'art sur les différents domaines relatifs à la scénarisation des environnements virtuels pour l'apprentissage humain, nous présenterons nos apports dans ce domaine. L'objectif visé est d'amener l'apprenant à des réflexions sur ses représentations, à devenir acteur de son apprentissage et à apprendre à gérer de manière optimale des situations complexes et dégradées. Notre approche consiste à 1) adapter dynamiquement des situations en environnement virtuel qui soient à la fois cohérentes en regard des comportements attendus, pertinentes du point de vue des apprentissages et motivantes ; et 2) proposer des traces sémantiques explicitant tous les liens de cause à effet entre actions et la survenue d'événements critiques dans des systèmes très complexes (alliant aspects techniques, organisationnels et humains).

2 Etat de l'art

Les recherches sur les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain se situent « *à la croisée de multiples disciplines allant de l'informatique à la psychologie, à la didactique, aux sciences de l'éducation, à l'ergonomie* » [Burkhardt, 2010]. Dans cet état de l'art, nous présenterons plusieurs aspects de ces disciplines pour la scénarisation « *informatique* » de tels environnements. Nous présenterons d'abord les différentes théories de l'apprentissage, puis comment les erreurs sont traitées dans des environnements informatiques. Ensuite, nous dresserons l'état des recherches dans le domaine des Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain. Nous verrons comment la réalité virtuelle et les « serious games » permettent d'augmenter la motivation des apprenants et leur implication dans leurs apprentissage et enfin nous présenterons les techniques de scénarisation.

2.1 Théories de l'apprentissage, pédagogie, didactique

2.1.1 Cadres théoriques de l'apprentissage

Il existe plusieurs courants théoriques sur l'apprentissage. Nous nous intéressons plus particulièrement aux :

- Théories constructivistes : ces théories s'attachent à étudier les mécanismes et processus qui permettent la construction de la connaissance tout en prenant en compte les conceptions préalables des apprenants et leurs profils pédagogiques. L'apprenant reconceptualise les informations reçues en regard de ses propres concepts et à travers ses expériences. Le constructivisme postule qu'on apprend en faisant [Papert, 1981] ;
- Théories socio-cognitivistes : ces théories insistent sur l'importance des interactions sociales dans la construction de savoirs et proposent des pédagogies qui se fondent sur la notion de coopérations [Vygotsky, 1985], [Bandura, 1986] ;
- Théories sociales ou socioculturelles et l'apprentissage situé : ces théories articulent l'approche située de la cognition et de l'action. Le point central est l'interprétation des difficultés dans le transfert des connaissances « *apprises* » à l'action [Rogalski, 2004]. Ces théories considèrent que la situation dans laquelle se développent les apprentissages est primordiale et que les apprentissages doivent être contextualisés. Le rôle des apprentissages coopératifs et sociaux est aussi important.

[De Vries, 2001] a proposé de clarifier le domaine en distinguant huit catégories d'environnements informatiques pour l'apprentissage humain à partir de leur fonction pédagogique (Tableau 15) qui va de la simple présentation structurée d'un contenu à acquérir jusqu'à la simulation et à l'apprentissage par la collaboration. « *Chaque fonction est associée à des présupposés théoriques (bien que ceux-ci ne soient pas toujours explicites dans la littérature) et à un type de tâche prescrite pour les apprenants. Ces fonctions ne sont toutefois pas exclusives, les logiciels incorporant souvent plusieurs de ces fonctions* » [Burkhardt, 2010].

Fonction pédagogique	Type de logiciel	Théorie	Tâche prescrite à l'apprenant	Modalité de traitement appliquée aux connaissances ciblées
Présenter de l'information	Tutoriel	cognitiviste	Lire	présentation ordonnée
Dispenser des exercices	exercices répétés	béhavioriste	faire des exercices	Association
« Véritablement » Enseigner	tuteur intelligent	cognitiviste	Dialoguer	représentation
Captiver l'attention et la motivation de l'apprenant	jeu éducatif	principalement béhavioriste	Jouer	
Fournir un espace d'exploration	hypermédia	cognitiviste, constructiviste	explorer	présentation en accès libre
Fournir un **environnement** pour la découverte des lois naturelles	simulation	constructiviste, cognition située	manipuler, observer	modélisation
Fournir un environnement pour la découverte de domaines abstraits	micromonde	constructiviste	construire	matérialisation
Fournir un espace d'échanges entre apprenants	apprentissage collaboratif	apprentissage situé	discuter	construction de l'élève

Tableau 15 : Classification des logiciels d'apprentissage par [Burkhardt, 2010] d'après [De Vries, 2001]

L'analyse en termes de fonction pédagogique s'applique aussi aux caractéristiques des artefacts développés dans le champ de la réalité virtuelle pour l'apprentissage. Ceux-ci exploitent le plus souvent un mélange de fonctions relevant du jeu, de l'espace d'exploration autonome mais aussi de la simulation et parfois de la construction à l'intérieur d'un micromonde. La réalité virtuelle permet une exploitation intégrée des apports potentiels des technologies utilisées dans les EIAH [Lourdeaux, Burkhardt et Mellet d'hart, 2003]. « *Elles apportent aussi des potentialités en partie spécifiques comme l'immersion et la réintroduction du corps dans l'interaction, les trois dimensions de l'espace, ou encore la combinaison d'éléments du monde réel et d'éléments engendrés par l'ordinateur* » [Burkhardt, 2010].

2.1.2 Cadre théorique de la didactique professionnelle

Le projet de la **didactique professionnelle** « *est de rendre compte des processus qui sont en jeu d'une part, dans la formation des **compétences** lors des situations dans lesquelles intervient une intention de formation et, d'autre part dans le développement des compétences au cours de l'activité de travail* » [Rogalski, 2004]. Dans le premier cas, on vise la compréhension de comment se constitue une compétence professionnelle en formation et dans le second comment elle évolue au cours de la vie professionnelle. La didactique professionnelle s'est constituée à partir d'emprunts à trois champs théoriques : l'analyse du travail développée en ergonomie cognitive [Leplat, 2000], la théorie sur le développement de Vygotski et celle de Piaget revisitée par [Vergnaud, 1992] et les théories des situations didactiques de [Brousseau, 1998] et de la transposition didactique [Chevallard, 1985].

La didactique professionnelle est centrée sur la compétence. C'est dans l'action que se manifeste la compétence. Elle relève d'une capacité d'agir efficacement dans des circonstances définies, de s'adapter intelligemment aux situations. Être compétent n'est pas de savoir appliquer un ensemble de connaissances à une activité, c'est de savoir organiser son activité pour s'adapter aux caractéristiques de la situation. La didactique professionnelle permet aussi d'analyser les situations d'apprentissage telles qu'elles existent pour en extraire les difficultés d'apprentissage, les obstacles à l'apprentissage et les étapes de construction des compétences [Michel et Mellet d'Huart, 2006], [Samurçay et Pastré, 1995]. Il s'agit aussi d'analyser aussi bien les activités des professionnels expérimentés que l'activité d'apprentissage de personnes qui débutent dans un métier, en se centrant sur les difficultés cognitives qu'ils rencontrent. La didactique professionnelle s'intéresse aussi bien à la prise en compte des niveaux propres à l'individu, qu'au collectif et à l'articulation de leurs activités. A partir de ces analyses, il est possible d'acquérir les **variables didactiques** utiles pour la **transposition didactique**, i.e. la transformation, la déformation de la situation de travail pour en faire une situation d'apprentissage, une **situation didactique** efficace.

Les questions posées sont comment utiliser au mieux les situations professionnelles, extraites du travail ou déplacées à partir de situations de travail, pour générer de l'apprentissage ? Comment identifier les problèmes présents dans le travail qui peuvent être sources de difficultés d'apprentissage ? Comment transposer ces problèmes pour en faire des situations didactiques ? Comment identifier et surmonter les difficultés cognitives rencontrées par les apprenants dans la confrontation à ces situations ? Et enfin quelles ressources pédagogiques/formatives et quelles méthodes pédagogiques sont les plus adaptées pour créer ces situations didactiques ?

Les situations didactiques peuvent être des **situations-problèmes**. Cette notion est issue de travaux en psychologie cognitive qui supposent que résoudre un problème c'est apprendre [Richard, 1990]. Ce type de situation pose l'hypothèse qu'on apprend en se confrontant et en agissant sur des situations-problèmes qui nous obligent à construire une réponse nouvelle. La situation-problème est à même de favoriser le développement d'un conflit cognitif, lequel apparaît dans la théorie constructiviste comme capable de générer des changements conceptuels, de faire progresser les apprenants. Pour [Barnier, 2001], les quatre étapes d'une situation-problème sont : 1) L'apprenant pense qu'il va pouvoir résoudre le problème en le ramenant à des savoirs qu'il maîtrise ; 2) S'il n'y parvient pas, il est déstabilisé. Il prend alors conscience des limites de son mode de traitement actuel ; 3) Il peut persévérer, essayer de revisiter ce qu'il sait et construire ce qui lui manque ; 4) Si ce type d'effort aboutit, la résolution du problème s'accompagne d'une amélioration dans la manière dont il mobilise savoirs et savoir-faire pour en faire des outils de résolution de problèmes. Le déséquilibre surmonté par la résolution peut provoquer des réajustements, des restructurations de connaissances, une meilleure intégration de connaissances nouvelles, une meilleure capacité à réinvestir ce qu'il sait pour résoudre des problèmes.

2.1.3 Méthodes et ressources pédagogiques

Une fois les situations didactiques identifiées, il reste à déterminer les ressources et les méthodes pédagogiques. Il est classique de distinguer deux grandes approches en pédagogie : les **méthodes traditionnelles et les méthodes actives** [Burkhardt, Lourdeaux et Mellet d'Huart, 2005].

Parmi les **méthodes traditionnelles**, on trouve les méthodes **affirmatives** encore appelées méthodes expositives (exposé magistral et démonstration) et les méthodes **interrogatives**. Dans leur acception la plus large, les **méthodes actives** regroupent une variété de courants, comme la pédagogie du projet, la simulation, l'étude de cas, etc. Une méthode est dite active lorsque l'apprenant progresse et apprend grâce à sa propre activité : il découvre par lui-même.

Quelle que soit la méthode choisie, le formateur s'appuie généralement sur des aides telles que des documents, des objets ou d'autres outils. Le terme de **ressource pédagogique** fait référence à ces moyens physiques conçus de façon à faciliter, pour un contexte pédagogique donné (présentiel, tutorat à distance, auto-formation etc.), les apprentissages pour l'apprenant, d'une part, et la conduite de l'interaction didactique pour le formateur, d'autre part.

Dans le cadre du projet APLG, nous avons mené une étude sur 17 environnements virtuels et leurs usages en formation. Cette étude a permis de croiser trois dimensions : la dimension apprenant, la dimension pédagogie et apprentissage, et enfin les caractéristiques de la technologie et des configurations exploitées. Le détail de la méthodologie est donné dans [Burkhardt, Lourdeaux et Lequatre, 2005]. A partir de cette étude, J.M. Burkhardt a pu mettre en évidence quatre patrons principaux représentant les tendances observées : 1) les situations de tutorat, 2) les situations d'exposé où l'environnement virtuel est conçu comme support de cours pour le formateur dans le contexte d'animation en face-à-face, 3) les activités en groupe supervisés ainsi que 4) la situation pédagogique autonome en autoformation. Ces patrons renvoient chacun à une configuration sociotechnique et pédagogique de référence propre. Il existe une relation forte entre la configuration physico-spatiale et la situation pédagogique où il s'insère. Il existe également une relation forte entre le type d'objectifs - compétences ciblé par la formation et la situation pédagogique mise en œuvre.

2.2 Statut et traitement de l'erreur

Selon les théories appliquées, les erreurs de l'apprenant et leur remédiation sont traitées différemment. Nous avons décrit la différence entre erreur et violation, au chapitre II.2.1 et certains modèles d'erreurs,

au chapitre III.2.3.6. Nous allons, ici, aborder le sujet du statut de l'erreur dans les apprentissages et comment la détecter et la traiter au niveau informatique.

2.2.1 Traitement et diagnostic de l'erreur

2.2.1.1 Retour sur apprentissage

A travers les modèles d'erreurs présentés précédemment, nous avons vu quand et comment pouvaient se manifester les erreurs ou violations. Ces erreurs et violations peuvent être vues comme un effet négatif. « *Mais nous devons, aussi et surtout, considérer l'aspect positif de l'erreur. Lorsque les apprenants tentent de retrouver l'erreur commise, ils s'interrogent sur la cause et recherchent le mécanisme qui explique sa production* » [Butin, 2001]. Qui plus est, dans le cas des violations, il est intéressant d'amener l'expert qui les commet à se questionner sur ses représentations. Les compétences se construisent certes en « *faisant* » mais aussi en permettant à l'apprenant d'analyser les moments et les indicateurs où il doit effectuer les contrôles utiles pour une action efficace. La **métacognition** repose sur l'activité de réflexion que l'apprenant doit développer sur la façon dont il s'y prend pour apprendre et sur la pertinence des démarches utilisées compte tenu des résultats obtenus.

Le **retour sur l'apprentissage et l'analyse réflexive** de l'activité sont essentiels pour la prise de conscience des acquisitions et des erreurs. Cette étape consiste à guider l'apprenant dans l'analyse de la tâche réalisée et l'explicitation de ce qu'il a retenu au travers de son expérience de la séquence de formation. Les environnements virtuels peuvent, par exemple, intégrer des fonctionnalités de type re-jeu (actif, passif, conditionnel) et des traces de l'activité particulièrement intéressantes dans cette perspective. Pour générer des traces, l'environnement peut être doté d'un système de suivi ou d'un tuteur intelligent qui va s'intéresser aux actions et aux résultats des actions de l'apprenant.

2.2.1.2 Traitement de l'erreur

Certains concepteurs souhaitent ne pas **montrer les conséquences des erreurs** ou ne pas laisser l'apprenant enchaîner plusieurs erreurs. D'autres, préfèrent laisser l'apprenant enchaîner des erreurs et apprendre de ces erreurs. Ils peuvent même parfois vouloir pousser les apprenants à commettre des erreurs. La question qui se pose en cas d'erreur et de probabilité d'erreur est que doit-on faire ? **Doit-on mettre en évidence, corriger, prévenir ou provoquer l'erreur** ? Doit-on proposer un système introspectif ou rétrospectif ? Les réponses à ces questions dépendent des applications, des doctrines, des ingénieurs de formation, des objectifs de formation, des formateurs, etc.

En cas d'erreur, certains systèmes **interviennent de manière systématique**. Ces interventions immédiates, bien qu'elles interrompent l'immersion de l'apprenant et donc son engagement dans la simulation peuvent être intéressantes pour des formateurs qui souhaitent ne pas laisser l'apprenant aller jusqu'à l'erreur. En effet, pour eux, une mauvaise pratique est **difficile à désapprendre** et peut même influencer négativement la suite des acquisitions. Parfois, au-delà des aspects d'efficacité pédagogique, les conséquences d'erreurs peuvent être **traumatisantes** ou créer des angoisses inutiles, notamment dans des formations où des vies humaines sont en jeu. D'autres formateurs ou concepteurs pédagogiques réfèrent par contre faire **observer les conséquences des erreurs et permettre aux apprenants d'apprendre à partir de leurs erreurs**. Il existe un dilemme sur la manière, le moment et le type d'informations à transmettre à l'apprenant. Chaque concepteur pédagogique trouvera la solution la mieux adaptée au contexte et aux objectifs de formation visés.

2.2.1.3 Diagnostic et types d'erreur

Le modèle d'erreur choisi (chapitre III.2.3.6) et le diagnostic de l'erreur ne sont pas les mêmes selon que l'on souhaite corriger l'erreur, souligner l'erreur, donner les moyens à l'apprenant de redéfinir le domaine de validité d'une connaissance.

Types d'erreur

La détection des types d'erreur peut s'appuyer sur un modèle d'erreur. Le **modèle d'erreur** dépend de l'intérêt que l'on porte ou non aux observables et aux conséquences ou aux causes des erreurs et à leur remédiation (Tableau 16). Et, il dépend de si l'on s'intéresse à des erreurs indépendantes du domaine (e.g. inversion de tâches, omission de tâches, non-respect d'une précondition) ou à des erreurs

spécifiques (e.g. si l'apprenant n'a pas fait l'action X et l'action Y et qu'il n'a pas la ressource Z et que les conditions particulières W ne sont pas respectées). Ainsi si l'on s'intéresse à des **erreurs indépendantes du domaine** et aux **observables** des erreurs sans chercher à remédier aux causes, il est possible de s'appuyer sur des modèles d'erreur comme ceux de [Hollnagel, 1998], de [Reason, 1990], de [Norman, 1981] ou si l'on s'intéresse plus aux **causes des erreurs** et à leur remédiation il est possible de s'orienter vers des modèles comme celui de [Rasmussen, 1982]. Si l'on s'intéresse à des **erreurs fortement dépendantes du domaine** alors on s'orientera vers des modèles plus ad-hoc. Si l'on s'intéresse à la **remédiation des causes** des erreurs, alors on choisiera une étude détaillée orientée par la didactique professionnelle. Dans ce sens, [Luengo, 2009] propose des modèles très pertinents pour produire des rétroactions épistémiques adaptatives.

En EIAH et qui plus est en réalité virtuelle où les interfaces pour l'interaction ne sont pas mûres ou ne sont pas encore intuitives pour tous, il est important de **différencier les erreurs** liées aux **connaissances/compétences** de celles liées à **l'utilisabilité** des interfaces. Laisser l'opportunité aux apprenants d'expérimenter toutes les séquences d'action possibles en environnement virtuel et en observer les conséquences, suppose une utilisabilité intuitive pour que, justement, il n'y ait pas d'ambigüité entre ces deux types d'erreur. Par ailleurs, laisser faire des erreurs sans ambigüité est, comme nous l'avons expliqué, parfois difficile à programmer ou incompatible avec certains modes d'interaction choisis. Par exemple, dans notre environnement de chargement de matière dangereuse, le conducteur doit faire une manipulation qui nécessite deux mains. Il doit fermer une poignée et, pour éviter une fuite, peut systématiquement ou seulement si la vanne ne revient pas, accompagner cette fermeture d'un actionnement de vanne. Il peut donc démarrer l'accompagnement de la vanne, soit en même temps qu'il démarre la fermeture de la poignée, soit un peu après le début de la fermeture de la vanne, soit après la fermeture complète de la vanne ou bien ne pas l'accompagner du tout. Offrir ces choix par des menus, pose de nombreux problèmes pour déterminer les animations du mannequin virtuel. Une solution serait de proposer au départ à l'apprenant de : « *fermer la poignée* » ou « *fermer la poignée en accompagnant la vanne* ». Ces propositions donnent trop d'indices à l'apprenant et il risque ne pas faire d'erreur. Ne pas lui mettre toutes les propositions et trouver des moyens complexes d'animation avec des menus, rend le système moins intuitif et l'apprenant risque de ne pas accompagner la vanne juste parce que le système de menus est complexe. Comme nous l'avions décrit dans la méthodologie de conception d'environnements virtuels pour la formation proposée dans [Lourdeaux, 2001], le choix des primitives comportementales virtuelles et des interfaces doit être fait en relation avec les difficultés d'apprentissage et les objectifs de formation. Ici, l'idéal est d'avoir un mannequin physicalisé (détection des collisions) et des interactions naturelles (e.g. wii-mote, kinect).

Diagnostic

Le **diagnostic** des erreurs est une question cruciale. Il existe deux grandes approches : l'approche générative et l'approche évaluative [Luengo, 2009] (Tableau 16).

L'approche **générative** s'appuie sur le traçage de modèle [Corbett et Anderson, 1995] et consiste à générer la solution au problème donné ainsi que parfois certaines erreurs typiques. Il s'agit, ensuite, de comparer la solution produite par l'apprenant, ici considéré comme modèle de l'apprenant, à la solution idéale (modèle d'expertise partielle ou overlay) et, si elles existent, aux erreurs typiques (modèle différentiel ou overlay étendu). Le modèle d'expertise partielle pose deux principaux problèmes :

- Il ne permet pas de déterminer les causes profondes des choix des apprenants. Le problème est identique, si le choix est correct (les connaissances mises en jeu pour atteindre le but ne sont pas forcément les bonnes et dans une situation un peu différente l'apprenant ne saura peut-être plus résoudre le problème) ;
- Il ne permet pas non plus de rendre compte de la façon dont la connaissance évolue à travers des processus comme l'analogie ou la généralisation [Bruillard, 1997].

L'ajout d'erreurs typiques permet de répertorier certaines causes d'erreurs. Toutefois, décrire les erreurs et leurs causes éventuelles n'est pas toujours suffisant pour déterminer le type d'intervention à effectuer [Bruillard, 1997]. Et, le pouvoir explicatif reste faible. Dans tous les cas avec ces modèles, toute solution non reconnue comme étant la bonne solution ou une erreur typique est considérée comme incorrecte.

Néanmoins, ces modèles se déduisent facilement de l'analyse du domaine et sont robustes si un découpage en connaissances élémentaires est suffisant et ne nécessite pas d'analyse plus profonde des raisonnements des apprenants. Ce type d'approche convient assez bien pour des tâches procédurales mais peu pour des tâches de diagnostic, où la question des contrôles est primordiale. On retrouve ce type d'approche dans les EIAH avec Geometry tutor ou Lisp tutor et dans les environnements virtuels comme PEGASE [Buche, 2005] ou HAL [Lourdeaux, 2001].

L'approche **évaluative** s'appuie sur une méthode dite orientée contraintes [Ohlsson, 1992] et consiste à vérifier le respect des contraintes par l'apprenant. Ici, c'est plus l'état du problème qui est considéré que l'action. Cette approche permet de ne pas avoir à modéliser toutes les étapes de résolution du problème. Cependant, cette approche est plus difficile à implémenter que la première car la conceptualisation du problème demande plus d'effort. Par ailleurs, avec ce type d'approche, les rétroactions sont souvent associées à la contrainte la plus violée et « *peuvent faire référence à une solution trop éloignée de la stratégie de solution adoptée par l'apprenant* » [Luengo, 2009]. Ce type d'approche convient bien à des tâches de diagnostic mais moins à des tâches procédurales où la notion d'ordre de tâche est primordiale. On retrouve ce type d'approche dans SQL-Tutor, KERMIT, etc.

[Luengo, 2009] propose des modes **alternatifs** pour le diagnostic s'appuyant sur des modèles de connaissances du sujet épistémique qui interrogent les actions, les raisons de ces actions pour ce qu'elles sont et non relativement à une solution attendue. [Luengo, 2009] considère l'erreur comme le symptôme d'une connaissance. L'un de ces modes combine plusieurs approches et principes : le diagnostic émergent, les agents, la théorie du vote et la formation de coalition [Webber, 2004].

De nombreux systèmes de diagnostic tendent à considérer **l'incertitude** du diagnostic. Ainsi, certains systèmes s'orientent vers les réseaux bayésiens ou vers les théories de la décision [Fricoteaux, Thouvenin *et al.*, 2011].

Dans de nombreux EIAH traitant de la résolution de problème type mathématique, l'apprenant explicite son raisonnement. Le diagnostic de son raisonnement est donc plus aisé que dans les environnements virtuels où le raisonnement est implicite. Dans ce cas, le diagnostic doit s'appuyer sur des éléments de la trace laissée par l'apprenant.

		Détecter et souligner les erreurs et les conséquences	Détecter, souligner les erreurs et remédier aux causes
Modèles d'erreurs	Erreurs indépendantes	Modèles d'Hollnagel, de Norman, de Reason	Modèle de Rasmussen
	Erreurs spécifiques	Modèles ad-hoc (liste d'erreurs possibles)	Modèles s'appuyant sur des variables didactiques
Diagnostic / approche		Approche évaluative / Incertitude	Approche générative / Incertitude
Représentation des connaissances		Modèles de domaine, de risques, d'activité, traces	
Inspection		Introspection, rétrospection	

Tableau 16 : Liens entre objectifs de traitement de l'erreur et modèles d'errreur, approches, etc.

2.2.2 Rétroactions

Il existe plusieurs catégorisations en sciences humaines sur les rétroactions résumées dans [Luengo, 2009] selon qu'elles prennent en compte :

- L'intention d'évaluation : formative (informations sur les processus et résultats d'apprentissage) ou sommative (évaluation des acquis de l'apprenant) ;
- L'intention pédagogique : renforcer, informer, corriger, confirmer, expliquer, diagnostiquer, élaborer, diriger, faciliter ;
- Les conséquences et la manière dont elles sont transmises : positives (renforcement), négatives (correctives), constructives ou suggestives ;
- La complexité : sur le volume et la nature de l'information transmise (sans rétroaction, vérification, réponse correcte, essayer encore, soulignage d'erreur, etc.) ;
- Etc.

En EIAH, [Luengo, 2009] résume les catégorisations selon qu'elles concernent :

- La dynamique : adaptatives ou non, macro-adaptatives (concernent les habilités perceptives et cognitives) ou micro-adaptatives (concerne le domaine),
- La personnalisation : si elles prennent en compte ou non les données personnelles ;
- Le couplage à l'architecture : fortement ou faiblement couplées. Les modèles faiblement couplés sont des modèles externes indépendants des autres modèles et facilement modifiables. Les modèles fortement couplés sont liés aux objets, au monde simulé ;
- L'automatisme : les rétroactions peuvent être automatiques (déclenchées par le système) ou semi-automatiques (proposées par le système et déclenchées par le formateur) ;
- L'intelligence : une rétroaction intelligente est déclenchée par des techniques d'intelligence artificielle. L'intelligence peut améliorer le diagnostic, le choix de la rétroaction, etc. « U*n système de rétroaction qui associe une forme de rétroaction à chaque erreur, ou famille d'erreurs sans proposer des techniques de raisonnement, n'est pas un modèle intelligent* » [Luengo, 2009].

2.2.3 Contraintes d'interactivité dans les environnements virtuels

La notion ***d'interactivité*** revêt plusieurs sens dans le domaine de l'informatique pédagogique et de la réalité virtuelle, depuis le déclenchement de l'étape suivante dans l'exposition d'une consigne, jusqu'au contrôle par l'apprenant des paramètres d'une simulation pour en comprendre les règles de fonctionnement, ou bien encore l'établissement de dialogues avec d'autres entités virtuelles. Cette notion d'interactivité ne doit pas être confondue avec le **mode d'interaction** (dispositifs d'action et de restitution). Parler en général d'un quelconque bénéfice de l'interactivité sur l'apprentissage n'est pas possible. Il est nécessaire de préciser le type d'interactivité dont il s'agit et de distinguer la part de l'interactivité liée à l'utilisation et la navigation à l'intérieur de l'outil, avec la part de l'interactivité explicitement associée à la mise en place d'un apprentissage. [Bétrancourt *et al.*, 2000] montre que l'interactivité liée à la navigation dans l'outil ne semble pas améliorer l'efficacité. A l'inverse, l'interactivité de l'apprenant avec les variables sous-tendant la simulation serait favorable pour l'apprentissage. L'effet positif de l'interactivité sur l'apprentissage n'est ainsi pas systématique, car elle peut s'accompagner d'une augmentation de la charge de travail de l'utilisateur, laquelle peut avoir pour effet d'empêcher l'apprentissage et l'amélioration de la performance [Stanney *et al.*, 1998].

Le degré d'interactivité dans les environnements virtuels n'a pas toujours été corrélé à la fonction pédagogique ou à la théorie de l'apprentissage sur lesquelles repose leur utilisation. Ainsi, les contraintes d'interactivité ont subi des variations au cours du temps :

- **Approches contraintes par le manque de maturité des interfaces et par simplicité de programmation** : les premiers travaux étaient centrés sur des aspects techniques. Pour simplifier les développements plus que par choix pédagogique, les systèmes modélisés étaient relativement simples (e.g. gestes décomposables, procédures linéaires). Il en résultait des environnements fortement contraints. L'apprenant ne pouvait pas s'écarter de la procédure définie. Ces limitations avaient toutefois l'intérêt de répondre à certains besoins pédagogiques focalisés sur la performance et la répétition de la bonne procédure. Ces systèmes ne permettaient pas à l'apprenant de s'écarter de la procédure : en cas d'erreur, ce dernier était immédiatement arrêté et au mieux redirigé vers la procédure prescrite ;
- **Approches contraintes par le fonctionnement des objets** : dans un second temps, les environnements virtuels ont été plus ouverts, intégrant le fonctionnement du système réel avec des contraintes d'interactivité liées aux contraintes des objets. Cependant, si ces environnements permettent une plus grande liberté d'action et donc des apprentissages par essais-erreurs, ils ne garantissent pas un apprentissage donné ;
- **Approches contraintes par la pédagogie** : dans un troisième temps le couplage de la réalité virtuelle avec des systèmes tuteurs intelligents a amené de nouvelles fonctionnalités pédagogiques et a limité les interactions par des contraintes pédagogiques. L'adjonction de modèles de tâches, de modèles pédagogiques et de modèles de l'apprenant a permis de proposer

des systèmes de détection des écarts de l'apprenant et des rétroactions plus riches (e.g. expliquer la procédure, montrer comment la faire, suggérer l'action à exécuter). Ces modèles correspondaient souvent au modèle de l'expert et au modèle pédagogique du tuteur. Parmi ce type de tuteurs, on note : NICE (Narrative-based immersive Contructionist/Collaborative Environments) [Roussos, Johnson *et al.*, 1999], STEVE [Johnson *et al.*, 1998] ;

- **Vers des approches non-contraintes mais contrôlées** : aujourd'hui les environnements peu contraints (micromondes, simulations, etc.) proposent des moyens d'augmenter le degré d'interactivité en orchestrant des situations d'apprentissage plus contraintes. Au contraire les tuteurs intelligents très contraints relâchent les contraintes en proposant des nouvelles formes d'interactivité. Ainsi, « *ces environnements permettront de transformer plus facilement les conceptions erronées de l'apprenant en expériences constructives d'apprentissage* » [Luengo, 2009].

2.2.4 Sélection de rétroactions

Après le diagnostic des erreurs et du moment opportun où la rétroaction doit intervenir, il s'agit de déterminer quelle(s) rétroaction(s) proposer à l'apprenant. La sélection des rétroactions est souvent dévolue à des tuteurs intelligents. Après avoir vu ce calcul dans les EIAH et dans les EVAH, nous présenterons rapidement l'architecture d'un tuteur intelligent.

2.2.4.1 Sélection des rétroactions dans les EIAH

Le choix des rétroactions diffère selon que l'apprenant réussit ou non. Pour [Tahri, 1993], si l'apprenant réussit, le choix porte sur la sélection du prochain problème, e.g. un problème plus complexe. En situation d'échec, plusieurs choix sont possibles : proposer un problème plus simple en sélectionnant une variable didactique qui a posé problème, aider l'apprenant à décomposer le problème, montrer son erreur, donner des indices. Selon [Diagne, 2009], le rôle du tuteur est soit :

- Social : pour motiver ;
- Pédagogique : pour aider l'apprenant à organiser ses apprentissages ;
- Cognitif : pour fournir un support pour la compréhension des connaissances ;
- Technique : pour aider l'apprenant/utilisateur à utiliser les dispositifs.

2.2.4.2 Sélection des rétroactions dans les EVAH

[Buche et al., 2006] proposent un descriptif détaillé de l'utilisation des tuteurs intelligents dans les EVAH et un panorama des principales applications.

Ici, nous aborderons succinctement les tuteurs intelligents dans les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain sous deux angles 1) la personnification des tuteurs permettant le compagnonnage cognitif et 2) la généricité des rétroactions.

Dans les environnements virtuels pour l'apprentissage humain, la tendance initiale était la **personnification des tuteurs intelligents avec représentation anthropomorphique**. L'exemple le plus connu est l'agent pédagogique virtuel STEVE (Soar Training Expert for Virtual Environment). STEVE peut montrer à l'apprenant, expliquer, répondre à des questions et évaluer l'action réalisée par ce dernier. Dans la lignée de STEVE, Herman the bug, un petit insecte vert aux allures extra-terrestres permet l'apprentissage de la botanique [Lester, 1999]. Dans l'idée de compagnon cognitif incarné et d'un apprentissage situé, MAX est un agent virtuel qui coopère avec l'apprenant pour construire un modèle réduit en environnement virtuel immersif type CAVE [Kopp *et al.*, 2003].

D'autres formes de tuteurs intelligents, sans représentations anthropomorphiques sont apparus. Certains environnements proposent des **rétroactions dites génériques**. Par exemple, dans PEGASE [Buche, 2005] défend l'idée de tuteur générique et de modèle pédagogique générique indépendant du domaine et de la situation. Des classeurs hiérarchiques et des règles pédagogiques permettent de sélectionner les rétroactions selon le niveau de l'apprenant et selon le type d'erreur (e.g. *« SI l'apprenant est novice, S'IL vient d'effectuer une erreur de type agencement et si l'action effectuée est différente de l'action correcte ALORS favoriser l'ensemble Expliquer du niveau qui suit. »*).

S'appuyant sur le fait qu'en didactique, chaque erreur et chaque combinaison d'action est liée à un problème de représentation ou d'application des connaissances bien particulier dans un contexte/situation bien particulier, [Luengo, 2008] **défend l'idée que les rétroactions ne peuvent pas être génériques et qu'il est important de générer des rétroactions spécifiques**. Dans son système TELEOS, elle propose une sélection de la rétroaction fondée sur la théorie de la décision pour maximiser l'utilité pédagogique espérée en fonction de l'état déduit de la connaissance de l'apprenant.

2.3 Etat des recherches sur les environnements virtuels pour l'apprentissage humain

2.3.1 Avantages de la réalité virtuelle pour l'apprentissage humain

Si les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain sont désormais nombreux [Mikropoulos *et al.*, 2011], la majorité d'entre eux se situe dans un contexte éducatif et non professionnel.

Les avantages de l'utilisation de la réalité virtuelle dans un contexte de formation professionnelle sont nombreux. Nous avons largement décrit ces avantages dans [Lourdeaux, 2001], [Burkhardt, Lourdeaux et Mellet d'Huart, 2005]. On peut citer ceux provenant des simulateurs comme : simuler des terrains difficiles, des situations rares, sans danger pour soi et autrui, des matériels coûteux, etc. L'utilisation de la réalité virtuelle comme d'autres médias informatiques rend possible le contrôle des situations, de leur complexité, de leur dangerosité et la décomposition des apprentissages. Sur ce dernier point, l'application CS-WAVE proposé par l'AFPA CS est un très bon exemple. Cet environnement virtuel permet à l'apprenant d'apprendre séparément les différentes composantes de son geste (vitesse, angles, distances, etc.) puis de les recomposer. L'utilisation de la multimodalité (son, visuel, sens kinesthésiques) est aussi une des propriétés intéressantes de la réalité virtuelle et des simulateurs (e.g. simulateurs de conduite). Mais plus spécifiquement par rapport à d'autres médias informatiques, la réalité virtuelle permet de former au geste, d'engager le corps dans la simulation, de produire des retours d'efforts ou tactiles (e.g. soudage, pose de mastic, gestes chirurgicaux, etc.). Elle permet aussi de modifier les échelles spatiales (e.g. voir à l'échelle moléculaire), temporelles, informationnelles (e.g. voir les mécanismes internes), de changer de point de vue (e.g. point de vue 1ère ou 3e personne, du dessus, etc.). La réalité virtuelle permet aussi de montrer des phénomènes invisibles à l'œil nu (e.g. radioactivité) et de réifier, i.e. fournir des représentations de données abstraites de manière matérielle et concrète (e.g. physique newtonienne, zones de danger). Il est aussi possible de fournir des aides et guides virtuels pour corriger en temps interactif son activité ou son geste. Toutefois peu d'environnements virtuels proposent des aides qui s'adaptent selon le profil de l'apprenant contrairement aux EIAH qui proposent souvent ce type de fonctionnalités.

Du **point de vue des apprenants**, la réalité virtuelle permet d'interagir, d'expérimenter, d'allier geste et diagnostic, d'augmenter l'expérience, d'évoluer à son rythme, de tester des situations rares et stressantes pour qu'à l'avenir elles ne le soient plus, de prendre des risques, d'apprendre à partir de ses erreurs, de s'auto-évaluer si l'environnement possède des systèmes de traces et d'enregistrement des performances, etc. Parmi des applications très prometteuses, on peut citer l'utilisation des simulateurs pour la formation des personnels réanimateurs en situation d'urgence où chacun doit apprendre à réagir, vite et bien en situation collective.

Du **point de vue des formateurs**, la réalité virtuelle permet de faire vivre des expériences pertinentes, de proposer une pédagogie diversifiée, de varier entre différentes pédagogies (e.g. pédagogie active ou passive), de choisir les scénarios adaptés aux apprentissages et aux apprenants, de proposer des situations d'apprentissage variées, de reproduire des situations à l'identique pour une pédagogie contrôlée ou au contraire de jouer des situations inattendues. La réalité virtuelle permet aussi d'enregistrer l'activité des apprenants et de permettre aux formateurs d'animer des debriefing interactifs. Surtout, la réalité virtuelle permet de concrétiser des enseignements qui sont parfois abstraits. Lorsque les terrains sont inaccessibles et que la formation passe par des formations en salle avec transparents, la réalité virtuelle permet d'amener du concret en salle.

Du **point de vue des entreprises utilisatrices**, l'amélioration de la qualité et de l'efficacité des formations est difficilement mesurable. En effet, il est difficile de montrer qu'un groupe d'apprenants formés avec de la réalité virtuelle sera plus efficace qu'un groupe formé sans, notamment lorsque

l'efficacité doit se calculer par rapport aux risques engendrés. Il est difficile de mettre des opérateurs dans des situations risquées pour mesurer leur efficacité. Le principal facteur d'efficacité évalué est le retour sur investissement. La question du transfert d'apprentissage et de l'efficacité est, notamment, étudié par [Bossard, 2006].

Si la réalité virtuelle semble séduisante sur de nombreux plans, il n'en reste pas moins qu'il ne suffit pas d'utiliser la réalité virtuelle pour être efficace. La conception d'environnements virtuels pour l'apprentissage humain nécessite une réelle réflexion. Ce point est discuté dans le chapitre suivant.

2.3.2 Les écueils à éviter dans la conception d'environnements virtuels pour l'apprentissage humain

Nous avons présenté dans [Burkhardt, Lourdeaux et Mellet d'Huart, 2005] les écueils à éviter pour concevoir un environnement virtuel pour l'apprentissage humain. Rappelons-en ici quelques-uns.

L'utilisation de la réalité virtuelle pour apprendre pose la question du réalisme ou de la **fidélité** au regard des situations réelles. De nombreux concepteurs ont cherché à reproduire les situations réelles avec le maximum de fidélité en supposant que le virtuel allait remplacer le réel. Ils ont supposé que plus le virtuel serait proche du réel, meilleur serait l'apprentissage. Cette hypothèse est controversée. De nombreuses études montrent, en effet, que la fidélité de l'apparence physique n'est pas corrélée avec la performance en termes de transfert et d'apprentissage [Patrick, 1992], [Nyssen et al., 2002].

Dans [Bardy, Burkhardt et Lourdeaux, 2003] nous avons précisé les concepts **d'immersion**, **réalisme** et **présence**. Si les recherches menées sur les environnements virtuels pour l'apprentissage humain se sont **centrées sur les aspects techniques** et la fidélité des situations, ce n'est pas uniquement parce que les concepteurs ont supposé que l'apprentissage serait amélioré, c'est aussi parce que la technologie était en cours de **maturation** et que des travaux sur les aspects techniques étaient nécessaires pour permettre à cette technologie de percer. Mais, cette focalisation exclusive sur les aspects techniques a eu pour conséquence d'ignorer la question des situations à simuler. Il y a eu une réelle confusion entre recherche technologique et **efficacité pédagogique**.

Pour [Michel et Pasco, à paraître] *« la fidélité technique et psychologique ne suffit pas à assurer le développement de compétences utiles dans la pratique réelle. Les caractéristiques des situations didactiques vécues et leur mise en scène dans l'environnement informatique jouent un rôle aussi important que les caractéristiques techniques »*. .

Le prétexte de la **nouveauté technologique** ne doit pas amener à faire l'impasse sur les travaux plus anciens qui peuvent s'avérer directement pertinents dans le cadre des applications de formation : en didactique, en ergonomie, en informatique pédagogique, etc.

L'apprentissage est un processus complexe qui n'est pas réductible à la simple exposition à un contenu et un environnement, soient-ils virtuels. Il est donc nécessaire de se munir d'une méthode pour accompagner et valider les choix de conception. Comme nous l'avons déjà dit, nous avons proposé une méthodologie de conception d'environnements virtuels pour l'apprentissage humain qui ne sera pas détaillée dans ce mémoire (voir [Lourdeaux, 2001] et [Burkhardt, Lourdeaux et Mellet d'Huart, 2005]).

2.3.3 Réalité virtuelle, serious games et facteur de motivation

Il reste bien sûr des recherches à mener sur le plan technologique pour permettre de nouveaux types d'applications (e.g. retour haptique, interactions naturelles). Toutefois, au-delà des aspects techniques, il est aussi intéressant, comme nous l'avons dit pour concevoir des environnements efficaces sur le plan de l'apprentissage, d'appuyer nos recherches sur les travaux dans le domaine des EIAH et de la didactique professionnelle. Par ailleurs, si la réalité virtuelle suscite de forts intérêts, c'est aussi parce que les formateurs y voient un moyen de rendre les formations plus motivantes.

2.3.3.1 Facteurs de motivation et réalité virtuelle

Un autre avantage de la réalité virtuelle non décrit précédemment et posé comme hypothèse à la fin des années 90 est sa capacité à apporter de l'inédit et à motiver les apprenants. On supposait que le simple fait d'utiliser la réalité virtuelle allait motiver. La réalité virtuelle temps réel a fait du chemin, et des verrous technologiques forts ont été levés depuis pour qu'elle soit facilement utilisable. Or aujourd'hui, les films d'animations et les jeux vidéo avec des images de synthèses précalculées sont arrivés à un tel

degré de fidélité esthétique que les concepteurs d'environnements virtuels pour l'apprentissage humain avec des contraintes temps interactif et économiques proposent des environnements qui peuvent paraître désuets et peu motivants, au simple regard de l'utilisation de la technologie [Lourdeaux, 2009]. Néanmoins, comme nous l'avons dit au chapitre précédent, la fidélité esthétique n'est pas gage d'efficacité pédagogique. Au même titre que la réflexion sur les situations didactiques, la notion de scénario est importante. Et comme pour un film, l'esthétique visuelle n'est pas le plus important si le scénario n'est pas à la hauteur. Après avoir fait un panorama de la notion de serious game, nous présenterons quels sont les facteurs de motivation.

2.3.3.2 Serious games

Jusqu'à récemment, les jeux électroniques étaient associés à de nombreux clichés et étaient réputés pour avoir un impact négatif sur les capacités mentales et physiques des joueurs. Cependant, des études ont montré que, même si leur utilisation irraisonnable pouvait avoir des effets négatifs, comme toute autre activité pratiquée à l'excès, la mise en place de bonnes habitudes (e.g. temps de jeu et environnement approprié, etc.) pouvait transformer ces jeux en une activité sûre et épanouissante [Felicia, 2009]. Si l'origine des « jeux sérieux » remonte au XVe siècle, l'utilisation de jeux vidéo et de jeux sérieux à base de technologies numériques pour la formation et l'éducation est quant à elle plus récente.

Pour [Alvarez, 2007], le serious game ou jeu sérieux est « *une application informatique, dont l'intention initiale est de combiner, avec cohérence, à la fois des aspects sérieux (Serious) tels, de manière non exhaustive et non exclusive, l'enseignement, l'apprentissage, la communication, ou encore l'information, avec des ressorts ludiques issus du jeu vidéo (Game)* ». Le lecteur intéressé par une revue complète sur les serious games trouvera une étude récente dans [Djaouti, 2011]. Pour certains, le serious game diffère du jeu vidéo de par son intention éducative et par le fait qu'il s'appuie sur un scénario pédagogique. Pour d'autres comme [Portugal, 2010], le serious game doit avant tout être ludique. Pour cet auteur, si apprendre est une activité structurée, organisée, et progressive, tout game designer (concepteur de jeu) reconnaîtra quant à lui dans cette définition les qualités d'un bon gameplay. L'auteur met en évidence que les disciplines pourtant cousines de la didactique et de la pédagogie d'une part, du game design (écriture vidéoludique) d'autre part, se sont jusqu'ici le plus souvent ignorées.

De nombreux serious games pour la formation (learning games) sont essentiellement faits avec des technologies de type Flash (2D) et sont peu interactifs. La réalité virtuelle est donc un outil intéressant pour pouvoir construire un serious game puisqu'elle apporte un haut niveau interactif entre l'homme et l'environnement. Cette interactivité augmente la difficulté à contrôler les activités ludiques comme pédagogiques. Aujourd'hui, de nombreux concepteurs d'environnements virtuels « *surfent sur la vague* » de la mode du serious game et caractérisent facilement comme serious games des environnements virtuels pour la formation et ce sans qu'il n'y ait aucune réflexion sur les aspects ludiques. S'il est vrai qu'indirectement certains jeux sans intention pédagogique, permettent d'apprendre certains concepts et si certaines simulations/environnements conçus sans intention pédagogique présentent un caractère ludique, théoriquement, un serious game présente une **dimension/intention** « ludique » et une finalité « sérieuse » explicitement souhaitées par le **concepteur**. Toutefois, la question qui nous préocupe est bien comme le souligne [Portugal, 2010] : « *comment apprendre à fondre de véritables instruments pédagogiques dans de véritables mécanismes de gameplay, sans dénaturer les seconds ni prétendre qu'ils suffisent à remplir le rôle des premiers ?* ».

2.3.3.3 Facteurs de motivation dans les serious games

Certains auteurs pensent qu'il ne s'agit pas de donner à l'apprenant « *l'impression d'apprendre en jouant* » *en conférant à des interfaces d'apprentissage de type classique un air ludique, comme c'est le cas la plupart du temps, mais que l'on pourrait plutôt envisager des situations dans lesquelles l'apprentissage visé deviendrait le moyen par lequel il serait possible d'entrer et de progresser dans le jeu* » [Frété, 2002].

Les facteurs de motivations peuvent être classés en deux approches : les facteurs intrinsèques et les facteurs extrinsèques. L'approche **extrinsèque** sépare les aspects « sérieux » et les aspects « ludiques » (alternance de phases ludiques et sérieuses). Les motivateurs extrinsèques sont extérieurs à la personne (obtenir de l'argent, des compliments, éviter des conséquences négatives). Le jeu est utilisé comme « récompense » suite à la compréhension du contenu sérieux [Djaouti, 2011]. L'approche **intrinsèque**

vise à fusionner les aspects ludiques et sérieux. Les contenus sérieux sont intégrés aux mécanismes de jeu. La réussite au jeu découle directement de la compréhension du contenu sérieux [Djaouti, 2011]. Les motivateurs intrinsèques viennent de l'intérieur de la personne (intérêt personnel, curiosité, satisfaction). « *Les théories béhavioristes avaient plutôt tendance à se concentrer sur la motivation extrinsèque et à faire des récompenses le «motivateur» le plus important. Les théories cognitives s'attachent plutôt à rechercher la manière de provoquer chez l'apprenant une motivation intrinsèque* » [Frété, 2002]. [Malone et Lepper, 1987], qui se sont intéressés à la motivation dans le jeu dans un contexte d'apprentissage, affirment que la motivation est intrinsèque par nature, ce qui veut dire qu'on s'engage dans un jeu pour le jeu et non pas pour recevoir une récompense externe. [Bruckman, 1999] critique ouvertement l'approche « extrinsèque » et suggère de placer l'apprentissage au cœur de l'activité ludique.

L'**impact émotionnel** est un facteur important. Les joueurs peuvent ressentir toute une palette d'émotions dans un environnement sécurisé et contrôlé. Les émotions vécues peuvent varier : joie, empathie, colère, frustration, triomphe, etc. Cette succession d'émotions tend à maintenir les joueurs en immersion. « *De plus, des études ont montré que les émotions peuvent aider au processus de mémorisation, surtout si le contenu émotionnel ou le ton employé dans les ressources pédagogiques correspondent aux émotions de l'apprenant* » [Felicia, 2009]. Les jeux électroniques peuvent renforcer la confiance des joueurs en maintenant la réussite à leur portée, en s'assurant que la difficulté est adaptée à leurs compétences et en effectuant des bilans de compétences. Le concept de « ***Flow*** » qualifie le moment où le défi dans le jeu est à son maximum. Le flow c'est le moment où le joueur est tellement immergé dans le jeu qu'il en oublie le temps, la fatigue, tout ce qui l'entoure. Le Flow relève des compétences de l'individu et du challenge pour pouvoir atteindre le but fixé.

2.4 Scénarisation dynamique des situations d'apprentissage

Après avoir vu les facteurs d'apprentissage et de motivation dans les environnements virtuels pour l'apprentissage humain, nous allons nous intéresser à la scénarisation de ces différents éléments.

2.4.1 Définitions

Dans le cadre des environnements virtuels, le mot *scénario* peut être utilisé pour désigner des concepts très différents :

1. Le « **scénario** » qui régit le comportement de l'environnement virtuel et le **contrôle des actions de l'utilisateur** ;
2. Le **scénario au sens cinématographique/jeu vidéo**. Le scénario peut alors désigner à la fois le ***screenplay***, i.e. la spécification des événements et actions ayant lieu dans l'environnement virtuel (techniques du récit interactif), et le ***shooting script***, qui décrit la façon dont ceux-ci sont mis en scène (décor, caméras, etc.) ;
3. Le **scénario relatif aux aspects pédagogiques.** Dans ce domaine, il existe de nombreuses tentatives de définitions des termes *scénario* et *scénarisation* qui ne sont pas toujours claires. On trouvera un état de l'art très complet sur ces aspects dans [Emin, 2010]. [Lejeune et Pernin, 2004] distinguent :
    a. **Le scénario pédagogique** est défini comme le résultat du processus de conception des activités d'apprentissage. La scénarisation pédagogique consiste à définir les objectifs, la planification des activités d'apprentissage, les ressources pédagogiques, la description des tâches des apprenants, les modalités d'évaluation, les interactions entre les acteurs, les éléments à observer, etc. Les modèles de scénarios pédagogiques peuvent ne pas prendre en charge les dimensions épistémiques ;
    b. Le **scénario d'apprentissage** représente la description, effectuée a priori (prévue) ou a posteriori (constatée), du déroulement d'une situation d'apprentissage ou unité d'apprentissage visant l'appropriation d'un ensemble précis de connaissances, en précisant les rôles, les activités ainsi que les ressources de manipulation de connaissances, outils nécessaires à la mise en œuvre des activités [Pernin, 2003].

Nous avons déjà décrit le contrôle des actions de l'utilisateur (chapitre II.4), nous allons maintenant nous intéresser au scénario pédagogique et au scénario dans les serious games et dans le récit interactif.

2.4.2 Scénario pédagogique

2.4.2.1 Modélisation pédagogique

Depuis le début des années 2000, des **langages de modélisation pédagogique (**EMLs), initiés par [Koper, 2001] permettent de fournir des modèles adaptés à la conception pédagogique d'unités d'apprentissage diversifiées. Ces propositions sont centrées **activité**. Une activité se définit comme une tâche avec un objectif pédagogique précis ; elle est effectuée par un certain nombre de personnes qui tiennent différents rôles (enseignants, tuteurs, etc.) dans un certain environnement et en s'appuyant sur un certain nombre de ressources pédagogiques [Pernin, 2003]. Les ressources sont décrites par le type d'activité et non par le type de connaissance et de situation d'apprentissage auxquelles elles peuvent être associées. Les travaux de Koper sur EML ont servi de base à la création de la norme IMS-Learning Design (IMS-LD) [Koper et al., 2003]. Le méta-modèle de LD organise une unité d'apprentissage selon une métaphore théâtrale en actes, par défaut séquentiels, dans lesquels des rôles sont distribués aux acteurs impliqués, lesquels rôles déterminent les tâches de ces acteurs et les ressources dont ils disposeront pour les effectuer. L'enchaînement des activités est prédéfini (séquence/parallélisme) et peut être dynamisé par le déclenchement de règles conditionnelles, également prédéfinies, dont l'évaluation est déclenchée par des événements (ex : réponse particulière d'un apprenant à un QCM, score atteint lors d'une évaluation, temps écoulé depuis le démarrage d'une activité, etc.) [Lejeune, 2004]. IMS-LD fournit un « *cadre méthodologique de modélisation d'une Unité d'Apprentissage et vise à proposer un compromis entre d'une part la neutralité permettant la mise en oeuvre d'approches pédagogiques variées et d'autre part la puissance d'expression permettant la conception précise d'une situation d'apprentissage* » [Pernin et Lejeune, 2004].

De nombreux auteurs considèrent IMS-LD, peu flexible et peu utilisable car il n'a pas été pensé pour des environnements orientés processus de résolution de problème ou centrés sur la personnalisation des interactions. Pour pallier ces limites, certains auteurs ont proposé des EML capables de supporter la personnalisation des interactions. [Nodenot, 2005] propose CPM (Cooperative Problem-based learning Metamodel), un méta-modèle basé sur l'ingénierie dirigée par les modèles. S'appuyant sur la syntaxe de UML (Unified Modeling Language), la sémantique est représentée par des contraintes OCL (Object Constraints Language). Contrairement à IMS-LD, CPM ne vise pas à décrire tout type de situation pédagogique mais a vocation à représenter des situations-problèmes coopératives.

La majorité des exemples illustrant l'utilisation des EML se concentre sur la scénarisation d'unités d'apprentissage de granularité « moyenne » (organisation de différentes activités). D'autres travaux, tels que ceux de [Guéraud *et al.* 2004] s'intéressent à décrire les scénarios à un niveau plus fin, celui de l'activité proprement dite. Il s'agit par exemple de modéliser l'utilisation d'un logiciel de simulation ou d'un micromonde au moyen d'un dispositif de contrôle précisant notamment les rétroactions à prévoir et le suivi de l'apprenant par un tuteur.

2.4.2.2 Scénario pédagogique en EVAH

Il existe peu de travaux sur la modélisation de scénarios pédagogiques ou de scénario d'apprentissage en environnement virtuel. On peut citer POSEIDON, un modèle de scénario pédagogique qui rend possible la description d'activités indépendamment du type de tâche ou du domaine d'apprentissage [Marion, 2010]. Inspiré en partie du langage IMS-LD, POSEIDON permet de décrire trois aspects des scénarios pédagogiques : les environnements, l'organisation pédagogique et les activités pédagogiques. Ces scénarios pédagogiques sont décrits de manière fine et lient des erreurs, identifiées au préalable, à un ensemble de rétroactions (affichage d'un média, mise en valeur d'un objet, etc.). Cette approche concerne des couples « *action-réaction* », sans adaptation de la situation d'apprentissage à l'ensemble de l'activité de l'apprenant, via l'exploitation de ses traces par exemple.

2.4.2.3 Scénarisation des parcours d'apprentissage

D'après [Luengo, 2009], « *l'ingénierie didactique est un moyen d'orchestration des situations didactiques. Elle permet de dégager des contraintes pour la construction des parcours et donc la production des rétroactions épistémiques* ». Des théories existent pour guider la manière de scénariser ces situations. Par exemple, la théorie de la zone proximale de développement (ZPD) [Vygotsky, 1985], considère qu'il existe une distance entre concepts à apprendre et ceux déjà appris. La construction des parcours doit veiller à cette

distance. L'orchestration peut être réalisée par des systèmes adaptatifs ou intelligents. Les systèmes adaptatifs permettent de sélectionner les parcours adaptés dans un arbre de chemins initialement décrits par les concepteurs. Dans le cas des systèmes intelligents, c'est le système qui crée les parcours à partir de techniques d'intelligence artificielle comme les techniques de planification.

2.4.2.4 Planification des parcours d'apprentissage

Le problème de la création de parcours d'apprentissage automatique est, pour certains auteurs, un problème de type planification en intelligence artificielle. Lorsque toutes les situations sont connues et décrites, une technique de planification classique consiste à trouver les chemins optimaux à proposer à l'apprenant. Des heuristiques permettent d'explorer l'espace des situations possibles et de proposer des parcours optimaux. Ces heuristiques se fondent soit sur des critères d'optimisation (e.g. temps, parcours), soit sur les connaissances en jeu (e.g. déstabiliser les connaissances, vérifier les connaissances ou renforcer les connaissances) ou soit sur les situations d'apprentissage (situation d'actions, de formulation ou de validation [Luengo, 2009]). Dans les systèmes s'appuyant sur la théorie de la zone proximale de développement (ZPD) [Vygotsky, 1985], les heuristiques permettent de sélectionner un problème qui est dans cette zone. Certaines techniques s'appuient aussi sur des décompositions hiérarchiques type HTN (Active Math [Ullrich, 2007]) ou sur des données incertaines ([Eliot, 1996], [Muldner, 2007], ou encore [Luengo, 2009]).

Dans TELEOS, [Luengo, 2009], [Mufti-Alchawafa, 2008] proposent une planification gérant une incertitude bornée mais où les buts d'apprentissage ne sont pas explicitement représentés. La génération des parcours est déterminée par rapport au choix des situations d'apprentissage les plus pertinentes plus que par rapport aux buts d'apprentissage. Les auteurs considèrent un réseau de connaissance initial et proposent un algorithme de calcul de la similarité des variables didactiques entre deux problèmes. Un historique permet de ne pas proposer plusieurs fois les mêmes problèmes.

2.4.3 Scénario dans les serious game

Les serious games appliquent, au moins, de manière intrinsèque un certain nombre de concepts pédagogiques. Par exemple, les jeux électroniques comprennent généralement un degré élevé d'interaction, des objectifs spécifiques, une stimulation constante et un sens de l'engagement. Ces critères ont été associés à de bons environnements d'apprentissage par [Norman, 1993]. Dans une certaine mesure, les jeux électroniques sont compatibles avec toutes les approches développées (behavioriste, cognitiviste et constructiviste). Toutefois, alors que les anciens jeux éducatifs mettaient l'accent sur les deux premières théories, les jeux plus récents encouragent, en raison de leur complexité et de leur nature ouverte et coopérative, une approche constructiviste de l'apprentissage.

Un serious game doit se différencier d'une simulation. Une simulation tente de représenter fidèlement un phénomène réel sous une forme plus manipulable par l'ordinateur, alors qu'un jeu est une représentation artistique et simplifiée d'un phénomène. En effet, le concepteur d'une simulation cherche à simplifier le moins possible ce qu'il cherche à représenter alors que le concepteur de jeu cherche délibérément à diriger l'attention du joueur sur un aspect particulier de sa représentation qu'il jugera pertinent et important dans le contexte du jeu. « *Bien sûr, les buts des deux types de conceptions ne sont pas les mêmes mais peuvent néanmoins se rencontrer dans le cas où une simulation est conçue à des fins de formation* » [Frété, 2002]. Aussi, selon [Prensky, 2001] « *le réel peut vite devenir ennuyeux. On s'est aperçu, dans le secteur militaire en particulier, que des simulations extrêmement fidèles à la réalité provoquaient à la longue une baisse du niveau d'intérêt et ne rencontraient donc pas les objectifs d'apprentissage visés* ».

Ainsi, les serious games doivent intégrer et adapter les facteurs de motivation précédement cités en fonction de l'activité des apprenants. Là encore, la **zone proximale de développement (ZPD)** de [Vygotsky, 1985] est souvent citée pour maintenir un niveau de **challenge**. On peut ainsi faire le parallèle entre les apprenants et joueurs. Dans cette théorie, les apprenants doivent bénéficier tout d'abord d'aides, avant de devenir de plus en plus indépendants à mesure qu'ils progressent. Ce principe est également présent dans les jeux électroniques qui sont indulgents dans les premiers niveaux afin que les joueurs se familiarisent avec la mécanique du jeu. Les joueurs doivent acquérir de nouvelles compétences pour gagner et, être responsable de leur progression.

S'appuyant sur le principe des situations-problèmes, les jeux sérieux suivent souvent une courbe de

difficulté (Figure 38) : à chaque instant, le niveau de compétence du joueur lui permet, en faisant preuve de déduction ou d'agilité, de faire face à la difficulté courante. Lorsqu'il la surmonte, il acquiert un nouveau savoir et un nouveau niveau de difficulté, l'oblige à se dépasser.

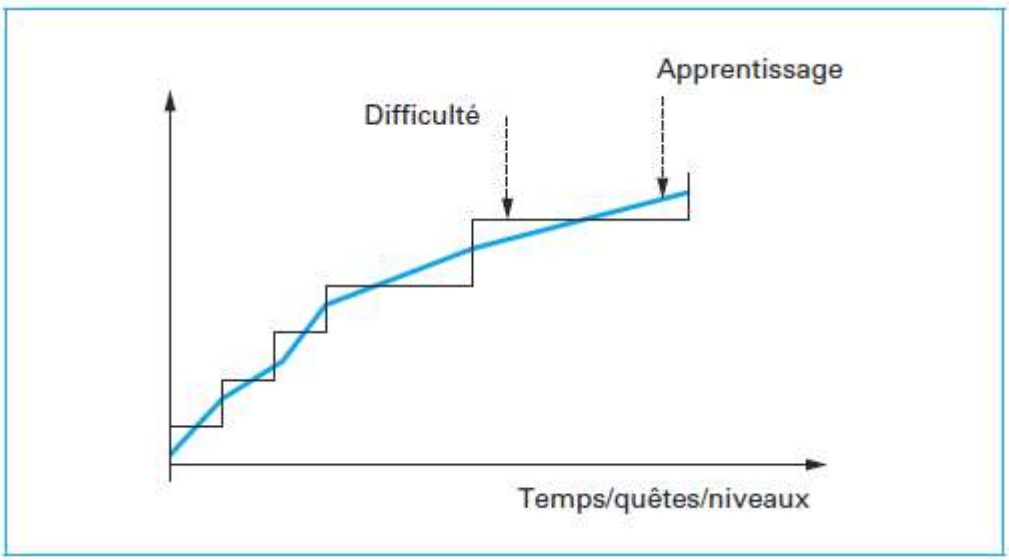


Figure 38: courbe dite d'apprentissage et de difficulté (extrait de [Natkin, 2009])

Dans la suite, nous allons nous intéresser plus particulièrement aux jeux vidéo narratifs et au récit interactif.

2.4.4 Jeu vidéo narratif et récit interactif (Interactive Storytelling)

La frontière entre le récit interactif et le jeu vidéo est parfois mince. Certains jeux vidéo n'ont pas d'histoire et certains récits interactifs ne sont pas considérés comme des jeux. Ici, nous nous intéressons plus particulièrement à ceux qui possèdent une **histoire** (suite chronologique des événements) et un **récit** (la manière dont ils sont exposés/découverts) indépendamment du fait que ce soit des jeux vidéo (narratifs), des serious games ou des récits interactifs. Après avoir présenté les différents types de récit, nous présenterons plus précisément comment les travaux dans le domaine du récit interactif s'intéressent aux aspects formation et à l'intégration de personnages virtuels cognitifs.

2.4.4.1 Histoire et récit dans les jeux vidéo narratifs et récit interactif

[Genvo, 2005] propose une catégorisation des types de récit dans le jeu vidéo narratif, que l'on peut rapprocher de la catégorisation proposée par [Jenkins, 2003] pour le jeu vidéo ou encore de celle de [Delmas, 2009] pour le récit interactif. Ainsi, on peut distinguer deux types de récit :

- L'histoire est une suite d'événements prédéfinis par avance, qui constituent des passages obligés pour le joueur. La façon dont le joueur découvrira ces événements constituera le récit de cette histoire. Le récit/jeu est centrée sur l'histoire. Dans le récit interactif, certains auteurs parlent d' « ***approche orientée scénario*** ». [Genvo, 2005] propose une catégorisation de ces différents types de narration (narration topographique, multifocalisée, etc.) ;
- L'histoire est générée par les actions du joueur, rendant égal temps du récit et temps de l'histoire. L'histoire est une composante du récit/jeu. On parle alors de narration algorithmique ou autogénérative (e.g. les Sims, Counter Strike). Dans le récit interactif, certains auteurs parlent d'« ***approche émergente*** ».

2.4.4.2 Approches orientées scénario

Dans les approches orientées scénario, on trouve généralement les mêmes étapes que dans le récit écrit (une situation initiale, un élément perturbateur, des péripéties, une résolution et une situation finale). Le récit est parfois découpé en actes, généralement trois actes, comme pour une pièce de théâtre. Dans l'acte 1, c'est l'exposition de la situation (découverte des personnages, de la situation, de la tâche à accomplir). Dans l'acte 2, c'est le développement de l'intrigue (épreuves, ennemies, performance). Enfin, dans l'acte 3, c'est la résolution du problème principal [Kerbrat, 2005]. Le récit suit une courbe

d'intensité dramatique croissante passant par des points clés (plot-point) pour relancer l'histoire allant jusqu'au climax (point culminant de l'intensité dramatique) [Kerbrat, 2005] (Figure 39).

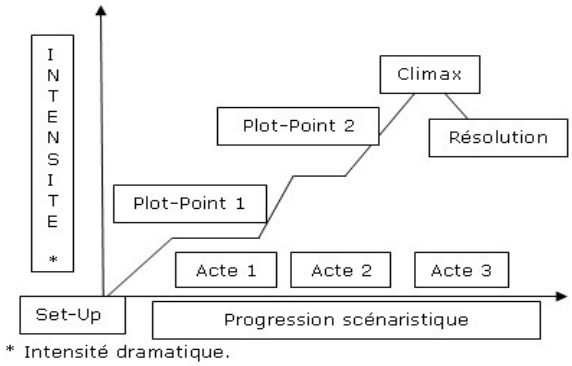


Figure 39 : Progression scénaristique et intensité dramatique selon [Kerbrat, 2005]

Parmi les « ***approches orientées scénario*** », on peut, entre autres, citer **Mimesis** [Young, Riedl *et al.*, 2004], **Façade** [Mateas, 2002], **IDA** (Interactive Drama Architecture) [Magerko et Laird, 2003].

Les « ***approches orientées scénario*** » consistent à assurer la cohésion globale du scénario. La limite de ce type d'approches est que le joueur est contraint de suivre le déroulement prévu du récit.

2.4.4.3 Approches émergentes

Les « ***approches émergentes*** » ont l'avantage d'offrir une plus grande liberté d'action que les « *approches orientées scénario* ». Parmi ces approches, on peut, entre autres, citer les travaux menés à l'**Intelligent Virtual Environment de l'Université de Teeside** (e.g. [Cavazza *et al.*, 2002]). Les acteurs ont des objectifs à remplir et leur système de planification détermine les plans pour y parvenir. Les acteurs peuvent corriger ces plans en cours d'exécution pour gérer des situations imprévues. Grâce à des réseaux de tâches hiérarchisées (HTN, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), il est possible de remettre en cause, partiellement ou complètement des plans s'ils deviennent invalides suite à un événement interne ou externe. Le système replanifie pour trouver d'autres comportements permettant de maintenir les objectifs.

Dans ce type d'approche, le récit est une conséquence directe de l'interaction du joueur mais il manque une structure de contrôle ce qui rend difficile toute validation structurelle du récit. « *La narration émergente se prive de la capacité de valider les récits générés, et donc d'assurer la qualité de l'expérience narrative offerte à l'utilisateur. Il peut donc en résulter la génération d'un ensemble de récits pauvres en contenu, au déroulement bancal, ou manquant de rythme ou de structure* » [Delmas, 2009].

2.4.4.4 Récit interactif pour la formation

Les travaux sur le récit interactif s'intéressent essentiellement à la génération de fiction interactive. Peu sont à visées pédagogiques. On parle essentiellement de contrôle de récit et peu de contrôle de l'apprentissage. Toutefois, on peut faire le parallèle avec l'apprentissage en rapprochant, d'un côté les « ***approches orientées scénario*** » qui garantissent l'histoire et les **systèmes pour l'apprentissage contraints** qui garantissent un apprentissage mais laissent peu de liberté d'action à l'apprenant et, de l'autre côté, les « ***approches émergentes*** » qui ne garantissent pas une cohérence du scénario et les **systèmes pour l'apprentissage peu contraints** qui laissent une grande liberté d'action mais ne garantisse pas un apprentissage donné.

Certains chercheurs se sont intéressés au couplage entre des tuteurs intelligents (ITS) et des techniques de récit interactif, par exemple l'Interactive Story Architecture for Training (**ISAT**) [Magerko *et al.*, 2005], [Mateas, 2010] basés sur des réseaux de tâches hiérarchiques (HTN) et sur des approches par contraintes, l'**Automated Story Director** de [Riedl *et al.*, 2008].

2.4.4.5 Récit interactif et personnages cognitifs

Dans les « ***approches orientées scénario*** », il est difficile de peupler les environnements virtuels avec des personnages virtuels très autonomes, et qui plus est, hautement cognitifs, car leur comportement doit essentiellement être guidé par le scénario et non par leur objectifs internes. Dans les approches

« *narration émergente* », pour pouvoir offrir une grande liberté d'action à l'utilisateur et ne pas avoir à prévoir tous les cas possibles, les personnages sont dotés d'autonomie. Ils sont semi-autonomes voire autonomes. Ils peuvent être aussi dotés de comportements cognitifs (e.g. personnalité, émotions, etc.).

Parmi les travaux sur les personnages cognitifs dans le récit interactif, on peut citer : **Thespian** [Si, Marsella *et al.*, 2005], **IDA** [Magerko et Laird, 2004], les travaux de **[Mateas, 2010]** et de **[Niehaus et Riedl, 2011],** les travaux de **J. Porteous et X. Cavazza** à l'Intelligent Virtual Environments (IVE) proposent quant à eux des personnages totalement autonomes et des techniques de planification hiérarchique [Porteous et al., 2009], [Porteous et al., 2010] (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

2.4.5 Conclusion

Selon les travaux, comme nous venons de le voir, le « *scénario* » peut désigner des concepts assez différents. Dans [Barot *et al.*, 2012], nous proposons une généralisation, ainsi le « *scénario* » peut selon les cas :

- Désigner une séquence linéaire, un graphe multi-linéaire, un ensemble de contraintes, d'événements partiellement ordonnés, etc. ;
- Etre défini de manière explicite ou implicite ;
- Etre traité comme un ensemble de possibles ou comme un fil-rouge dont il faut éviter de s'écarter.

Pour nous, un scénario est un déroulement spécifique des événements de l'environnement virtuel. Au niveau formel, un scénario est donc défini comme une séquence d'événements marqués temporellement. La scénarisation consiste donc à définir un espace de scénarios.

3 Positionnement de nos approches

Dans un premier temps, dans le cadre d'une approche plutôt cognitiviste, nous avons travaillé sur l'adaptation de rétroactions en environnement virtuel relativement contraint pour des apprenants-novices avec le tuteur intelligent HAL (Help Agent for Learning). Nous nous sommes ensuite intéressés à la génération de traces (projet APLG). Puis, nous nous sommes orientés vers des approches centrées sur la visualisation des conséquences des erreurs pour favoriser des apprentissages par essais-erreurs. Ainsi, dans le cadre d'une approche constructiviste, nous avons proposé, avec Kahina Amokrane, HERA un système de suivi de l'apprenant de scénarisation adaptative des risques. Enfin, avec Camille Barot et Kevin Carpentier, nous travaillons sur le système de scénarisation SELDON pour scénariser le comportement de personnages virtuels autonomes capables de favoriser un apprentissage situé.

3.1 Approches adaptation de rétroactions et traces : exploitation des fonctionnalités de la réalité virtuelle

Dans cette partie nous allons présenter les approches 1) génération adaptative de rétroactions exploitant les fonctionnalités de la réalité virtuelle et 2) la génération de traces.

3.1.1 Approche génaration adaptative de rétroactions (HAL)

3.1.1.1 Objectifs et motivations

Comme nous l'avons expliqué, dans les années 90s, forts des premiers pas prometteurs de la réalité virtuelle, les chercheurs se sont intéressés à la problématique de la formation. L'hypothèse était que pour apprendre une tâche, il fallait reproduire au plus près de la réalité la tâche et son environnement. Nos premiers travaux dans ce domaine avec D. Mellet d'Huart et J.M Burkhardt ont permis de mettre en évidence que les situations d'apprentissage pouvaient/devaient différer des situations/tâches réelles [Mellet d'Huart. Nous avons travaillé sur les notions de réalisme et de fidélité perceptive (chapitre IV.2.3.2). A partir de ces notions, nous nous sommes intéressés à une méthodologie pour la conception d'environnements virtuels pour l'apprentissage (e.g. immersion et interaction).

Nous allons présenter la place du formateur et de l'environnement virtuel dans la formation pour comprendre comment nous avons été amené à concevoir le tuteur intelligent HAL pour permettre la scénarisation des situations d'apprentissage et des assistances pédagogiques. L'idée était de pouvoir

aider le formateur à exploiter les fonctionnalités offertes par la réalité virtuelle.

Place du formateur

La conception d'environnements virtuels pour l'apprentissage ne doit pas simplement se préoccuper de l'immersion et de l'interaction de l'apprenant. Le rôle du formateur est primordial dans une formation. Nous nous sommes attachés à la construction de situations d'apprentissage pertinentes et à étudier la manière dont elles doivent être menées par le formateur. Nous nous sommes intéressés aux stratégies pédagogiques efficaces et à la manière dont les formateurs les utilisent. Les formateurs ont des stratégies pédagogiques différentes selon leur style pédagogique (compétences, état d'esprit, etc.). Ils ne gèrent pas les situations de la même manière et n'apportent pas le même type de connaissances. Leurs stratégies dépendent aussi fortement du type d'erreurs commises par les apprenants et de leurs besoins. Les phases de briefing et debriefing animées par les formateurs ont un rôle essentiel pour la construction des connaissances et des compétences par les apprenants. Ces phases permettent notamment aux formateurs d'aider les apprenants à faire le lien entre le réel et le virtuel puis entre le virtuel et le réel. En effet, le formateur peut mettre en évidence les différences entre les situations virtuelles et celles auxquelles les apprenants seront confrontés en réel (e.g. dangers réels, effort plus important à fournir, situation rare, etc.). Le formateur doit aussi expliquer le rôle du simulateur par rapport à la réalité et pourquoi il est utile et nécessaire. Un apprentissage sans formateur peut conduire à des conclusions fausses et à la répétition de comportements inappropriés. Il est donc indispensable d'inclure le formateur dans la boucle de conception et de proposer un outil lui permettant de mener des stratégies adéquates. L'hypothèse selon laquelle les apprenants acquièrent seuls la bonne stratégie semble trop onéreuse et un guidage semble préférable. Le rôle du formateur peut être influencé par la stratégie et la politique générale de formation de l'entreprise.

Place de l'environnement virtuel dans la formation

« *Souvent négligée, l'anticipation des usages et de la façon dont un environnement virtuel pour l'apprentissage s'intègrera dans un contexte particulier, touche un équilibre fragile dans lequel des facteurs d'organisation, de coûts, de progression, et de facteurs humains interagissent en permanence. L'intégration d'un environnement virtuel pour l'apprentissage dans un contexte final (éducatif, formations professionnelles) requiert de connaître les différents composants du contexte (aspects organisationnels, humains, matériels) et leur plasticité respective afin de les changer suffisamment pour que le nouveau dispositif y trouve une place effective. Cela peut conduire à à des adaptations pédagogiques, à des modifications du rôle du formateur, etc. La généralisation de l'usage en environnement virtuel pour l'apprentissage à grande échelle générera elle aussi des difficultés particulières difficiles qu'il convient d'anticiper* » [Mellet d'Huart, 2004]

L'intégration des séances de formation sur simulateur est une question que l'ingénierie de formation doit se poser (e.g. alternance cours théoriques, vidéos, simulateurs, etc.). Des recherches sont ainsi menées sur la scénarisation pédagogique et sur l'orchestration automatique des situations d'apprentissage et de sessions différentes sur simulateurs (voir chapitre IV.2.4.2.). Nos travaux se sont essentiellement focalisés sur la scénarisation des situations d'apprentissage au cours d'une seule et même session d'exploitation de l'environnement virtuel.

3.1.1.2 Positionnement

Inspirés par l'agent pédagogique STEVE, nous souhaitions proposer une architecture informatique capable de mettre en oeuvre différentes stratégies/méthodes pédagogiques dans des environnements virtuels pour l'apprentissage de procédures professionnelles. Si STEVE était conçu pour des situations de tutorat (patron 1, IV.2.1.3), nous nous intéressions, ici, à des activités en groupe supervisée par un formateur (patron 3). Nous souhaitions donc proposer un système capable de fournir des traces et d'aider le formateur à tenir un discours pédagogique utile et à exploiter de manière optimale les fonctionnalités offertes par la réalité virtuelle (e.g. réification, affichage de concepts invisibles à l'œil nu, de guides virtuels, etc.). Nous avons alors proposé un tuteur intelligent capable de reconnaître l'activité des apprenants sur des procédures relativement simples, de détecter les comportements erronés, et de suggérer des rétroactions possibles pour amener les apprenants à prendre conscience de leurs comportements erronés voir à y remédier. L'idée principale était de pouvoir suggérer au formateur des rétroactions adaptatives selon ses préférences pédagogiques et selon le niveau de l'apprenant. Nous

avons donc proposé un modèle de tuteur intelligent non-incarné dont l'originalité portait sur la suggestion automatique de techniques de réalité virtuelle pour le discours pédagogique selon des règles pédagogiques et contextuelles.

L'application portait sur la formation des conducteurs de TGV aux procédures d'intervention sur les voies ferrées (projets SOFI et FIACRE [Lourdeaux, 2001], [David et Lourdeaux, 1998]).

3.1.1.3 L'approche HAL

Interventions pédagogiques

A partir d'analyses de l'activité des formateurs en situation réelle réalisées par Nadia Riguet [Riguet, 2000] et des travaux de [Samurçay et Pastré, 1995], avec Nadia Riguet, nous avons identifié que les formateurs intervenaient à différents **moments**, dans des **buts** différents et de **manières** différentes.

L'idée était de pouvoir analyser les stratégies pertinentes des formateurs en réel et voir comment les transposer en environnement virtuel. Il s'agissait aussi d'identifier les difficultés rencontrées dans leur discours pédagogique et de voir comment la réalité virtuelle leur permettrait d'y remédier en créant de nouvelles stratégies pédagogiques.

Les formateurs n'interviennent pas tous aux mêmes **moments**. Ils peuvent intervenir suite à des erreurs commises par l'apprenant (immédiate), avant les erreurs pour montrer des risques d'erreurs ou des dangers (en prévention), au moment où les apprenants verront les conséquences de leurs erreurs (différée), suite à des questions des formés, etc.

Les formateurs interviennent selon différents **buts**/intentions pédagogiques. Ils peuvent vouloir tester l'apprenant sur différents cas de scénario ou le guider. Nous avons alors distingué deux types de stratégies : les stratégies pédagogiques liées à la **modification du scénario** (**scénarisation adaptative**) et celles liées au **guidage**. Parmi les stratégies pour la **scénarisation adaptative**, nous avons proposé de scénariser la procédure nominale en ne générant pas de problème particulier, de faciliter l'activité de l'apprenant qui pourrait déjà être en difficulté avec la procédure principale en inhibant des problèmes prévus ou les résoudre, ou de perturber l'apprenant en introduisant des problèmes. Parmi les stratégies pédagogiques liées au guidage, nous avons identifié des stratégies distinctes selon les **méthodes pédagogiques** des formateurs (actives et explicatives principalement). Nous avons proposé des stratégies liées aux **intentions pédagogiques** :

- Parmi les méthodes actives, nous distinguons les intentions pédagogiques suivantes : laisser-faire, dire aux apprenants ce qu'ils doivent faire, faire à la place de l'apprenant, faire refaire à l'apprenant, encourager, perturber (en donnant des informations fausses) ;
- Parmi les méthodes explicatives, nous distinguons les intentions pédagogiques suivantes : suggérer ou montrer où les apprenants peuvent trouver les connaissances, montrer les conséquences des erreurs, expliquer les conséquences, suggérer ou montrer l'écart.

La **manière** d'intervenir correspond aux fonctionnalités de la réalité virtuelle, que nous appelons assistances pédagogiques (e.g. enrichissement, simplification, restriction, réification, etc.).

Architecture de HAL

Pour supporter ces interventions, nous avons proposé HAL, un tuteur intelligent capable de générer des interventions multi-modales (visuelles, sonores, kinesthésiques), adaptatives (selon les préférences pédagogiques du formateur, le niveau de l'apprenant et ses préférences perceptives sonores ou visuelles), semi-automatiques (i.e. suggestions au formateur) et personnalisées.

Suivant le schéma classique des tuteurs intelligents, HAL est composé d'un **modèle de l'apprenant**, d'un **modèle de référence** et d'un **modèle pédagogique** (Figure 40). Un module de diagnostic permet d'identifier l'activité de l'apprenant, de détecter ses écarts et de sélectionner les rétroactions adaptées, i.e. les stratégies (méthodes et intentions pédagogiques) et les assistances pédagogiques.

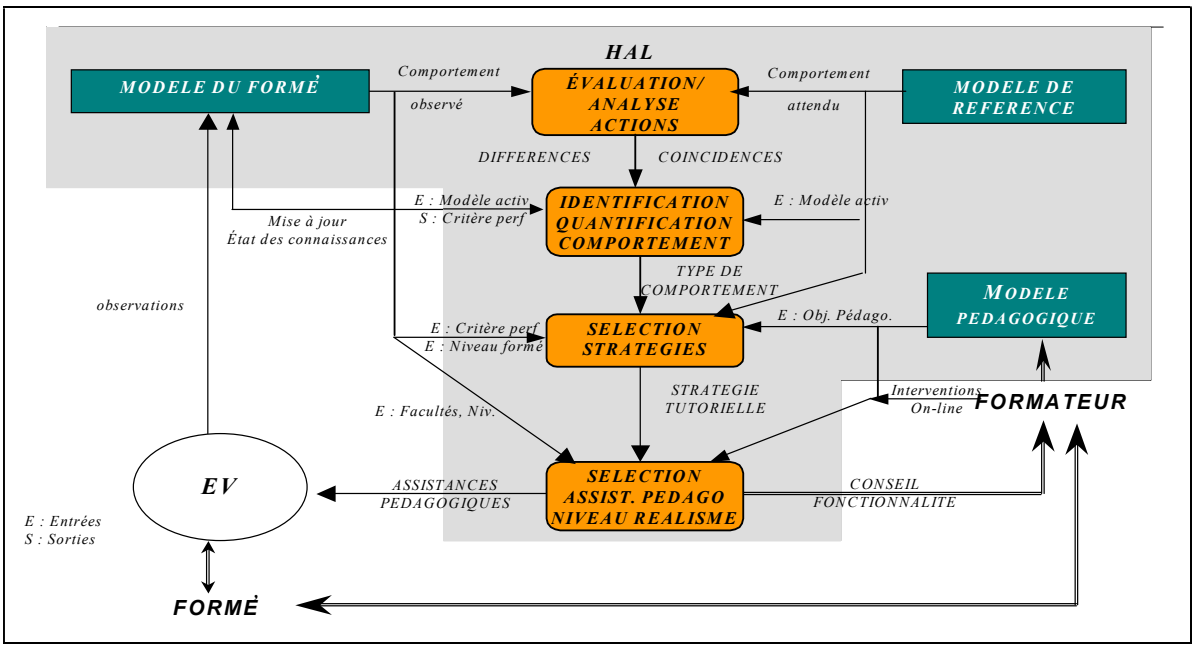


Figure 40 : Architecture de HAL

Le **modèle de l'apprenant** est composé des caractéristiques personnelles, historique et connaissances de l'apprenant. Les connaissances de l'apprenant sont comparées à un modèle **d'expertise partielle**, i.e. un modèle de la procédure idéale (du point de vue de l'expert) et à certaines erreurs typiques. Inspiré du modèle SRK de Rasmussen très utilisé à l'époque, nous avions décomposé chaque tâche et sous-tâche de la procédure en deux types de connaissances mises en jeu : les connaissances conceptuelles (niveau K) et les connaissances procédurales (niveau R). A chacune de ces connaissances sont associées des erreurs courantes. A chaque erreur sont associées différentes intentions pédagogiques, et à chaque intention, différentes assistances pédagogiques.

Les principales difficultés rencontrées par les apprenants dans l'environnement virtuel n'étaient pas des difficultés liées aux connaissances conceptuelles ou procédurales, mais des problèmes d'utilisabilité d'interface. Dans ce cadre, il était difficile de mesurer les performances des apprenants. Nous avions donc distingué les erreurs de connaissances et les erreurs d'utilisabilité d'interface.

Ces travaux s'intéressaient à la tâche experte comme modèle de référence et non pas à l'activité finalisée des conducteurs et les procédures à modéliser étaient très simples. Ainsi, nous avions proposé un formalisme simple permettant d'exprimer des tâches hiérarchiques et des ordonnancements de tâches basiques (OU exclusif et ET avec ordre déterminé).

Le **diagnostic des erreurs** était réalisé selon une approche générative identique à celle des tuteurs intelligents de première génération. La procédure et les erreurs répertoriées étaient générées à l'avance. Le système de diagnostic identifiait la tâche effective de l'apprenant, déterminait si cette tâche était la tâche attendue du point de vue de l'activité experte et/ou si l'activité correspondait à une erreur répertoriée (modèle d'expertise partielle/ overlay). Les erreurs détectées pouvaient être des sauts d'étapes, des inversions, des préconditions non-respectées, des mauvaises positions, etc.

Pour mettre en oeuvre différents discours et interventions pédagogiques, nous proposions au formateur de sélectionner la méthode pédagogique (active ou explicative) à l'initialisation ou en ligne. Puis, HAL sélectionnait les intentions et les assistances pédagogiques et les suggérait au formateur. La sélection était réalisée selon des règles pédagogiques prenant en compte la méthode pédagogique sélectionnée, le niveau de l'apprenant, le diagnostic de son comportement, son niveau de performance (critère de performance) et ses préférences perceptives (visuelles ou sonores).

3.1.1.4 Limites de HAL

Les travaux menés dans ma thèse avaient pour but de montrer l'intérêt d'un tuteur intelligent pour mettre en œuvre différents discours pédagogiques et simplifier le travail et l'appropriation de l'environnement virtuel par le formateur. Les principales **limites** de HAL étaient que :

- L'activité de référence était une activité experte idéale ;

- Le formalisme pour décrire l'activité ne permettait pas de décrire des activités complexes ;
- Le modèle du domaine n'était pas explicite ;
- Le niveau de contrainte était élevé pour la méthode pédagogique explicative. Dès que l'apprenant s'écartait de la procédure, une rétroaction était proposée systématiquement ;
- Toute solution non reconnue comme étant la bonne solution ou une erreur typique était considérée comme incorrecte ;
- Les connaissances de l'apprenant et les causes profondes de ses erreurs n'étaient pas gérés.

Par ailleurs, il est à noter que nous avions surtout travaillé sur les intentions pédagogiques liées à la méthode explicative et peu exploité la méthode active. Malgré, les limites citées ci-dessus, les potentialités offertes par HAL étaient nombreuses. Le travail sur la **sélection des assistances pédagogiques** et des interactions fortement contraintes a été repris et amélioré dans les travaux menés par [Buche, 2005], [Marion, 2010] et [Fricoteaux, Thouvenin *et al.*, 2011]. Nous avons poursuivi nos travaux sur une autre orientation des possibilités des tuteurs intelligents et favoriser des apprentissages par l'erreur à travers un degré d'interactivité moins contraint. L'idée était de permettre à l'apprenant de voir les conséquences de ses actions (immédiates ou différées) et d'exploiter des méthodes pédagogiques actives. Nous avons travaillé sur deux volets 1) la scénarisation adaptative et située pour des activités fortement complexes et 2) les traces pour permettre à l'apprenant des retours sur apprentissage et au formateur de suivre plusieurs apprenants. Nous avons alors proposé des modèles pour la représentation des connaissances et des moteurs de scénarisation.

3.1.2 Approche génration de traces (APLG)

3.1.2.1 Objectifs et motivations

Le projet APLG est né de l'idée de proposer un atelier générique pour permettre aux formateurs de créer des règles pédagogiques pour la scénarisation pédagogique et de générer les assistances pédagogiques adaptées. Les objectifs initiaux étaient de permettre aux formateurs de suivre l'activité des apprenants grâce à des traces sémantiques et d'exploiter au mieux les fonctionnalités de la réalité virtuelle pour tenir un discours pédagogique pertinent.

3.1.2.2 Positionnement

Les trois **verrous** principaux traités dans ce projet devaient être 1) la difficulté à proposer des outils auteurs pour représenter l'activité des apprenants ; 2) la difficulté pour reconnaître l'activité effective de l'apprenant dans un environnement virtuel peu contraint et 3) le manque de formalisation reliée à des théories de l'apprentissage pour l'exploitation des fonctionnalités de la réalité virtuelle.

Toutefois, avec J.M. Burkhardt et N. El-Kechaï, nous avons été confrontés au premier verrou qui s'est avéré plus difficile que prévu. Commen expliqué au chapitre II.1.5, nous souhaitions étudier la possiblité d'utiliser un langage ergonomique pour décrire l'activité de référence de l'apprenant. A partir de cette idée N. El-Kechaï a proposé le modèle METISSE (chapitre II.1.4.1) et des algorithmes de reconnaissance de plans. Le troisième verrou n'a pas pu être traité.

3.1.2.3 L'approche APLG

Fonctionnalités génériques

Pour proposer un atelier générique, nous nous sommes intéressés à cinq types d'application, décrites dans [Lourdeaux, Burkhardt et Mellet d'Huart, 2006] : la formation des conducteurs de TGV à des interventions sur voies ferrées (FIACRE : SNCF), la formation au soudage (CS-WAVE : AFPA et CS), la formation au fraisage (VTT : AFPA), la formation à la conduite d'entretien (IVT : AFPA et Daesign) et la formation aux premiers secours (médecins urgentistes). Nous nous sommes aussi intéressés à différents types d'immersion et d'interaction sur moniteur PC (IVT), sur grand écran et tapis roulant (FIACRE), avec des *props*[8] (VTT et CS-WAVE) et en CAVE (avec Clarté).

[8] terme anglais signifiant accessoire en français

Reconnaissance de plan

La reconnaissance de plans proposée par N. El-Kechaï est de type « **Keyhole recognition** » et située dans une approche « **Partially-observable action sequence** ». La présence de « *trous* » est possible dans la séquence d'actions observables pour deux raisons non disjointes. La première est liée au type d'environnement dans lequel l'apprenant évolue et la seconde est liée au modèle de la tâche prescrite. « *Les environnements virtuels pour l'apprentissage humain sont des environnements ouverts dans lesquels un apprenant peut réaliser une multitude d'actions. Certaines de ces actions, bien qu'il est possible de les réaliser dans l'environnement, peuvent être à la fois sans rapport avec la tâche d'apprentissage et inintéressantes pour l'interprétation du comportement de l'apprenant. Il n'est donc pas intéressant de les considérer. En revanche, certaines actions peuvent ne pas être observables (considérées) mais produire des effets qui ont une influence sur la tâche à réaliser* » [Lourdeaux, Burkhardt, El-Kechaï, 2007]. Le lecteur intéressé par le module de reconnaissance de plan pourra se référer à la thèse de N. El-Kechaï [El-Kechaï, 2007].

Détection des erreurs

L'objectif principal des travaux de N. El-Kéchaï était de pouvoir inférer, de manière automatique, les ***mécanismes causaux*** (*génotypes*) qui peuvent expliquer l'occurrence des ***actions erronées*** (*phénotypes*) de l'apprenant. Ces informations sont pertinentes pour permettre au formateur de choisir des assistances adaptées. Ainsi N. El-Kéchaï propose une classification des erreurs inspirée de la méthode CREAM [Hollnagel, 1993] (III.2.3.6.2). En effet, cette classification est appropriée pour diverses raisons : 1) Le point de départ de l'analyse rétrospective de CREAM est le *phénotype*, ici obtenu par le mécanisme de reconnaissance de plans ; 2) CREAM ne fonctionne pas comme une « *boîte noire* » et fournit, après plusieurs itérations, les *génotypes* ou causes possibles qui peuvent expliquer la production du *phénotype*, mais plus encore les différents liens causaux possibles qui ont permis de remonter du phénotype aux génotypes ; 3) CREAM peut être appliquée à différents domaines et applications.

Les liens entre les groupes du *schéma de classification CREAM*, i.e. les liens *conséquences-antécédents*, sont considérés comme un ***graphe causal***. Dans ce graphe, les nœuds représentent les *antécédents* et les *conséquences* et les arcs représentent les *liens causaux*. [El-Kechaï, 2007] propose un système de détection des génotypes fondé sur la **théorie de l'évidence**.

La méthode CREAM pour la détection des phénotypes par le biais de la reconnaissance de plan nous paraît très pertinente et adaptée. Par contre, la détection des génotypes, même si la proposition informatique est très intéressante, paraît difficile à valider. En effet, il nous semble difficile de connaître les causes exactes des erreurs des apprenants par le biais d'un système informatique. Ainsi, nous avons choisi dans la suite de nos travaux de nous intéresser plus spécifiquement à la détection des phénotypes pour le suivi de l'apprenant et à l'exploitation des génotypes dans la génération de comportements de personnages virtuels autonomes (III.3.2.2.3).

3.2 Approche scénarisation adaptative et apprentissage par essai-erreur (visualisation des conséquences)

Comment nous l'avons expliqué, nos travaux visent à modéliser et scénariser l'activité humaine dans des environnements virtuels afin de permettre à l'apprenant de vivre des situations complexes pertinentes du point de vue des apprentissages et cohérentes du point de vue des contenus. Etre cofrontré à des situations complexes ne permet pas toujours de comprendre l'activité de l'apprenant ainsi, la modélisation de l'activité humaine doit aussi permettre de fournir des traces sémantiques pour des activités réflexives ou en en ligne. Dans le cadre de la thèse de Kahina Amokrane, co-encadrée avec J.P. Barthès, nous avons proposé HERA (Helpful agent for safEty leaRning in virtuAl environment), un agent capable d'adapter le scénario en fonction du contexte et de proposer des traces à l'apprenant et au formateur. Dans un premier temps, au cours de la thèse de K. Amokrane, nous avons proposé une scénarisation adaptative selon des niveaux d'apprenant et des traces génériques (i.e. des messages d'erreurs de haut niveau). Ces travaux ont été menés dans le cadre des projets PERF-RV2, V3S et FIANNA. Puis, lors de son postdoctorat dans le cadre du projet SIMADVF, nous avons proposé une scénarisation selon l'historique de l'apprenant et des traces plus spécifiques.

3.2.1 Scénarisation adaptative des risques et étayage

3.2.1.1 Objectifs et motivations

Nos travaux sur HERA visent à modéliser et scénariser l'activité humaine afin de permettre un apprentissage progressif vers des situations complexes et cohérentes. Contrairement à HAL, il s'agit ici de laisser l'apprenant plus libre d'expérimenter différentes stratégies et en observer les conséquences. Plutôt que de former à la procédure prescrite, nous visons à rendre compte de situations écologiques identifiées comme pertinentes par les analyses d'activité (ergonomie cognitive) et par les analyses de risques (approche MELISSA). Il s'agit alors d'adapter des éléments du scénario aux comportements de l'apprenant en cohérence avec ces situations observées et avec le fonctionnement attendu du système. Contrairement aux applications traitées précédemment, nous souhaitions des problèmes de formation sur des procédures beaucoup plus complexes impliquant des aspects organisationnels, techniques et humains. C'est pourquoi, nous nous sommes intéressés à la formation à la prévention des risques sur des sites à haut risque. Ainsi, la formation dans de tels environnements scénarisés doit pouvoir 1) améliorer la compréhension des procédures et des équipements, 2) former aux bonnes pratiques dans des situations complexes, 3) améliorer les capacités d'analyses dans des systèmes évoluant rapidement et enfin 4) former à réagir vite et bien dans des situations complexes, critiques, urgentes et rares.

3.2.1.2 Positionnement

Notre approche se fonde sur trois notions l'étayage, la liberté d'action et un modèle pour décrire/supporter des situations écologiques, complexes et pertinentes.

Etayage

Pour favoriser les apprentissages, une notion importante est la notion d'aide pour construire ces apprentissages. [Burkhardt, 2010] souligne l'importance de la notion **d'étayage** (« scaffolling ») associée à la notion de **disparition progressive** (« fading »). « *L'étayage consiste à fournir, de différentes façons appropriées, un soutien temporaire aux besoins de l'apprenant vis-à-vis de la tâche, de l'interface et des outils, par le truchement du logiciel* ». Cette notion a été proposée par [Bruner, 1983] et rejoint la notion de zone proximale de développement (ZPD) proposée précédemment par [Vygotsky, 1985] (traduction de la version Russe de 1934). Pour [Jackson *et al.*, 1998], il existe différents niveaux d'étayage :

- l'**étayage de soutien** : suggestions, conseils, guidages, etc. sur la réalisation de la tâche ;
- l'**étayage réflexif** : concerne les moyens permettant d'amener l'apprenant à réfléchir sur sa tâche (e.g. explicitation de ses buts/décisions/compromis, de l'évaluation de sa progression, des conséquences ou encore de l'état qu'il anticipe après une action) ;
- l'**étayage intrinsèque** : concerne les modifications apportées à la tâche elle-même (e.g. réduction de la complexité et focalisation de l'attention sur les éléments significatifs, etc.).

L'étayage doit pouvoir s'effacer progressivement. Notre objectif, avec J.M. Burkhardt, a donc été de concevoir des mécanismes d'adaptation des situations d'apprentissage et « de *disparition progressive de l'étayage, de sorte à laisser progressivement à l'apprenant l'autonomie de l'action une fois les compétences nécessaires acquises* » [Burkhardt, 2010].

Degré de contrainte et complexité progressive

Nous l'avons vu, les systèmes fortement contraints avec des rétroactions immédiates ne permettent pas de faire des apprentissages par l'erreur et d'en observer leurs conséquences. A l'inverse, les systèmes faiblement contraints ne permettent pas de diriger et garantir les apprentissages. Nous souhaitons donc proposer des environnements hautement interactifs pour laisser l'apprenant apprendre en observant les conséquences de ses actions. Mais, afin de mieux favoriser ses apprentissages et permettre un apprentissage progressif, nous proposons un contrôle adaptatif de la complexité des situations et une orchestration des situations d'apprentissage progressives et contextualisées (étayage de soutien et étayage intrinsèque). Cette adaptation des situations doit se faire selon les traces d'activité de l'apprenant. Ainsi, les traces sont un élément essentiel pour la scénarisation comme pour les activités réflexives (étayage réflexif).

Modèle de l'activité humaine pour la scénarisation de situations écologiques, complexes et pertinentes

De nombreux modèles génériques pour décrire les situations en vue de la scénarisation ou d'un suivi de l'apprenant voient 1) ces situations comme des procédures prescrites non écologiques, 2) l'humain comme un automate suivant ces procédures et dès qu'il s'en écarte comme une erreur à corriger. Les modèles nécessitent bien souvent une description exhaustive de toutes les situations et peinent à fournir des moyens pour décrire une grande variété de cas et à favoriser l'émergence de situations.

Ainsi, notre hypothèse forte dans ces travaux est que fonder la scénarisation de l'environnement virtuel et le suivi de l'apprenant sur un couplage de trois modèles explicites (activité humaine, risques et domaine) permet de :

- S'adapter à différentes méthodes pédagogiques (actives comme explicatives) et différents guidages ;
- Supporter à différentes configurations (tutorat, exposé, groupe supervisé, autoformation) ;
- Proposer des environnements virtuels complexes et cohérents en regard des situations attendues (modèle de risques), des situations observées (modèles d'activité humaine) et du fonctionnement réel (modèle de domaine) ;
- Permettre de décrire différents modèles d'activité pour un même modèle de domaine et un même modèle de risques ;
- Rendre compte et former à des situations « écologiques » ;
- Proposer des environnements très interactifs en offrant un large possible d'actions et pas uniquement en se limitant à la procédure prescrite et ainsi permettre à l'apprenant d'explorer différentes manières de faire ;
- Adapter la complexité des situations à l'apprenant compte tenu de l'interprétation de ces modèles et des activités effectives de l'apprenant :
- Proposer des nuances dans l'interprétation des comportements de l'apprenant (s'écarter de la procédure prescrite n'est pas simplement à considérer comme une erreur) ;
- Proposer des traces sémantiques fines pour comprendre les causes-conséquences.

3.2.1.3 L'approche HERA

Pour proposer une scénarisation adaptative et supporter ces différentes propositions, les difficultés à résoudre sont 1) comment opérationnaliser les différents modèles (voir chapitre II) et 2) comment proposer une architecture capable d'interpréter ces modèles. Aussi, nous allons décrire le HERA, notre moteur décisionnel capable de 1) reconnaître l'activité de l'apprenant, 2) proposer des traces, 3) générer des rétroactions et 4) adapter les situations de manière progressive.

Architecture de HERA

HERA fait partie d'une architecture globale qui contient également l'environnement virtuel et le module d'environnement COLOMBO (Création Ontologique Liée à l'Organisation et la Modélisation des Objets) (Figure 19). HERA a pour but de suivre, étape par étape, l'avatar de l'apprenant dans l'environnement virtuel. Il exploite la trace signée transmise par le module d'environnement et génère la trace effective de l'apprenant (Learner traces) et des rétroactions.

HERA s'appuie principalement sur cinq modèles (activité, pédagogie, domaine, erreurs et risques) et cinq modules (reconnaissance, apprenant, pédagogique, risques et génération de traces) (Figure 41).

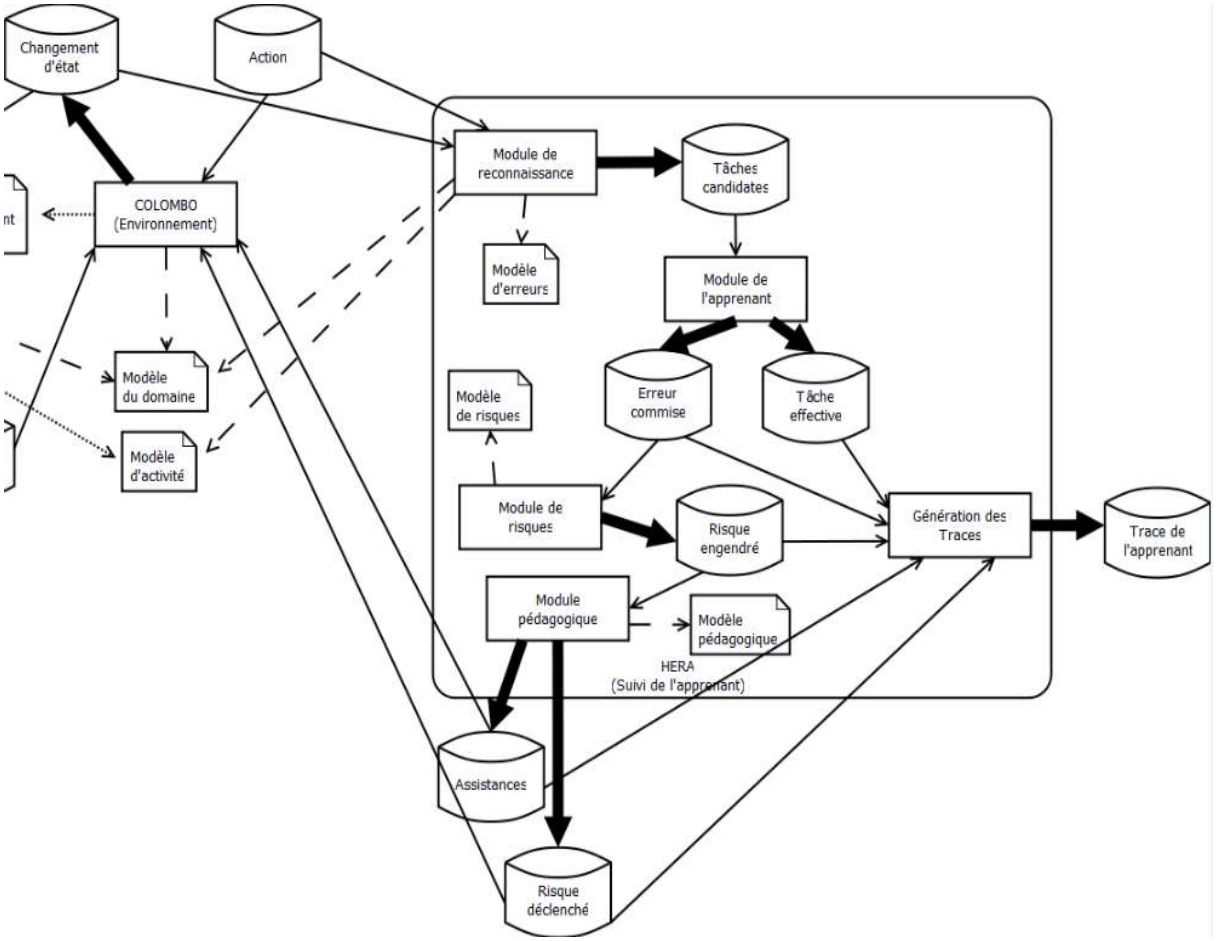


Figure 41 : Architecture de HERA

Modèles de HERA

Modèle d'activité comme modèle de référence (HAWAI-DL)

Nous avons déjà discuté des motivations qui nous ont amenés à proposer HAWAI-DL. Dans le cadre du diagnostic des erreurs de l'apprenant, outre le pouvoir de représentation des tâches, il s'agit de comparer l'activité effective de l'apprenant à l'activité possible et non à la tâche experte/prescrite. Souvent en EIAH, on parle de tâche experte, mais nous préférons parler de tâche prescrite car comme nous l'avons vu au chapitre II.2.2, la tâche experte est synonyme de comportements de compromis et s'écarte donc de la tâche prescrite.

L'idée est de pouvoir comparer l'activité de l'apprenant à un ensemble de possibles observés sur le terrain. En effet, les pratiques observées sur le terrain peuvent être éloignées des procédures prescrites par l'entreprise, et ce pour un tas de raisons (e.g. habitudes prises, détournement des procédures, procédures non adaptées, etc.). Une autre argumentation pour utiliser un modèle d'activité plutôt qu'un modèle de la tâche prescrite est que finalement, en formation, l'activité attendue d'un apprenant qui va permettre l'apprentissage est souvent éloignée de la tâche prescrite qui sera celle mise en œuvre lorsque l'apprenant aura acquis toutes les connaissances et les bonnes pratiques nécessaires. En effet, comme le préconise le cadre de la didactique professionnelle, s'appuyer sur un modèle d'activité est un moyen de favoriser la mise en relief des savoirs en actes nécessaires pour apprendre et de permettre une analyse plus fine du fonctionnement de l'apprenant en situation d'apprentissage et de manière encore plus pertinente de ses dysfonctionnements. Notre architecture supporte donc un modèle d'activité comme modèle de référence plutôt qu'un modèle de la tâche prescrite. HAWAI-DL permet d'exprimer ce type de modèle d'activité (chapitre II.1.5).

Modèle du domaine

Le modèle de domaine (décrit au chapitre II.4.4) permet de générer des événements perturbateurs et d'activer ou non les conséquences des actions de l'apprenant en lien avec le modèle de risques.

Modèle d'erreur

Comme nous l'avons vu précédemment, il existe plusieurs catégories de modèles d'erreur. Les modèles de [Rasmussen, 1983] et [Reason, 1990] sont adaptés pour la formation, dans le sens où ils permettent de savoir quelle connaissance (procédurale, empirique, etc.) est mise en cause lors d'une erreur. Le modèle de Rasmussen est d'ailleurs très utilisé dans les tuteurs intelligents. Il permet pour des apprentissages scolaires, de proposer des scénarisations pédagogiques pertinentes en renvoyant sur des parties de cours adaptées ou des exercices d'application. Toutefois, comme expliqué précédemment pour l'application de la méthode CREAM pour la détection des génotypes par N. El-Kéchaï, la détection des causes des erreurs est un problème difficile. S'il est en effet, utile de connaître les causes pour proposer une remédiation ou des rétroactions pertinentes et adaptées, l'utilisation de ce type de modèles est intéressante dans les tuteurs intelligents pour des approches cognitivistes.

Nous avons, ici, souhaité explorer une approche plus constructiviste Notre intention était de permettre à l'apprenant de visualiser les conséquences de ses actions tout en contrôlant ces conséquences et la scénarisation selon des règles pédagogiques. Nous avons donc opté pour le modèle d'erreur de la méthode CREAM d'Hollnagel et la partie phénotype [Hollnagel, 1993] proposée par [El-Kéchaï, 2007]. La détection des phénotypes simples, selon cette classification, nous permet alors de modifier les événements du scénario (e.g. perturbations, problèmes, visualisation des conséquences, etc.). Cette classification permet aussi de proposer des traces sémantiques pour expliquer les erreurs et leurs conséquences. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux phénotypes simples (inversion, omission, etc.). Cette classification est appropriée dans notre approche pour plusieurs raisons [Amokrane, 2010] : 1) elle est adaptée aux procédures professionnelles décrites sous forme de tâches hiérarchiques avec des contraintes d'ordre (séquentialité, parallélisme, simultanéité) et de temps (liens temporels entre étapes/actions ou durée), 2) l'identification des actions erronées faisant référence aux actions observables peut être systématisée, c'est-à-dire qu'elle peut être prise en charge par le système informatique en comparant l'activité effective au modèle d'activité de référence, 3) cette classification repose sur une variété importante d'actions erronées, recouvrant ainsi un grand nombre d'écarts possibles dans l'exécution d'une tâche et 4) ces actions erronées sont clairement décrites, ce qui facilite l'implémentation de cette classification.

L'utilisation du modèle HAWAI-DL nous permet de classifier plus finement les erreurs. Comme nous l'avons expliqué précédemment, nous distinguons erreurs et violations. Ainsi, une omission sur une tâche liée à la sécurité (ALU) est considérée comme une violation pour un expert alors qu'une omission sur un autre type de tâche est considérée comme une erreur. De la même manière que nous avons identifié plusieurs types de préconditions (eg. nomologiques, règlementaires, favorables), nous avons différencié les types d'écarts selon le type de préconditions ou de violations (pour les préconditions réglementaires). Etant donné que nous travaillons dans un contexte de co-activité, nous avons aussi ajouté des erreurs de rôles (e.g. l'agent fait une tâche qui n'est pas dans ses rôles). Enfin, nous avons ajouté des erreurs de point de vue. En effet, nous distinguons le fait de ne pas prendre en charge un événement parce qu'il n'a pas été vu du cas où l'apprenant l'a vu mais ne sait pas le traiter.

Modèle de risques

L'identification des situations d'apprentissage peut être, comme nous l'avons expliqué précédemment, réalisée dans le cadre de la théorie de la didactique professionnelle. Dans le cadre de formations sur des sites à haut risques, et notamment grâce à l'approche MELISSA (décrite au chapitre II.3.2.4), un autre point de vue permet d'identifier les situations d'apprentissage : l'analyse des risques et de la fiabilité humaine. Ce type d'analyse fait aussi intervenir l'analyse du travail développée en ergonomie cognitive. Il était donc intéressant de pouvoir croiser ces différents regards pour déterminer les situations d'apprentissage les plus pertinentes. Ainsi, ces analyses permettent de produire un modèle de risques rendant compte des liens de causalité et de probabilité d'occurrence des événements et des séquences accidentelles ainsi que des degré de confiance dans les barrières (voir chapitre II.3).

Modèle pédagogique

La complexité des situations d'apprentissage est adaptée selon :

- **L'expertise** de l'apprenant : e.g. un apprenant novice apidentiprendra peu si le site explose à la moindre erreur. Dans ce cas, il est préférable de l'arrêter, de lui expliquer les risques de son erreur et de ne pas en provoquer les conséquences. A contrario, un apprenant ayant déjà suivi plusieurs sessions pourra être confronté à des situations de plus en plus complexes, voire à des perturbations pouvant provoquer certains comportements à risques ;
- **L'activité** de l'apprenant : s'il commet des erreurs ou des violations, il est intéressant, selon son niveau, de lui faire prendre conscience des conséquences de ses erreurs ;
- Les **situations d'apprentissage** : selon les situations d'apprentissage choisies par le formateur et selon le niveau de l'apprenant, il est intéressant de ne montrer les conséquences de certaines décisions que sur ces situations d'apprentissage ;
- Les **probabilités** de risque et la confiance dans les barrières : la non-mise en place de barrières humaines peut entraîner un événement redouté (central ou secondaire) ou augmenter la probabilité de risque de cet événement.

Ainsi, à partir de ces éléments, nous avons identifié cinq cas que le formateur selon sa stratégie pédagogique pourra choisir :

1. L'apprenant est stoppé dès qu'il fait une erreur/violation qui pourrait engendrer un risque. Le système propose alors un étayage de soutien qui lui explique les conséquences de son comportement. Les explications peuvent être sous forme de texte (trace argumentée sur les conséquences), de critères de performances (e.g. risques, productivité, etc.) et d'assistances pédagogiques comme proposées dans HAL (e.g. enrichissement, réhaussement, simplifications, restriction, réification, etc.) (voir Figure 42). Ce cas peut être assimilé à un niveau « **novice** ». Dans les cas suivants, l'apprenant n'est pas arrêté et il n'a plus d'explications ni d'assistances ;
2. Si l'apprenant fait une erreur/violation en lien avec les situations d'apprentissage et si la probabilité de risque est élevée, alors il est possible de lui montrer les conséquences de ce comportement sinon les conséquences ne sont pas montrées. Ce cas peut être assimilé à un niveau « **intermédiaire novice** » ;
3. Si l'apprenant fait une erreur/violation en lien avec les situations d'apprentissage et même si la probabilité de risque est faible, alors il est possible de lui montrer les conséquences de son comportement, sinon les conséquences ne sont pas montrées. Ce cas peut être assimilé à un niveau « **intermédiaire** » ;
4. Si l'apprenant fait une erreur/violation même sans lien avec les situations d'apprentissage et même si la probabilité de risque est faible, alors il est possible de lui montrer les conséquences de son comportement. Ce cas peut être assimilé à un niveau « **intermédiaire expert** » ;
5. Les conséquences des comportements erronés sont montrés comme dans le cas 4 et des perturbations sont ajoutées pour distraire l'apprenant, provoquer des compromis, etc. Ce cas peut être assimilé à un niveau « **expert** ».



Figure 42 : Exemple de trace, d'assistances pédagogiques et de critères de performance produits par HERA

Les cas 2 à 4 correspondent à un étayage intrinsèque. Dans tous les cas, un étayage réflexif permet à l'apprenant de revenir sur ses apprentissages et de comprendre les conséquences de ses actions.

Pour les niveaux « *intermédiaire novice* » et « *intermédiaire* », le formateur peut sélectionner les situations d'apprentissage qu'il souhaite proposer à l'apprenant. A chaque situation d'apprentissage est associé un ensemble de variables didactiques qui sont des états du monde sur lesquels il est possible de jouer pour augmenter la difficulté des situations d'apprentissage. Dans le mode « *novice* », aucun problème n'est créé (e.g. *le ressort n'est pas usé*). Dans les modes « *novice intermédiaire* » et « *intermédiaire* », le formateur choisi off-line les situations d'apprentissage et les états du monde associés (e.g. *si le ressort est usé ou non*). Dans les modes « *intermédiaire expert* » et « *expert* » les états du monde sont automatiquement initialisés off-line en état problématique (e.g. *ressort usé*).

Lors de l'initialisation, le formateur peut choisir : 1) l'objectif de formation 2) le niveau de l'apprenant 3) les situations d'apprentissage et selon le niveau de l'apprenant 4) les variables didactiques.

Fonctionnement de HERA

Interface avec l'apprenant

Pour permettre à l'apprenant d'expérimenter différentes stratégies et de faire des erreurs, comme nous l'avons déjà expliqué au chapitre II.4.3, nous avons choisi de lui proposer des menus contextuels mais bruts où toutes les actions sur l'objet sélectionné sont possibles (e.g. si la porte est fermée, on lui propose tout de même de pouvoir la fermer). Ce choix permet, pour des actions plus subtiles, de ne pas lui suggérer l'action correcte.

Approche générative vs évaluative

Les activités traitées ici sont essentiellement des tâches procédurales, où l'ordre des tâches et des contrôles est primordial. Dans la plupart des approches **génératives** couplées à des modèles d'expertise partielle (overlay), le modèle de référence représente le modèle expert/idéal, i.e. comment l'expert traiterait idéalement le problème donné. Le modèle différentiel (overlay étendu) consiste à adjoindre à ce modèle idéal un catalogue d'erreurs typiques. Comme nous l'avons vu, ce type de modèles pose deux principaux problèmes : 1) lorsqu'une erreur est commise, le modèle ne donne pas d'indication sur sa cause profonde et lorsqu'il n'y a pas d'erreur, il n'est pas assuré que les connaissances soient réellement acquises et 2) toute action de l'apprenant non répertoriée comme idéale ou erreur typique est considérée comme erronée. Les approches **évaluatives** s'appuient sur un ensemble de contraintes et de contrôle à respecter pour effectuer une activité. Ce type d'approche répond en partie aux limites des approches génératives, mais le traitement du respect des procédures et de l'ordonnancement des actions sont alors difficiles à prendre en compte.

Nous l'avons déjà dit, nous ne nous plaçons pas dans une approche cognitiviste, i.e. nous ne cherchons pas à traquer les connaissances erronées et à y remédier. Ici, l'apprenant est le propre acteur de son apprentissage (approche constructiviste). C'est à lui de voir que dans une situation donnée, ses solutions sont erronées, d'en comprendre les causes et d'expérimenter d'autres solutions. Notre but est donc de détecter les actions erronées, de moduler leurs conséquences et de pouvoir les expliquer.

Dans ce cadre, une approche générative est suffisante pour le diagnostic des erreurs mais ne permet pas le déclenchement des conséquences ni leur explicitation. Nous avons donc proposé un couplage de ces deux approches en s'appuyant sur deux modèles : un modèle d'activité (faisant écho au modèle d'expertise partielle) et un modèle de risques (faisant écho aux modèles à base de contraintes).

Reconnaissance de plan

La **reconnaissance de plan** est un processus permettant d'inférer la tâche effective (réellement réalisée par l'apprenant) à partir des actions observables et des effets des actions non observables dans l'environnement virtuel. Généralement une reconnaissance de plan vise l'un des buts suivants : prédire le comportement futur de l'agent, interpréter son comportement passé ou bien générer des actions pour influencer l'agent. Dans notre cas d'étude, nous cherchons à interpréter le comportement passé de l'apprenant dans le but de déterminer sa tâche effectives et ses actions erronées, en se basant sur deux éléments présentés précédemment : le modèle d'activité décrit avec HAWAI-DL et la classification

d'erreurs. La reconnaissance de plans est adaptée de celle proposée par [El-Kechaï, 2007]. Ces adaptations concernent les propriétés spécifiques d'HAWAI-DL et les types d'erreur ajoutés.

Les premières étapes de la reconnaissance de plan permettent de proposer plusieurs plans candidats considérés comme réalisés par l'apprenant, ce qui représente l'espace d'hypothèses. Le principal défi de la reconnaissance de plan est la réduction de l'espace d'hypothèses c'est-à-dire réduire le nombre de plans candidats ou déterminer le plan réellement effectué par l'apprenant.

Classiquement pour la reconnaissance de plan, il existe deux types d'approche : les approches probabilistes, s'appuyant sur des modèles mathématiques tels que les réseaux bayésiens, et les approches formelles s'appuyant sur des heuristiques. Comme n'importe quel mécanisme de reconnaissance de plan, notre système propose plusieurs tâches candidates (nous parlons de tâches en conflit). Comment faire alors pour résoudre ce conflit et déterminer la tâche effective à partir des tâches candidates ? Quelle approche est la mieux adaptée (formelle ou probabiliste) ?

Notre modèle de référence est sous forme d'arbre. La même tâche peut se trouver à plusieurs endroits de l'arbre, il en résulte des situations de tâches en conflit. L'initialisation des probabilités, avec une approche probabiliste, serait difficile et fastidieuse. Nous nous sommes donc orientés sur le mécanisme formel et les heuristiques proposés par N. El-Kéchaï. Ces heuristiques se fondent principalement sur : l'avancement des tâches, les erreurs, l'état de la tâche concernant les tâches simples, l'état de satisfaction de leurs conditions, etc. Pour la résolution d'un conflit, un score est calculé pour chaque tâche en conflit en se basant sur l'ensemble des heuristiques, puis la tâche avec le score le plus élevé est prioritaire. Le lecteur intéressé pourra se référer à [Amokrane, 2010].

Adaptation du scénario

L'adaptation des situations d'apprentissage peut se faire sur des techniques d'orchestration des chemins classiquement utilisés pour la scénarisation pédagogique. Ces techniques sont souvent utilisées en EIAH, pour orchestrer des sessions (e.g. cours, exercices, simulateurs) ou en EVAH, pour fournir des assistances type méthode explicative pendant la session pour comprendre la situation en cours (e.g. réification, affichage de la procédure, etc.). Dans notre cas, nous nous situons au cours d'une situation et les rétroactions ne sont pas des assistances type méthode explicative mais des stratégies pour 1) amener l'apprenant vers des situations provoquant des réflexions et des apprentissages (e.g. complexité progressive, perturbations progressives) et 2) répondre aux actions de l'apprenant (e.g. visualisation des conséquences ou non, degré de gravité, etc.).

HERA peut modifier dynamiquement les changements d'états des objets et les événements du scénario : état ressort usé, état vanne ouverte, événement fuite, etc. Cette adaptation est réalisée en se basant sur le modèles d'activité, de risques, d'erreurs, pédagogique, de domaine. En particulier, le modèle de risques permet de connaître les risques plausibles identifiés par les analyses terrain et par rapport à des situations d'apprentissage pertinentes. Le modèle pédagogique permet de savoir quelles situations d'apprentissage (changements d'états et événements) sont pertinentes par rapport à l'activité de l'apprenant, son profil et les objectifs d'apprentissage. Le modèle de domaine permet de conserver une cohérence du fonctionnement du monde par le biais de règles causales : « *si le ressort est usé et que l'on n'accompagne pas la vanne, alors il y a une grosse fuite lorsque l'on retire le bras de chargement* ».

A chaque situation d'apprentissage est associé un ensemble d'états du monde selon le niveau de l'apprenant. Ces situations d'apprentissage et ces états du monde associés sont sélectionnés par le formateur off-line. L'adaptation effective du scénario et donc des situations d'apprentissage se fait selon les erreurs de l'apprenant et les probabilités de risques calculées on-line.

Génération des traces et des critères de performances

Comme nous l'avons expliqué, nous souhaitons fournir des **traces** dotées de sémantique et des **critères de performances.** Ces traces et critères vont permettre (Tableau 17) 1) aux apprenants d'avoir, éventuellement, des informations en en ligne sur leurs actions et de favoriser des activités réflexives (revoir, analyser, comprendre, comparer les résultats) et 2) au formateur de suivre pendant la session un ou plusieurs apprenants, d'être alerté si l'un des apprenants rencontre des difficultés et de revoir, analyser, synthétiser et débriefer avec les apprenants.

	Apprenants	Formateur
On-line	Uniquement pour les « novices » : • Etre informé des conséquences éventuelles de certaines actions • Voir ses critères de performances évoluer pour s'améliorer en cours de session	• Suivre un ou plusieurs apprenants • Etre alerté en cas de difficulté
Activités réflexives	• Revoir, analyser, comprendre • Comparer ses résultats, voir son évolution	• Revoir, analyser, comprendre, synthétiser • Débriefer

Tableau 17 : Traces et critères de performances à destination des apprenants/formateurs

K. Amokrane distingue deux types de traces : la trace brute exploitée par notre système appelée « **trace signée** » et la trace produite par notre système, utilisée par le formateur et les apprenants, décrivant les tâches correctes et erronées faites par l'apprenant, appelée « **trace d'activité** » [Amokrane, 2010]. Cette dernière doit être compréhensible par le formateur et par l'apprenant et interprétable par nos modules décisionnels. Ainsi pour garantir cette compréhension, nous proposons une expressivité de la trace d'activité en notant la tâche réalisée, son succès ou non, les erreurs éventuelles, les temps d'exécution, l'enchaînement des événements causes/effets et leur explication.

Au niveau des **critères de performances**, selon les applications, il doit être possible de déterminer les critères importants à restituer. Enfin, si certains critères sont communs à plusieurs applications (e.g. temps, organisation, erreurs), d'autres sont spécifiques. Par exemple, dans V3S/FIANNA, la sécurité est un critère très important, alors que dans PERF-RV2 (ronde préventive de maintenance), ce critère importe peu alors que la politesse est primordiale. Ainsi, pour chaque application, il est possible de définir des critères et de mettre un marqueur sur les tâches du modèle d'activité se rapportant à ces critères. Si l'apprenant fait une erreur sur une tâche marquée, le critère de performance associé diminue alors en même temps. Nous avons choisi de représenter ces critères avec un code couleur allant graduellement du vert au rouge selon les erreurs sur ce critère (e.g. vert tout va bien, rouge tout va mal) (Figure 44).



Figure 43 : Commentaires et critères à destination de l'apprenant

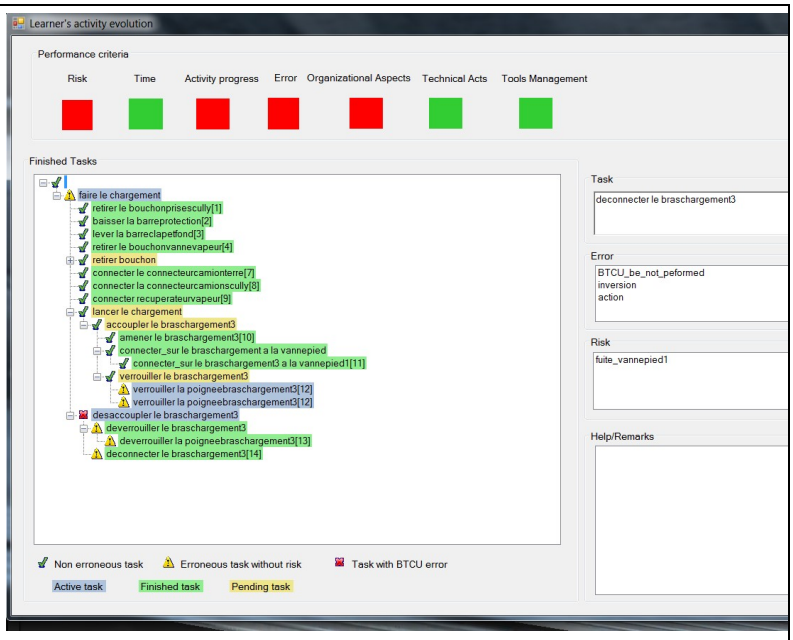


Figure 44: Commentaires et critères à destination du formateur

3.2.1.4 Conclusion

L'objectif visé dans cette première version de HERA était de scénariser des environnements virtuels hautement interactifs et permettre des apprentissages progressifs par essais-erreurs vers des situations complexes et cohérentes. Ains, nous avons proposé de soutenir trois types d'étayage : l'étayage de soutien (e.g. pour souligner l'erreur, pour stopper l'apprenant et éviter des conséquences désastreuses), l'étayage réflexif (traces sémantiques et critères de performances) et enfin l'étayage intrinsèque.

L'originalité de la proposition porte sur l'étayage intrinsèque et l'adaptation de la complexité des situations d'apprentissage (minimisation/maximisation des risques). La difficulté de ce travail était de spécifier une architecture suffisamment générique pour supporter différents types d'applications, de configurations, de méthodes pédagogiques et de guidage. Une autre difficulté était de proposer des outils auteur pour permettre à des non-informaticiens experts de leurs domaines de saisir des modèles directement interprétables par HERA.

Ainsi, pour répondre à ces difficultés, nous avons proposés de scénariser des situations d'apprentissage identifiées par les analyses ergonomiques et par les analyses de risques. Ces analyses sont réalisées par des ergonomes et des spécialistes de l'analyse de risques qui renseignent directement des modèles computationnels (HAWAI-DL pour les modèles d'activité, nœuds papillon pour les modèles de risques, etc.). Notre architecture générique permet d'interpréter ces modèles computationnels et de raisonner sur n'importe quels modèles ainsi crées. Des règles pédagogiques adaptent dynamiquement les situations selon le profil de l'apprenant, son activité effective (réussites, actions erronées) et les objectifs de formation.

Dans cette forme, HERA a pu être instancié sur trois scénarios : 1) le démontage de tuyau sur site à haut risque (V3S-FIANNA), 2) le chargement de matières dangereuses (V3S-FIANNA) et 3) les rondes préventives de maintenance industrielle (PERF-RV2).

3.2.2 Vers une adaptation dynamique de situations motivantes et pertinentes

Si dans les projets V3S/FIANNA, les analyses de risques et ergonomiques avaient permis d'identifier des situations d'apprentissage précises, les scénarios n'étaient toutefois pas écrits et complètement cadrés. La scénarisation adaptive se centrait donc sur la cohérence des situations en regard des situations attendues/observées et sur la complexité progressive de ces situations. Parfois la didactique professionnelle ou l'écriture de scénarios motivants imposent des scénarios plus écrits. Dans ces cas, il faut pouvoir trouver un compromis entre liberté d'action de l'apprenant et contrôle des scénarios. Notre objectif vise, alors à présent, à proposer une scénarisation adaptative dynamique pour des environnements virtuels très interactifs, motivants et garantissant certains aprentissages. Ainsi, dans le cadre du projet SIMADVF (retenu lors de l'appel à projet Serious Games en 2009), l'objectif vise à proposer un serious game pour la formation des assistantes de vies aux familles (ADVF) à la garde d'enfants pour l'AFPA (Association pour la Formation Professionnelle des Adultes).

3.2.2.1 Objectifs et motivations

L'objectif de développement des compétences des assistantes de vie porte **sur trois domaines : la prévention des risques, la réaction aux situations de crise et la posture professionnelle**. Nous touchons là à la problématique de la posture professionnelle dans les dimensions relationnelle, émotionnelle et affective. La dimension affective correspond à la distance affective à poser entre l'ADVF et la personne (ici l'enfant) : entre les deux écueils que sont d'une part la compassion (absence de distance : « *je vis émotionnellement ce que ressent l'enfant, ce qui me paralyse* »), et d'autre part la négation de l'autre (« *ma froideur est une négation de la présence de l'autre : l'enfant comprend qu'il ne m'intéresse pas, ce qui va perturber notre relation* »). Ce simulateur doit permettre d'identifier le type de relation que l'ADVF instaure avec l'enfant à travers les gestes et attitudes adoptées.

Pour ces trois domaines, les tâches à réaliser ne sont pas uniquement **procédurales**. Un des premiers point d'étude était de voir comment HAWAI-DL pouvait être utilisé sur des tâches non-procédurales.

Le second point à traiter était que le module de **scénarisation** HERA permettait d'adapter des situations d'apprentissage centrées sur les **risques** industriels représentés essentiellement comme des événements systèmes. Or ici, les risques sont liés essentiellement aux **comportements des enfants ou à des risques domestiques**. De plus, il ne s'agit pas seulement de risques mais aussi de situations d'apprentissage liées à l'adaptation à la situation, l'organisation de l'intervention, la vigilance, le contrôle de soi, la prise en compte des caractéristiques de la personne, la relation professionnelle, le respect des exigences des parents, le respect des protocoles/règles, etc.

Dans cette application, les enfants doivent avoir des comportements et des émotions cohérentes et beaucoup de comportements sont des **dialogues** avec l'apprenant.

Toutes ces situations d'apprentissage ont été définies par l'AFPA selon l'approche théorique et méthodologique de la **Didactique Professionnelle**. Le verrou majeur pour l'AFPA était de définir les situations d'apprentissage permettant l'acquisition de ce type de compétences. Il ne s'agit pas ici de connaissances de type mathématiques ou de procédures bien définies à appliquer, mais de compétences comportementales ayant des composantes cognitives, conatives (affectives et motivationnelles) et motrices. La difficulté réside autant dans la précision de la définition de ces composantes que dans l'identification des processus permettant l'évolution de ces compétences. L'AFPA nous a fourni cinq scénarios correspondant à autant d'objectifs de formation (préparation du bain, surveillance et tâches ménagères, préparation du repas, change-bébé et identification des risques domestiques). L'AFPA a déterminé un ensemble de situations d'apprentissage principales et secondaires pour chaque scénario et d'autres transversales à tous les scénarios. La didactique professionnelle impose des situations identifiées précisément pour permettre l'acquisition de compétences précises. Si les scénarios avaient été moins riches, une scénarisation déterministe incluant tous les cas possibles et toutes les interactions possibles de l'apprenant aurait été envisageable comme cela avait été le cas dans le simulateur pour la formation à la conduite d'entretien sur lequel l'AFPA avait travaillé précédemment (IVT [Michel et al., 2005]. Ici, certains scénarios étaient très riches et l'AFPA avait des difficultés à être exhaustive et à imaginer toutes les situations et réponses possibles. Et il était préjudiciable pour l'apprentissage de limiter les interactions de l'apprenant. Par ailleurs, une approche déterministe ne permettait pas de créer des situations inattendues, surprenantes, inhabituelles, etc. Si l'apprenant refaisait plusieurs fois le même scénario, le déroulement des situations serait identique et deviendrait **ennuyeux**. Ce point pose un verrou sur la difficulté d'**adapter dynamiquement les situations didactiques qui soient riches, non-déterministes, pertinentes et opportunes en regard des apprentissages tout en conservant une cohérence scénaristique et une cohérence en regard des comportements attendus** (e.g. *gronder l'enfant implique qu'il ne va pas rire aux éclats*).

Ainsi, nous souhaitons :

- **Faire varier la difficulté** des situations, de manière opportune et dynamiquement au cours d'une session et permettre des **apprentissages progressifs** (contrairement à V3S où le formateur initialise le niveau de complexité au début de la session et ce pour toute la session) ;
- Créer des **situations motivantes** et non-ennuyeuses pour favoriser l'engagement de l'apprenant dans ses apprentissages.

Au niveau des **traces**, l'AFPA souhaitait pouvoir associer des **commentaires détaillés** et spécifiques pour chaque action, chaque comportement erroné et chaque combinaison d'actions et/ou comportements erronés. Il ne s'agissait plus de commentaires générés automatiquement comme dans V3S/FIANNA de type « Tâche X en erreur, type d'erreur Y alors conséquence Z ».

Au niveau des **critères de performance**, jusqu'à présent une tâche pouvait être associée à un critère de performance, une erreur sur cette tâche diminuait ce critère. Dans SIMADVF, il n'y a parfois pas de solutions idéales, certaines sont bonnes en regard d'un critère et mauvaises en regard d'un autre.

3.2.2.2 Approche

L'architecture HERA est adaptée pour répondre à la problématique posée dans ce projet. Cependant, nous avons dû adapter HERA et proposer des fonctionnalités supplémentaires pour le rendre plus générique. Kahina Amokrane, en postdoctorat sur le projet, a ainsi pu apporter à HERA les modifications nécessaires au projet. Jocelyn Thiery, ingénieur de recherche, a mis en place le moteur comportemental (ATÉ) pour la génération des comportements des enfants.

Facteurs de motivation pour l'apprenant

A travers le master recherche de D. Dufour, nous avons étudié différentes formes de jeu pour proposer des facteurs de motivation extrinsèque et intrinsèque [Dufour, 2010]. Toutefois, comme nous l'avons vu (chapitre IV.2.3.3.3), l'intégration de facteurs de motivation extrinsèque n'est pas l'approche la plus efficace pour rendre la simulation plus « motivante ». Nous avons donc focalisé nos recherches sur l'intégration de facteurs de **motivation intrinsèque** (i.e. engagement dans le jeu pour le jeu en plaçant l'apprentissage au cœur de l'activité ludique).

L'un des facteurs de motivation intrinsèque sur lequel nous avons travaillé est la **variation de la gravité des situations**. Pour ne pas démotiver l'apprenant, nous avons choisi de prévenir l'apprenant d'un danger grave en provoquant un accident sans gravité la première fois qu'il commet l'erreur (e.g. l'enfant se fait une bosse). La seconde fois, l'AFPA a proposé de provoquer des conséquences irrémédiables : l'enfant peut mourir. Le fait d'aller jusqu'à des conséquences ultimes est un choix discutable. Il est certainement possible de faire prendre consciences des risques sans pour autant aller jusqu'à cette limite choquante d'autant qu'il s'agit de jeunes enfants. L'AFPA fait l'hypothèse que l'apprentissage sera d'autant plus fort. Des évaluations seront menées pour savoir s'il est utile ou non d'aller jusqu'à cet impact émotionnel. Si les résultats montrent que l'apprentissage est meilleur mais qu'ils choquent plus que nécessaire certaines personnes sensibles, alors il serait peut être judicieux d'ajouter des profils psychologiques et de proposer des rétroactions différentes selon les profils.

Un autre facteur de motivation intrinsèque sur lequel nous avons travaillé est l'**adaptation dynamique du niveau de complexité**. L'objectif est de créer des situations toujours inédites et de plus en plus difficiles pour éviter l'ennui de l'apprenant lorsqu'il refait les mêmes sessions. Même si nous ne sommes pas dans un schéma narratif contrôlé tels que dans le récit interactif ou les jeux vidéo essentiellement narratifs, et que le drame ici n'est pas le cœur de l'histoire, nous pouvons comparer le niveau de difficulté (complexité et gravité) progressif utile pour l'apprentissage à un niveau de tension dramatique. Il s'agit essentiellement de moduler graduellement la tension dramatique en créant des situations plus ou moins complexes et plus ou moins urgentes. La création de situations avec une tension dramatique forte permet à l'apprenant d'apprendre à réagir vite mais avec sang-froid en situation d'urgence. Plus l'apprenant sera confronté à ce type de situations, plus il progressera dans la réussite de la maîtrise de la situation, et plus il acquerra des compétences.

Nous avons, aussi, travaillé sur **le sentiment de réussite**, de satisfaction et confiance en soi de l'apprenant. Ce sentiment de réussite peut être créé 1) par l'augmentation de ses scores via les critères de performance, 2) par des messages de félicitations lorsque l'apprenant réussit et surtout 3) par le succès de ses actions. Comme nous l'avons expliqué, l'un des objectifs est de créer des situations difficilement gérables. Cependant créer des situations totalement ingérables peut être décourageant. Lorsque l'apprenant opère les bonnes pratiques, il ne faut pas qu'il croit que quoiqu'il fasse un accident surviendra. Par exemple, *dans l'un des scénarios, l'apprenant doit réaliser des tâches ménagères et surveiller les enfants, un enfant risque de s'étouffer. L'un des enfants va chercher à manger une baie. Si l'apprenant l'en empêche, une situation de diversion est créé (augmentation de la complexité avec une mise en scène d'un autre enfant, d'un voisin, etc.), pour que le premier enfant puisse avaler autre chose (e.g. un caillou, une bille, etc.). Si l'apprenant évite encore l'étouffement, nous avons fait le choix de stopper les tentatives de l'enfant. En effet, 1) nous souhaitions féliciter l'apprenant pour sa surveillance et 2) trop de tentatives pouvaient créer un détournement du jeu (l'apprenant aurait juste à rester derrière l'enfant et l'objectif deviendrait empêcher l'enfant de s'étouffer). Toutefois, il est important que l'apprenant apprenne à gérer la situation de l'étouffement pour passer en revue toutes les techniques de secourisme. Si l'apprenant échoue dans sa surveillance, la situation d'apprentissage est vue au cours de la session, sinon, une autre session lui est proposée. Une séquence animée lui explique qu'il est très vigilant mais qu'il est possible qu'un jour, il soit face à une situation d'étouffement. Una séquence interactive d'étouffement démarre alors.*

Apprentissage progressif

Pour proposer un apprentissage progressif, le niveau de difficulté varie dynamiquement au cours de la session selon le comportement de l'apprenant. Nous distinguons deux problématiques dans ce niveau de difficulté : 1) le fait que les conséquences des actions de l'apprenant soit graves ou non et 2) la complexité des situations d'apprentissage et les événements pouvant perturber l'activité principale de l'apprenant. Le niveau n'est plus un niveau apprenant/difficulté mais est, alors, décomposé en des niveaux de **complexité** et de **gravité**. Nous distinguons trois niveaux de complexité :

1. Sans complexité : l'apprenant doit dérouler sa tâche nominale. Les situations proposées sont simples et aucune perturbation n'est apportée ;
2. Complexité faible : l'apprenant doit gérer plusieurs situations, des perturbations faibles sont apportées. Ces perturbations sont des événements que l'apprenant doit gérer mais qui ne demandent pas de réactions immédiates (e.g. *un enfant demande de l'aide pour une tâche*) ;

3. Complexité élevée : une tension scénaristique est apportée, l'apprenant doit gérer plusieurs situations difficiles. Des perturbations importantes sont créées et demandent des réactions immédiates (e.g. *un enfant est tombé et s'est fait mal*). Des leurres peuvent être créés, un enfant crie au feu, mais en réalité il joue avec son camion de pompier.

Nous distinguons deux niveaux de gravité : grave et pas grave (e.g. *la chute de l'enfant entraîne une bosse ou un traumatisme voire la mort*).

La combinaison de points clés de complexité variable (perturbations) et de niveaux de gravité variables permet de faire varier dynamiquement l'**intensité dramatique.**

Le niveau de complexité à l'initialisation est calculé automatiquement :

1. Niveau de complexité 1 : l'apprenant n'a jamais fait le scénario ;
2. Niveau de complexité 2 : l'apprenant a fait le scénario une seule fois ;
3. Niveau de complexité 3 : l'apprenant a déjà fait plus d'une fois le scénario.

Puis les niveaux sont recalculés dynamiquement au cours de la session selon son activité au cours de la session mais aussi par rapport à un **historique.**

Le niveau de gravité est calculé pour chaque situation d'apprentissage rencontrée :

- Si l'apprenant n'a jamais rencontré cette situation d'apprentissage en particulier, les conséquences ne sont pas graves pour cette situation ;
- Si l'apprenant a déjà rencontré cette situation d'apprentissage en particulier alors les conséquences sont graves pour cette situation.

L'adaptation dynamique de la complexité permet de faire apprendre des concepts de manière progressive. Lorsque ces concepts sont maîtrisés, on franchit un niveau de complexité supérieur. Ainsi le niveau de complexité évolue selon l'historique, la situation d'apprentissage et l'activité de l'apprenant :

- Si l'apprenant n'a jamais fait le scénario, le niveau de complexité ne varie pas ;
- Si l'apprenant fait des erreurs en lien avec les situations d'apprentissage, le niveau de complexité passe à 1 s'il a fait le scénario une ou deux fois auparavant, ou passe au niveau 2 s'il l'a fait plus de deux fois ;
- Si l'apprenant fait des erreurs qui ne sont pas en lien avec les situations d'apprentissage, le niveau de complexité diminue de 1 ;
- Si l'apprenant rattrape ses erreurs, le niveau de complexité augmente de 1.

Comportements des enfants et dialogues

ATÉ est le moteur comportemental qui contrôle et adapte la cohérence du scénario et les situations d'apprentissage. Il génère les événements intérieurs du scénario comme le comportement des enfants (actions, émotions et dialogues) mais aussi les menus sur les objets et les dialogues possibles pour l'apprenant. Les comportements des enfants sont soit des réponses aux événements extérieurs (actions de l'apprenant) soit des événements/perturbations pour provoquer des situations d'apprentissage. Il reçoit de HERA, les niveaux de complexité et de gravité pour chaque situation d'apprentissage.

Comme dans les « ***approches orientées scénario*** » et, dans une certaine mesure, comme dans Mimesis [Young, 2004] (IV.2.4.3), le comportement des enfants est un ensemble d'actions reliées entre elles par des liens de causalités (préconditions/postconditions). En fonction des actions de l'apprenant et des entrées fournies par HERA, ATÉ décide de faire exécuter une action plutôt qu'une autre. L'ensemble des relations causales permet de déterminer quelles situations sont adaptées (réponses aux actions de l'apprenant) et viables (points clés du récit souhaité selon la complexité), quelles sont leurs conséquences (selon la gravité) et ainsi maintenir la cohérence du scénario.

L'objectif n'est pas de modéliser les états cognitifs des enfants. Aussi, par simplicité de programmation, nous ne nous sommes pas orientés sur des modèles cognitifs ni sur des architectures cognitives. Nous avons donc opté pour une modélisation simplifiée à base de règles (graphe causal). Un moteur de sélection teste toutes les actions et dialogues possibles en fonction du contexte (réponses à l'apprenant

ou points clés) et de l'historique pour les points clés (pour ne pas proposer les mêmes situations). Puis selon les niveaux de complexité et de gravité, le moteur sélectionne les comportements possibles (contrôle pédagogique). Enfin, un choix aléatoire sélectionne le comportement qui est alors joué. Un système de méta-action et d'interruption permet d'interrompre les enfants, de leur parler ou de leur donner des ordres.

Dans V3S/FIANNA, nous avions choisi de présenter toutes les actions possibles sur les objets pour laisser l'apprenant libre de faire des erreurs. Pour les **dialogues**, il est difficile de proposer tous les choix possibles à moins de faire de la reconnaissance vocale. Cette dernière n'ayant pas été retenue pour des questions de temps, nous avons choisi des dialogues contextuels. Toutefois, pour ne pas trop orienter l'apprenant sur les bons choix, nous proposons plusieurs dialogues plus ou moins adaptés.

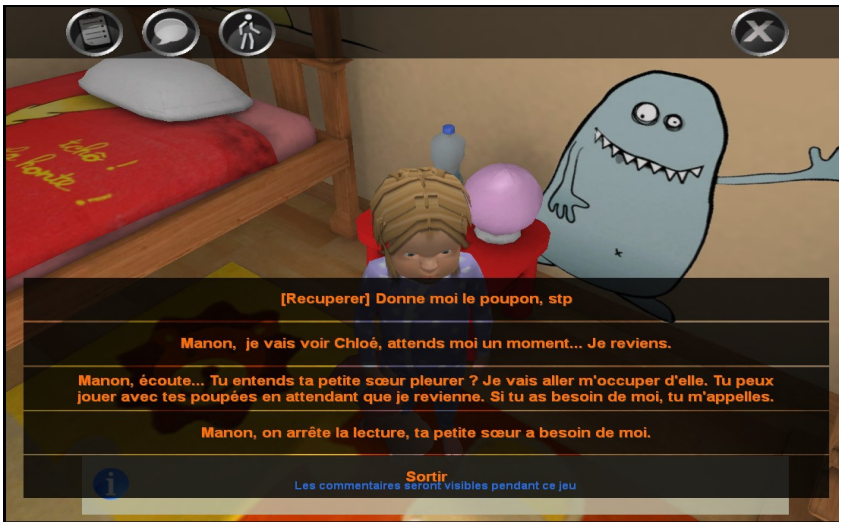


Figure 45 : Dialogues (SIMADVF)

Traces et critères de performance

Les traces sémantiques générées par HERA sont générées en en ligne pour le formateur et enregistrées pour la trace de rejeu pour l'apprenant en mode réflexif.

Les traces permettent d'expliquer les comportements erronés et leurs conséquences (Figure 46 - a) ou les bonnes pratiques mises en place et les conséquences évitées (Figure 46 – b). Pour générer les traces, HERA s'appuie sur le modèle d'activité, la reconnaissance de plan et sur les nœuds papillon pour déterminer les conséquences des erreurs ou des bonnes pratiques.

Pour générer des commentaires détaillés, il est possible d'associer des commentaires aux tâches dans HAWAI-DL et dans les nœuds papillons pour des combinaisons d'erreurs.



a) message d'attention



b) message de félicitation

Figure 46 : traces et critères de perfomances en mode rejeu (SIMADVF)

Pour pouvoir associer à chaque tâche un lien avec les critères de performance, nous avons ajouté dans HAWAI-DL des propriétés et des valeurs. HERA peut ensuite lorsqu'une tâche n'est pas effectuée par l'apprenant, mettre à jour les critères de performance. Ainsi, par exemple, « *SI l'apprenant part dans la salle de bain pour préparer les affaires pour changer le bébé sans lui expliquer ce qu'il va faire ALORS Climat de confiance -2, Langage adapté - 1, Rôle éducatif-1, Centration sur la personne + 1, Vigilance +1* ». Le calcul n'est pas toujours une simple somme des valeurs des critères. En effet, la combinaison de deux erreurs peut être exponentiellement plus grave que deux erreurs sans lien. Ainsi, ces combinaisons peuvent être détectées dans les nœuds papillons (donc dans le réseau bayésien), puisqu'elles concoururent à des événements redoutés identifiés.

3.2.2.3 Conclusion

Le travail réalisé dans SIMADVF nous a permis d'étoffer nos modèles pour l'étayage réflexif, l'étayage intrinsèque et les facteurs de motivation intrinsèque.

Des évaluations de SIMADVF en situation avec des apprenants sont en cours. Toutefois, parmi les améliorations que nous voyons dès aujourd'hui, nous pensons que la formation à la posture professionnelle pourrait être améliorée en donnant des comportements cognitifs aux enfants. Lorsque nous avons débuté les travaux sur SIMADVF, l'architecture REPLICANTS (chapitre III.3.3.4) n'était pas encore finalisée, mais aujourd'hui, elle serait adaptée pour gérer les comportements cognitifs des enfants. En effet, elle permet notamment de gérer des comportements non-procéduraux. Il s'agirait de coupler HERA avec REPLICANTS et d'enrichir le modèle de relations sociales pour pouvoir générer des comportements émotionnels en réaction aux comportements de l'ADVF.

Par ailleurs, plutôt que d'orchestrer la progression scénaristique et l'intensité dramatique selon des règles, nous envisageons une planification à base de techniques d'intelligence artificielle comme utilisée dans l'interactive storytelling associée à des personnages virtuels autonomes cognitifs. Ces points sont abordés dans le projet ARAKIS et NIKITA que nous allons décrire au chapitre suivant.

3.3 Approche scénarisation aptaptive pour un équilibre entre cohérence, contrôle et émergence intégrant des personnages autonomes cognitifs

3.3.1 Objectifs et motivations

Notre objectif vise à orienter le scénario en temps interactif vers des situations pertinentes d'un point de vue pédagogique et d'un point de vue scénaristique. La scénarisation de telles situations doit favoriser les apprentissages d'une part, en contrôlant les situations permettant l'acquisition ou le renforcement de certaines compétences et d''autre part, en contrôlant le flow pour maintenir l'engagement de l'apprenant dans ses apprentissages. Cet objectif est au cœur des travaux de thèses de Camille Barot, co-encadrée avec D. Lenne (projet ARAKIS suite des projets V3S/FIANNA) et de Kevin Carpentier, co-encadrée avec I. Thouvenin (projet NIKITA),

Nous souhaitons adapter le déroulement des événements et des actions des personnages virtuels peuplant une application de formation en fonction des traces d'activité de l'apprenant et de règles pédagogiques et dramaturgiques. Dans V3S/FIANNA les personnages sont cognitifs (MASVERP) voire hautement cognitifs dans SAGECE (REPLICANTS) mais leurs comportements ne sont pas dictés par un contrôle pédagogique, le module pédagogique (HERA) contrôle essentiellement les événements du scénario hors personnages virtuels. Dans SIMADVF, le contrôle pédagogique se fait sur les événements du scénario et sur les personnages virtuels mais ces derniers ne sont pas autonomes et ni cognitifs.

Une des problématiques ici est donc de pouvoir **offrir un contrôle pédagogique et/ou narratif sur une scénarisation émergente de situations fortement complexes comportant des personnages hautement cognitifs cohérents en regard des comportements attendus**.

Nous nous situons toujours dans le contexte de l'apprentissage situé et du constructivisme avec l'idée de laisser l'apprenant libre de ses actions tout en garantissant certains apprentissages. L'idée ici est de travailler plus sur la notion d'activité collective et sociale en donnant une place prépondérante au groupe. Nous élargissons donc nos travaux au cadre théorique du **socio-constructivisme**. L'idée est toujours d'amener les différents intervenants à mieux travailler ensemble et à se comprendre.

Nous nous intéressons aussi à la théorie de la **flexivité cognitive** [Spiro *et al.*, 1988] qui se concentre sur l'apprentissage des domaines complexes et mal structurés. Il s'agit d'étudier la manière d'amener l'apprenant à s'adapter aux diversités de certaines situations pour dépasser celles dans lesquelles un apprentissage initial a eu lieu et de voir comment utiliser ses connaissances et savoir-faire dans des contextes différents, variés et inattendus. [Spiro *et al.*, 1988] préconisent de présenter l'information aux sujets selon des points de vue multiples, de les amener à construire leurs propres représentations et de rendre possible la généralisation et le transfert. L'idée est de pouvoir interconnecter une multitude de cas relatifs au même contenu d'apprentissage, d'amener l'apprenant à explorer, agir, faire des erreurs et les réparer. Cela peut être réalisé en confiant, par exemple, une mission ainsi que la possibilité de converser avec divers personnages, censés représenter différents points de vue sur une même question. Au fil de sa navigation dans ce monde simulé, il pourra ainsi exercer des habiletés d'abduction et d'induction et parvenir à généraliser et se construire une vision propre du domaine d'apprentissage ciblé.

Pour favoriser une telle réflexion et ce type d'apprentissage, nous souhaitons orienter l'apprenant vers des situations d'apprentissage et des situations-problèmes pertinentes. Selon les cas, il peut s'agir d'amener ou de prévenir la réalisation de risques particuliers, ou bien de provoquer des situations de travail dégradées. La réflexion sur les risques liés à l'activité passe également par la mise à l'épreuve des barrières de sécurité existantes, en les confrontant à l'émergence de situations inédites. L'idée est de pouvoir proposer des situations dont la difficulté s'adapte à la progression de l'apprenant.

Par ailleurs, nous émettons l'hypothèse que l'apprentissage peut être favorisé par une plus grande motivation de l'apprenant. Nous pensons que cette motivation serait accrue en suscitant son intérêt via l'intégration d'aspects ludiques, en favorisant son implication émotionnelle dans une histoire et en contrôlant le niveau de tension (intensité dramatique) et de difficulté de la simulation. Dans ARAKIS, nous nous focalisons uniquement sur les aspects narratifs du jeu sérieux et du récit interactif.

3.3.2 Positionnement

Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, il y a 1) des environnements qui contraignent plus ou moins les interactions (intégrant ou non des modèles de domaine) ; 2) des environnements plus ou moins contrôlés par la pédagogie ou par le scénario et 3) des environnements proposant des scénarios et des comportements plus ou moins cohérents. Or nous souhaitons :

- Laisser l'apprenant **libre de ses actions**, pour en observer les **conséquences** et se faire ses propres représentation et s'impliquer dans l'histoire ;
- **Contrôler** le déroulement de la simulation pour 1) favoriser les apprentissages en proposant des apprentissages progressifs (règles pédagogiques) et 2) maintenir un niveau de challenge en adaptant la tension dramatique (règles dramaturgiques) ;
- Proposer des **comportements complexes cohérents** (répondant à un fonctionnement logique du monde et des comportements humains cohérents avec les objectifs visés) ;
- Proposer des situations variées et l'émergence de situations pour favoriser un apprentissage situé (variations des contextes, difficultés, etc.) et motiver l'apprenant (inédit, surprise, etc.).

Pouvoir offrir ces différents niveaux de contrôle est un problème difficile car souvent certaines règles peuvent être **contradictoires**. Le verrou considéré est donc la difficulté à proposer des modèles pour la scénarisation permettant de gérer les contradictions entre contrôle pédagogique, contrôle scénaristique, liberté d'action de l'apprenant, émergence des situations, autonomie des personnages virtuels et cohérence du fonctionnement du système technique.

Nous nous intéressons à des situations fortement **complexes** touchant à la notion de facteurs humains. Or comme nous l'avons vu, si la réalité virtuelle est une technologie très intéressante pour former à des situations industrielles, il existe peu de modèles permettant de gérer des environnements aussi complexes. Certains modèles comme celui proposé par [Delmas, 2009] permettent de définir des graphes multi-linéaires de tous les scénarios possibles. Cependant, quand la complexité devient trop importante, il est difficile d'être **exhaustif** et de prévoir tous les comportements possibles. Le problème est d'autant plus grand si l'on souhaite intégrer des personnages virtuels avec des caractéristiques humaines. La solution consistant à leur donner une complète **autonomie** ne permet pas de garantir une

trame scénaristique particulière ou un apprentissage donné. Et leur donner une **semi-autonomie** (contrôle avec des ordres), permet de contrôler l'orientation du scénario mais pas la cohérence des comportements des personnages virtuels. Par ailleurs, cette solution ne permet pas d'expliquer *a posteriori* l'enchaînement des événements et comment des événements externes et les caractéristiques internes ont pu impacter les processus décisionnels. Ainsi peu de travaux visent à gérer à la fois le contrôle global des scénarios et l'émergence de situations dans des environnements très interactifs avec des personnages virtuels autonomes très cognitifs. Parmi ces rares travaux, [Si, Marsella et *al.*, 2009] proposent un calcul de la **motivation** des personnages virtuels autonomes à l'initialisation de la session pour orienter les comportements de ces derniers selon des points clés prédéfinis. Toutefois, le système proposé ne permet pas une adaptation **dynamique** du scénario.

Pour atteindre ces objectifs et trouver des compromis entre ces différentes contraintes, nous proposons une approche plutôt émergente avec des personnages virtuels autonomes hautement cognitifs (mélange des travaux menés sur MASVERP et REPLICANTS) contrôlés par un système d'adaptation pédagogique et dramaturgique des situations d'apprentissage s'appuyant sur HERA (traces, historiques, etc.). Pour contrôler cette adapation, nous proposons SELDON (ScEnario and Learning situations adaption through Dynamic OrchestratioN).

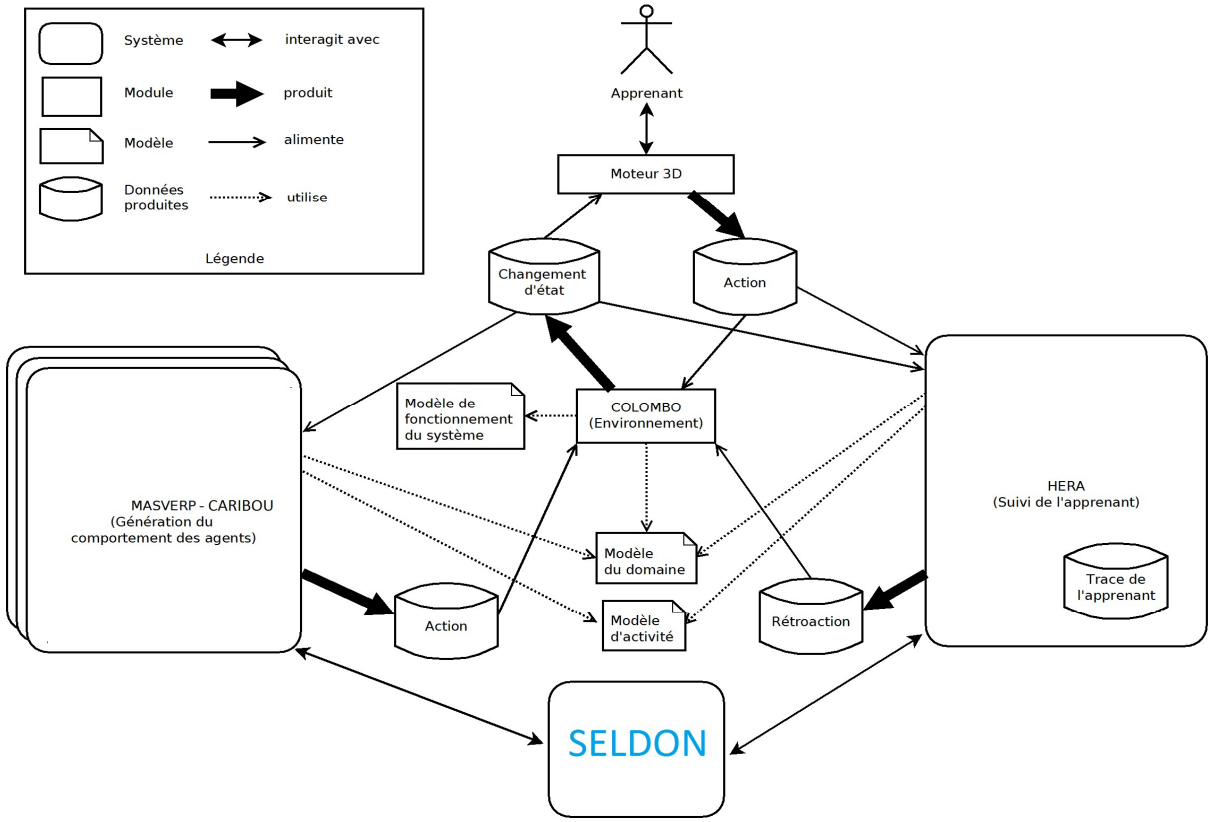


Figure 47 : Positionnement de SELDON avec MASVERP, REPLICANTS et HERA

3.3.3 Questions de recherche

Nous souhaitons proposer une mise en scène à travers un ensemble de situations didactiques. L'apprentissage doit reposer avant tout sur la capacité du sujet à résoudre des problèmes. Pour autant, la question de l'ordre et de la nature des problèmes à poser et à résoudre reste entière. Ainsi, il s'agit de mettre en scène des problèmes dans un ensemble ordonné de situations didactiques pour permettre à l'apprenant de dépasser les obstacles rencontrés, de s'ouvrir à de nouvelles questions et de se construire ainsi, progressivement, la structure conceptuelle de la situation. A la différence des simulateurs pleine-échelle, nous ne cherchons pas à reproduire fidèlement la situation de travail, mais un ensemble de problèmes significatifs présents dans le travail et la base du développement des compétences. L'accent est mis sur les caractéristiques des situations mises en scène dans lesquelles on fait jouer aux simulateurs un rôle de médiateur particulier. Il s'agit alors de s'interroger sur « *quelles situations simuler compte tenu des caractéristiques de l'environnement virtuel et des compétences à développer et comment les*

scénariser ? ». La question de la scénarisation a été séparée en deux questions de recherche 1) d'une part, comment déterminer un ou des scénarios pertinents à partir d'un ensemble de données (historique des actions et erreurs de l'utilisateur, préférences pédagogiques, intensité dramatique, rythme, complexité de la situation, etc.) et de règles (au sens de règles pédagogiques ou règles d'écriture dramaturgique) 2) d'autre part, comment influer sur le déroulement de la simulation, et notamment les actions des personnages virtuels autonomes, sans agir de manière invasive au niveau de leurs processus décisionnels. Alors dans ce dernier cas, comment définir les règles/contraintes pour passer d'une situation à une autre, fournir des rétroactions adaptées (souligner l'erreur, montrer des conséquences, aider à résoudre le problème), etc. ?

3.3.4 L'approche SELDON

3.3.4.1 Contrôle scénaristique et pédagogique des PVA et des risques

L'intensité dramatique et la difficulté pédagogique peuvent être contrôlées pour apprendre une nouvelle connaissance, renforcer une connaissance qui vient d'être acquise, déstabiliser pour mettre à l'épreuve la connaissance qui vient d'être acquise, vérifier une connaissance. Selon la manière dont l'apprenant maîtrise ou non la situation, la difficulté de la situation ou l'intensité dramatique peut varier. Les personnages virtuels autonomes peuvent alors dans ce cas jouer le rôle d'opérateurs modèles, de perturbateurs, de facilitateurs (e.g. en venant aider l'apprenant à gérer la situation). L'idée est d'avoir une trame scénaristique et pédagogique qui amène toujours à une situation « presqu'accidentelle » pour pouvoir travailler sur la représentation du risque que se fait l'apprenant. La difficulté provient du fait que le niveau de maîtrise du risque des apprenants est différent selon leur profil et qu'il faut rendre (en fonction de cette maîtrise) plus difficile les conditions de maitrise du risque. L'adaptation des situations doit être dynamique et personnalisée.

Pour contrôler ces niveaux, répondre à ces difficultés et lever le verrou de cette thèse nous proposons donc de nous appuyer sur :

1) Le parallèle entre a) la théorie de la zone proximale de développement pour augmenter progressivement le niveau de difficulté des situations d'apprentissages (i.e. choisir des situations proches des compétences/connaissances déjà acquises) et diminuer progressivement le niveau d'aide apporté à l'apprenant et b) la théorie du flow pour augmenter progressivement l'intensité dramatique ;
2) Le contrôle cognitif des personnages virtuels autonomes par des théories issues de travaux en psychologie cognitives (modèles de personnalité OCEAN, d'émotions OCC, de relations sociales, de la cognition COCOM, d'erreur CREAM, etc.) ;
3) Les théories en fiabilité humaine et notamment le modèle dit « swiss cheese model » de Reason où la flèche symbolise le déroulement de la trame pédagogique jusqu'au « presqu'accident » ou l'accident et les morceaux de gruyères représentent le contexte qui peut être modifié en fonction du niveau du « joueur/apprenant» (barrière ou pas barrière / trou ou pas trou / ressources ou pas ressources / perturbation ou pas perturbation) ;

Nous focalisons ici le travail sur l'étayage et la motivation intrinsèque. Nous nous intéressons au récit interactif pour l'orchestration des situations plus que pour les aspects shooting script. Il existe déjà des systèmes permettant d'adapter un scénario, joué par des personnages réactifs, en fonction de traces de l'activité d'un apprenant [Niehaus *et al.*, 2009]. Cependant, cette adaptation ne se fait que d'une session à l'autre. Nous nous plaçons dans un contexte de formation continue et de maintien des connaissances, l'utilisation occasionnelle du système par les apprenants impose donc une adaptation du scénario au cours de la session. Le niveau de difficulté et d'intensité dramatique s'adapte dynamiquement aux actions de l'apprenant.

Par ailleurs, l'adaptation du scénario ne doit pas se faire au détriment de sa cohérence, que ce soit au niveau de la simulation du système technique ou des processus cognitifs décisionnels des personnages virtuels. Ainsi, dans Thespian, [Si, Marsella *et al.*, 2005] ont mis au point un système de planification permettant de déterminer les états internes initiaux (buts, émotions, etc.) des personnages virtuels les plus susceptibles de mener au déroulement des événements souhaité par le formateur. Le scénario ainsi produit respecte les processus cognitifs des personnages. Cependant là encore l'adaptation est faite en

amont et non en ligne en réponse aux actions de l'apprenant. « *Nous proposons pour cela d'utiliser le principe de late commitment, décrit dans [Swartjes et al., 2008], qui consiste à déterminer la valeur d'un état non pas à l'initialisation, mais le plus tard possible au cours de la simulation. Ainsi, en déterminant certains états (e.g. ressort intact ou cassé, personnage novice ou expert, calme ou énervé, etc.) au moment adéquat, il sera possible d'orienter le déroulement des événements de l'environnement virtuel (comportement des personnages virtuels, réactions des systèmes techniques et événements externes tels que des changements de météo) dans la direction voulue, sans pour autant perturber les processus cognitifs ou les règles de fonctionnement du système technique* » [Barot, Lourdeaux *et al.* , 2011].

3.3.4.2 Adaptation et planification

Pour déterminer les situations les plus pertinentes et les plans y conduisant, SELDON est composé d'un module d'adaptation (thèse Kevin Carpentier) et d'un module de planification (thèse Camille Barot) (Figure 48).

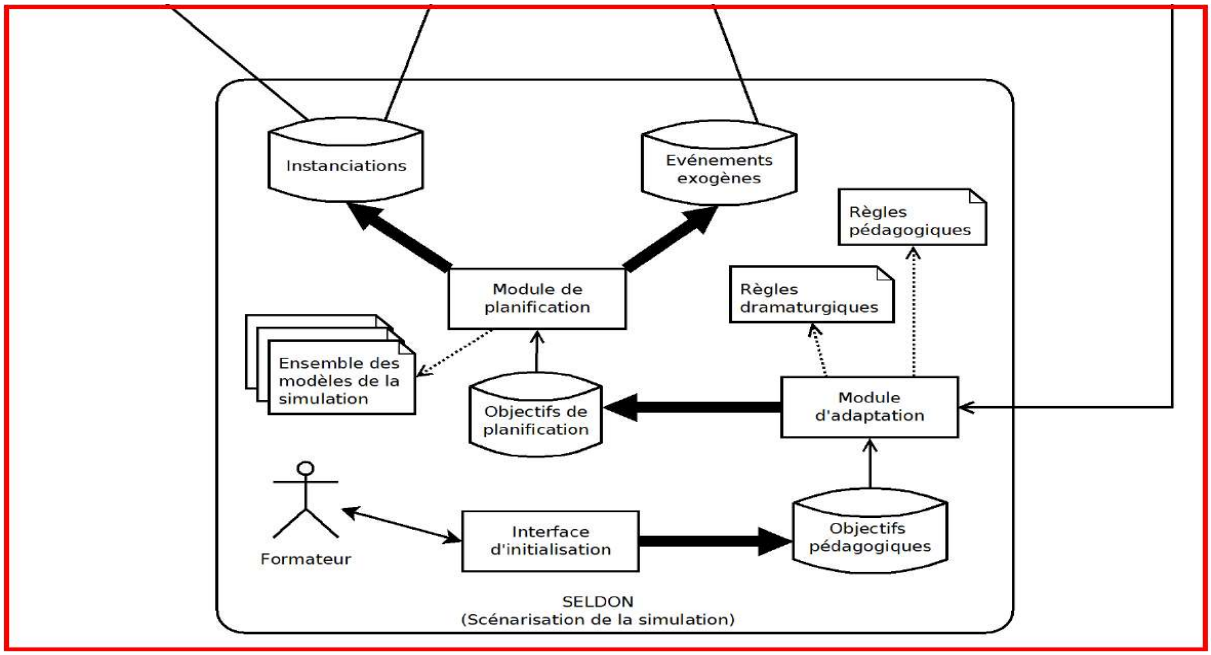


Figure 48 : Architecture de SELDON

Adaptation

Le **module d'adaptation** (SELDON>>ADAPTOR) permet de contrôler les niveaux de difficulté et d'intensité dramatique des situations d'apprentissage ainsi que d'autres événements particuliers. Il s'appuie sur les concepts de flow et de zone proximale de développement pour placer l'apprenant dans des situations propices à la fois à la motivation et à l'apprentissage. Il détermine une adaptation pertinente du scénario à réaliser, en fonction de l'état courant de la simulation et de l'apprenant.

Le module génère des situations propices à l'apprentissage à partir du modèle de fonctionnement du monde, du modèle de risque et du modèle de l'activité. Il raisonne sur un ensemble de règles : **dramaturgiques** (intensité croissante pour motiver l'apprenant, introduction et mise en situation, événements constituants des arcs narratifs, personnages riches pour impliquer émotionnellement l'apprenant, etc.) et **pédagogiques** (augmentation progressive de la complexité, présentation de concepts proches de ceux vus précédemment, mise en situation de stress, etc.). Il prend en entrée les traces de l'apprenant produites par HERA (erreurs, critères de performance, historique des actions de l'apprenant et des personnages virtuels autonomes, niveau de stress, etc.), des variables d'évaluation de la situation courante (complexité, gravité, rythme, etc.) et des objectifs de formation. Le module produit des objectifs d'adaptation (Figure 48) sous la forme de contraintes qui seront utilisés par le module de planification. Ces contraintes sont de deux types :

- Contraintes sur les situations (***situations constraints***) : il peut s'agir de situations d'apprentissage que l'apprenant doit rencontrer ou éviter car trop éloignée de la zone proximale de

développement. Par ailleurs, l'une de ces situations correspond à la situation but à atteindre (***goal situation***) ;

- Contraintes sur les fonctions d'évaluation (***evaluation functions constraints***) : ces contraintes permettent de faire varier le rythme, la complexité, la gravité, de venir en aide, etc. Elles peuvent être globales ou associées à une situation particulière.

Ces contraintes peuvent être couplées et ainsi permettre de vérifier ou renforcer une compétence. Une compétence peut être mise en œuvre dans des situations d'apprentissage différentes, plus ou moins complexes et dans des contextes différents. On pourrait trouver des règles comme :

- « *SI une compétence a déjà été testée précédemment une seule fois ET SI les performances étaient bonnes, ALORS la renforcer dans une situation différente* » ;
- « *SI l'apprenant rencontre des difficultés ALORS diminuer la complexité de la situation* » ;
- « *SI les performances de l'apprenant sont bonnes ET SI la compétence a déjà testée et renforcée ALORS perturber l'apprenant* ».

Une classification des entrées et sorties de ce module est en cours. Plusieurs formalismes de représentation des règles sont à l'étude (e.g. règles floues, Conditional Preference Networks, Dynamic Decision Networks).

Planification

Le **module de planification** (SELDON>>DIRECTOR) vise à appliquer les contraintes proposées par le module d'adaptation. Pour cela il va chercher les scénarios partant de l'état courant qui maximisent les fonctions de satisfaction correspondantes. Afin que ce contrôle entre le moins possible en conflit avec les modèles qui sous-tendent la simulation, le module de planification s'appuie sur le principe du « *late commitment* » : certains états de la simulation sont instanciés non pas à l'initialisation, mais à la volée au cours de la simulation, quand il est nécessaire de les interroger. Ces variables sont ainsi instanciées pour faire en sorte que les actions des personnages virtuels autonomes et les réactions du système technique aillent effectivement dans le sens voulu par le module d'adaptation. Le module de planification a ainsi deux moyens d'actions :

- l'instanciation de ces variables (***late commitments***) : états des objet (e.g.: ressort cassé ou non, cuve remplie ou non), caractéristiques individuelles des personnages virtuels autonomes (e.g. : fatigue, stress, émotions, personnalité) et propriétés de la simulation (e.g. : heure, température) ;
- le déclenchement d'événements exogènes (***happenings***) (e.g. : orage, appel téléphonique, arrivée d'un nouveau personnage virtuel).

Les grandes étapes de l'algorithme du module de planification sont présentées sur la Figure 49. DIRECTOR utilise comme base pour la génération des scénarios un arbre de causalité (***causal tree***), qui correspond à l'agrégation sous forme d'un arbre ET/OU d'un ensemble de modèles de risques fournis lors des analyses terrain. A la réception d'un ensemble de contraintes proposées par ADAPTOR, DIRECTOR repère la situation but (***goal situation***) dans l'arbre de causalité, et isole le sous-arbre correspondant. Ce sous-arbre est ensuite explicité sous la forme d'un ensemble de trames scénaristiques (***plot trees***), correspondant chacune à un arbre solution menant à la situation voulue. Ces trames scénaristiques correspondent à des séquences d'événements partiellement ordonnés référençant des concepts abstraits (objets et actions non-instanciés). Les nœuds feuilles de ces arbres peuvent être soit des événements initiateurs de la chaîne de causalité, soit la non-réalisation de barrières qui empêcheraient le reste de la chaîne de se produire. Ces événements sont ensuite instanciés pour créer des scénarios partiellement ordonnés (***partially ordered scenarios***). Une phase de planification permet de générer les ***happenings*** et les ***late commitments*** nécessaires à la réalisation de chaque événement feuille (ou non réalisation s'il s'agit d'une barrière). S'il s'agit d'une barrière technique, la planification est réalisée uniquement sur le modèle de domaine (***domain model***). Le modèle de domaine contient les objets, les actions possibles et les règles de fonctionnement transcrits en opérateurs STRIPS. S'il s'agit d'une barrière humaine ou organisationnelle, la planification est réalisée sur le modèle de domaine et sur le modèle d'activité (***activity model***) transcrit en opérateurs Soar. DIRECTOR sélectionne enfin le

scénario partiellement ordonné (ainsi que les commitments et happenings nécessaires à sa réalisation) le mieux à l'ensemble de contraintes de départ.

Par exemple, si le module d'adaptation désire générer une fuite de vanne, DIRECTOR va chercher dans les modèles de risques les trames scénaristiques possibles menant à cette fuite. Parmi les différentes possibilités, DIRECTOR choisit celles qui répondent le mieux aux contraintes proposées par ADAPTOR (e.g. le problème de gestion des cuves non-vides au départ n'ayant pas été encore vu, il est préférable d'éviter les scénarios qui impliquent ce type de situations). Ici, DIRECTOR pourra choisir un cas où le ressort est usé et où un personnage autonome n'accompagne pas la vanne. DIRECTOR instancie ensuite un scénario sur un camion donné et un personnage autonome donné. L'état du ressort qui était jusqu'à présent non défini est alors instancié à l'état usé. D'autre part, DIRECTOR détermine qu'un personnage autonome a plus de probabilité de ne pas accompagner la vanne s'il est un expert imprudent avec des pressions temporelles. DIRECTOR instancie alors le personnage autonome en mode expert et imprudent et va planifier des événements qui généreront des pressions temporelles. Par la suite, DIRECTOR va vérifier que le personnage autonome n'accompagne effectivement pas les vannes et que la fuite va bien se déclencher comme prévu. Si le scénario échoue (par exemple suite à une action de l'apprenant), alors il va chercher un autre scénario.

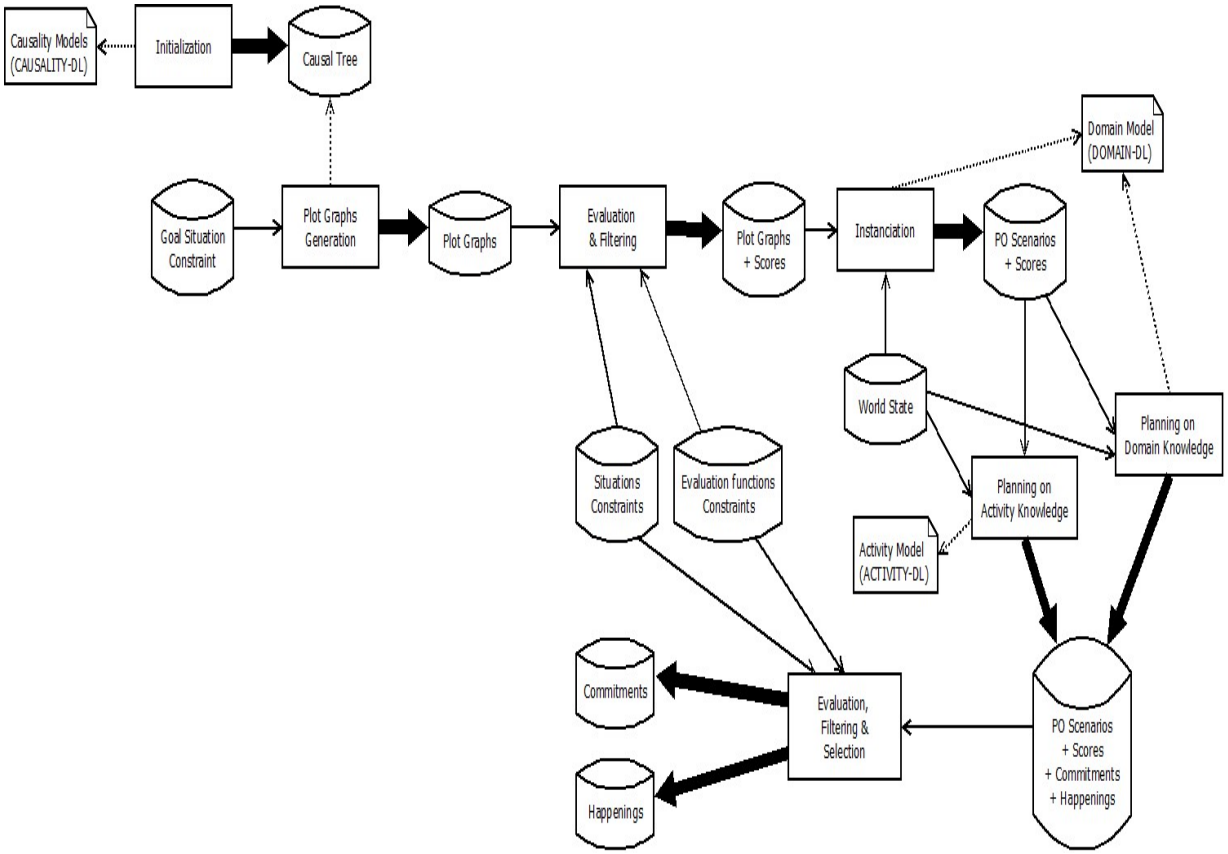


Figure 49 : Etapes de l'algorithme de planification (SELDON>>DIRECTOR)

3.3.4.3 Architecture

SELDON est conçu de manière générique afin de s'appuyer sur des configurations différentes d'architecture de modélisation décisionnelle des personnages virtuels autonomes, de modèles d'activité, de domaine, de fonctionnement, d'état du monde, de suivi de l'apprenant et de risques.

Pour **l'architecture décisionnelle des personnages virtuels autonomes**, comme nous l'avons dit au chapitre III.3.4, nous poursuivons sur l'architecture REPLICANTS enrichie de COCOM et CREAM.

Pour le modèle d'activité, nous avons retravaillé la formalisation de **HAWAI-DL**, renommé ACTIVITY-DL pour permettre aux algorithmes de planification de pouvoir raisonner de manière générique sur des propriétés modulables. Nous avons, dans un premier temps, travaillé sur la formalisation des constructeurs à base des relations d'Allen pour permettre la prise en compte des aspects temporels. Puis sur des méta-conditions de réalisation des tâches.

Pour le **suivi de l'apprenant par HERA**, l'introspection du modèle de risques (nœuds papillons et ontologie) est déporté dans SELDON. En effet, c'est SELDON qui selon certaines règles pédagogiques et dramaturgiques déclenche les risques. Par contre HERA, fournit toujours les traces de l'apprenant (activité effectives, comportements corrects et erronés), les performances et l'historique. .

3.4 CONCLUSION

Comme nous l'avons vu utiliser la réalité virtuelle pour former à des situations très complexes présente de nombreux avantages. Toutefois, simuler de manière très réaliste le système technique ne suffit pas pour supporter des situations de co-activité complexes où les facteurs humains jouent un rôle important. Par ailleurs, les modèles de scénarisation pédagogique s'avèrent contraignant car il est très difficile de décrire toutes les situations possibles. Nous souhaitons, donc, ne pas avoir à décrire toutes les situations, combinaisons de situations et rétroactions possibles.

Par ailleurs, nous l'avons vu aussi, toutes les fonctionnalités de la réalité virtuelle ne sont généralement pas exploitées et les modèles informatiques pour la scénarisation d'environnements virtuels pour l'apprentissage sont souvent destinés à l'entraînement à la répétition d'un geste technique ou d'une procédure prescrite dans un contexte « d'école » peu complexe. Aussi, nous souhaitons former l'apprenant dans de véritables situations de travail, contextualisées et variées et plus particulièrement mettre l'apprenant face à des situations-problèmes.

Cela étant, chaque entreprise, chaque formateur et selon chaque besoin de formation, doit pouvoir choisir les configurations et les stratégies qui leur sont adaptées. Par ailleurs, ces stratégies peuvent évoluer et permettre des apprentissages progressifs allant du cas d'école à la situation fortement dégradée observée sur le terrain. Nous souhaitons, alors pouvoir construire des environnements virtuels sur mesure pour différents cas d'applications et différentes configurations techniques. Nous souhaitons aussi pouvoir adapter dynamiquement différentes méthodes et stratégies pédagogiques. En particulier, la notion d'action erronée et de contexte dans laquelle elle survient, nous intéresse particulièrement. Nous souhaitons donc différencier les violations, compromis et erreurs de connaissances afin de pouvoir y apporter les solutions les plus adaptées.

Enfin, un autre point d'étude est la réflexion sur l'utilisation de facteurs de motivation pour favoriser les apprentissages. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux facteurs de motivation intrinsèque et à comment contrôler des scénarios pertinents et cohérents. Les modèles proposés pour le récit interactif permettent de contrôler le rythme des scénarios mais au détriment de la cohérence avec le monde réel ou du contrôle pédagogique. Aussi, nous souhaitons pouvoir trouver un compromis entre contrôle scénaristique, contrôle pédagogique et cohérence des situations.

Ainsi, notre approche consiste à adapter dynamiquement les scénarios dans des environnements virtuels pour l'apprentissage humain (moteur de scénarisation) et à pouvoir expliquer tous les liens de causes à effets (moteur de suivi de l'apprenant). Notre hypothèse est que l'intégration de multiples modèles explicites (domaine, risques, activité) permet de spécifier un large possible de situations d'apprentissage au plus proche des réalités de terrain (intégrant des déviations, contextes différents, rares, etc.). Notre moteur de scénarisation permet de contrôler des situations d'apprentissages qui sont à la fois cohérentes, pertinentes, efficaces et variées. Aussi, plutôt que de constamment recadrer l'apprenant sur la procédure idéale et d'expliquer à l'apprenant ses erreurs, notre moteur de scénarisation permet aussi de gérer un champ large de situations écologiques et d'adapter la complexité pour favoriser une approche exploratoire par essai-erreur mais contrôlée par la pédagogie pour proposer des apprentissages progressifs.

Actuellement, nos travaux visent à intégrer le contrôle pédagogique de personnages virtuels hautement cognitifs et le contrôle scénaristique des situations.

V. Conclusion et perspectives

1 Bilan

Nos travaux visent à **scénariser et à modéliser l'activité humaine en environnement virtuel hautement interactif pour l'apprentissage progressif d'aspects organisationnels, humains et techniques dans des situations dégradées, cohérentes et fortement complexes** (e.g. pression temporelle, perturbations fortes, surraccident, impliquant plusieurs personnes avec des relations sociales évoluées, etc.). La motivation de ces travaux est de pouvoir scénariser des situations d'apprentissage permettant ainsi à l'apprenant d'expérimenter, réfléchir et donc favoriser ses apprentissages. Pour atteindre cet objectif, plusieurs difficultés ont être traitées qu'il est possible de résumer par la problématique : **comment offrir un contrôle pédagogique et/ou narratif sur une simulation fortement complexe comportant des personnages hautement cognitifs sans nuire à sa cohérence en regard des comportements attendus.** Pour résoudre cette difficulté, nous proposons d'opérationnaliser et de coupler des modèles issus de travaux en **psychologie cognitive** à travers des modèles de connaissances et des techniques d'intelligence artificielle au sein d'une **architecture informatique générique**. Dans ce mémoire, nous avons présenté nos apports suivant trois axes thématiques : 1) la représentation des connaissances, 2) la modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes et 3) la scénarisation adaptative.

Concernant la **représentation des connaissances**, notre apport s'est situé essentiellement sur la proposition de modèles computationnels permettant d'opérationnaliser des travaux en psychologie cognitive (modélisation de l'activité) et en fiabilité humaine (analyses de risques). Nous avons notamment proposé le formalisme HAWAI-DL.

Concernant les **personnages virtuels autonomes**, notre apport majeur s'est situé sur l'opérationnalisation de travaux en psychologie cognitive et notamment la modélisation de processus décisionnels menant à des comportements erronés. Nous avons proposé les architectures MASVERP pour la modélisation de comportements individuels et REPLICANTS pour la modélisation de comportements collectifs. MASVERP a permis d'opérationnaliser des modèles de comportements erronés (erreurs et violations) ainsi que des processus de planification de l'activité humaine en situation dégradée (COCOM). REPLICANTS a permis d'opérationnaliser des modèles cognitifs d'émotions (OCC), de personnalité (OCEAN) et de contagion émotionnelle.

Concernant, la **scénarisation** nous avons vu que la scénarisation au cours du temps avait pris plusieurs formes. Tout d'abord avec HAL et APLG, nous avons proposé des **rétroactions** type renvoi sur des connaissances (méthodes explicatives) pour la formation d'apprenants novices selon la modélisation des erreurs CREAM. Puis avec HERA, nous avons proposé une scénarisation adaptative des risques fondée sur la notion **d'étayage** permettant de visualiser des **conséquences cohérentes** des actions selon le profil apprenant (méthodes actives). Nous avons ensuite étendu HERA pour une adaptation dynamique de situations **motivantes** et **pertinentes** afin d'augmenter l'engagement de l'apprenant. Enfin, avec SELDON, nous proposons un contrôle global de la scénarisation ainsi que le contrôle des **personnages virtuels autonomes** afin de mettre en scène des situations encore plus complexes et favoriser des apprentissages. SELDON est composé d'un système de **planification** et **d'adaptation** dynamique des situations d'apprentissage selon la théorie de la zone proximale de développement, de la complexité progressive et du flow. Nous avons aussi proposé des systèmes de **traces** pour favoriser des activités réflexives et un suivi de l'apprenant par le formateur.

Ainsi, selon les objectifs de formation, les traces d'activité de l'apprenant et son profil dynamique, les modèles de connaissances (activité, domaine, risques, etc.), des règles pédagogiques et dramaturgiques, nous proposons de scénariser les comportements des personnages virtuels autonomes et du système technique pour produire des rétroactions (retour sur connaissances théoriques), des conséquences plus ou moins graves ou encore des situations d'apprentissages ou ludiques pour provoquer des apprentissages particuliers (renforcer, perturber, etc.) (Figure 50).

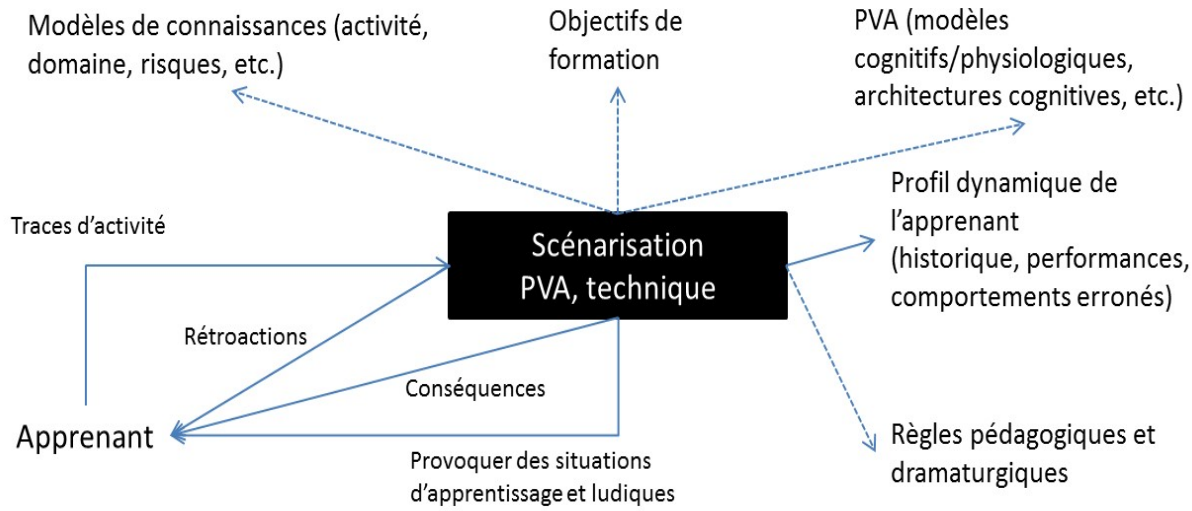


Figure 50 : Facettes de la scénarisation

Comme nous le voyons, nos travaux s'intéressent à différents domaines qui sont souvent étudiés séparement. Nous visons une approche englobant ces différents domaines avec la difficulté de traiter les contraintes relatives à chaque domaine qui peuvent être contradictoires (e.g. autonomie/contrôle pédagogique ou dramaturgique, cognitifs/collectifs, etc.).

2 Vers l'architecture HUMANS

Comme nous l'avons vu, les différents modules (PVA, scénarisation, traces) interagissent entre eux et s'appuient sur les mêmes modèles. Aussi, ces différents travaux nous ont amené à proposer la suite logicielle HUMANS (HUman Models based Artificial eNvironments Software platform). HUMANS regroupe l'ensemble des modèles et moteurs décisionnels de l'équipe HUMANS et vise à permettre la modélisation et la scénarisation de l'activité humaine dans des environnements virtuels complexes. L'architecture de cette suite logicielle a été imaginée grâce à un travail d'équipe entre les doctorants et ingénieurs de recherche de l'équipe HUMANS.

2.1 Modèles et modules

HUMANS est composée de **modules** aux fonctionnalités précises. Ces modules s'articulent autour de **modèles** qui leur permettent de disposer de représentations communes. Pour plus de lisibilité, certains d'entre eux ont été renommés et des modules ont subi quelques séparations fonctionnelles.

Les cinq modules principaux de HUMANS sont (Figure 51) :

- HUMANS>>WORLD MANAGER[9] : ce module gère l'état du monde. Il détermine si les actions réussissent et quels sont les effets. Il correspond à l'ancien COLOMBO ;
- HUMANS>>REPLICANTS : ce module gère la modélisation décisionnelle des personnages virtuels autonomes (Margaux Lhommet) ;
- HUMANS>>MONITOR : ce module est en charge du suivi de l'apprenant et des traces. Il correspond à la partie HERA sur les traces (Kahina Amokrane) ;
- HUMANS>>SELDON : ce module est en charge de la scénarisation. Il correspond à la partie scénarisation de HERA enrichi du contrôle des personnages virtuels autonomes. Il est composé de deux sous-modules :
    - HUMANS>>SELDON>>ADAPTOR : ce module gère la création du scénario en fonction des objectifs d'apprentissage et du profil de l'apprenant. Il détermine un scénario type avec des jalons (Kevin Carpentier) ;

[9] Les doubles chevrons indique la hiérarchie entre modules.

- HUMANS>>SELDON>>DIRECTOR : ce module oriente le scénario dynamiquement en fonction des actions de l'apprenant et des jalons déterminés par ADAPTOR. Il s'agit du module de planification décrit précédemment (Camille Barot) ;

- HUMANS>>COMMUNICATOR : ce module est l'interface entre les différents modules de HUMANS ainsi que les éléments externes (e.g. un moteur 3D).

Les modèles de HUMANS correspondent aux formalismes utilisés pour la représentation des connaissances. Ils sont la base commune de tous les modules. Ils ont donc été modélisés par l'ensemble de l'équipe. Ils sont regroupés sous l'appellation HUMANS>>HUMANS-DL (Description Language). Les trois principaux modèles sont (Figure 52) :

- HUMANS>>DOMAIN-DL (modèle de domaine) : ce modèle représente les entités du monde ainsi que leur fonctionnement ;
- HUMANS>>ACTIVITY-DL (modèle d'activité) : ce modèle permet de représenter l'activité finalisée (anciennement HAWAI-DL) ;
- HUMANS>>CAUSALITY-DL (modèle de causalité) : ce modèle permet de représenter la causalité des événements, les conséquences et les probabilités associées. Il s'agit du modèle de risques étendus à d'autres événements (autres que les risques).

Un éditeur graphique HUMANS>>EDITOR permet d'éditer chacun de ces modèles. Chaque modèle dispose d'une vue qui lui est propre et qui permet d'enrichir et de spécifier les entités du monde ainsi que les activités et causalités associées (anciennement Visual HAWAI).

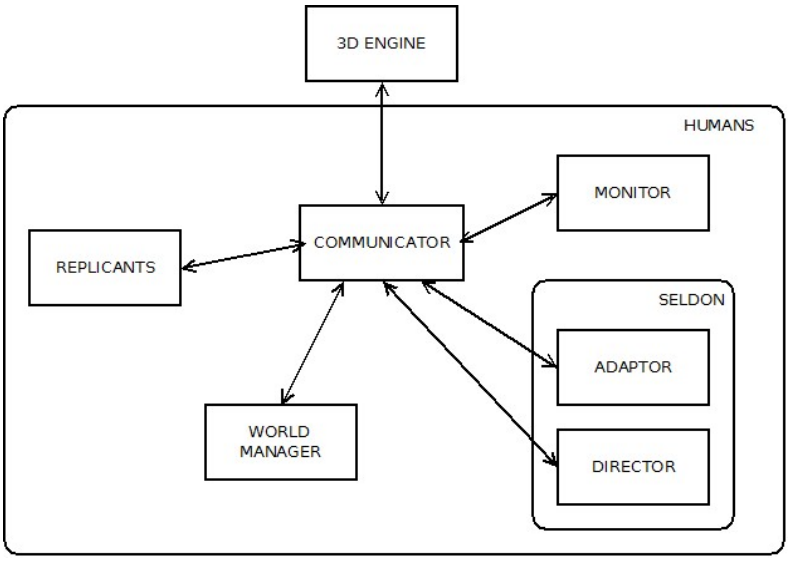


Figure 51 : Modules de HUMANS

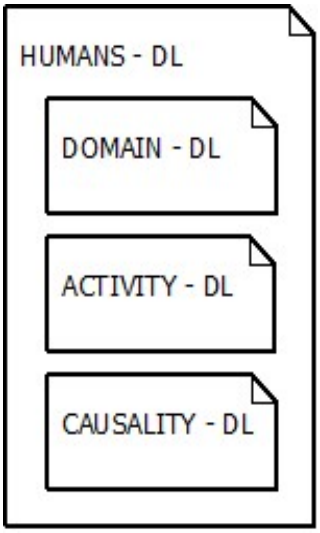


Figure 52 : Modèles de HUMANS

2.2 Organisation générale de HUMANS

L'organisation générale de HUMANS se déroule ainsi :

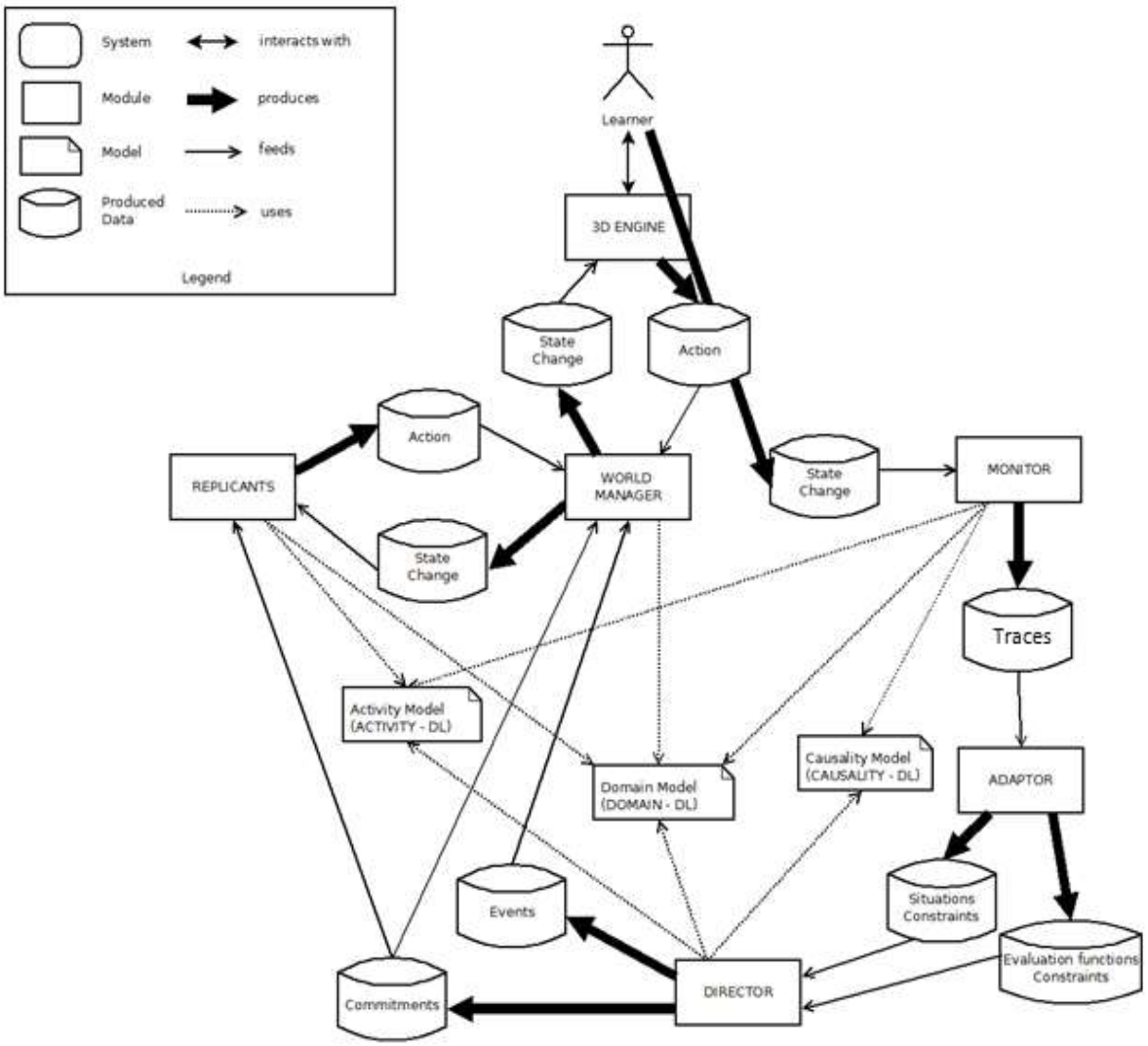


Figure 53 : Organisation générale de HUMANS

3 Perspectives

Nous souhaitons poursuivre nos travaux sur la scénarisation dynamique des situations d'apprentissage et amener les apprenants à contrôler leur apprentissage. Il ne s'agit pas d'adapter les apprenants à « *la bonne manière de faire* » mais d'adapter les situations d'apprentissage pour amener les apprenants à trouver les bons contrôles et « *leur bonne manière de faire* ». Notre objectif est de pouvoir scénariser de tels environnements virtuels pour l'apprentissage à la prise de décision dans des situations encore plus complexes où l'humain est confronté à des situations de compromis notamment en termes de risques. Nous nous intéresserons plus particulièrement à des situations telles que :

- L'acquisition de compétences décisionnelles en environnement virtuel immersif. Si les travaux menés dans ma thèse avaient permis de m'intéresser à des problématiques de réalité virtuelle immersive, les applications traitées dans les projets qui ont suivi portaient sur des environnements peu immersifs. Or, dans V3S, les travaux du CEA et l'introduction de moteurs physiques ont permis d'envisager des environnements très immersifs et des interactions naturelles. Ces aspects seront travaillés dans le projet NIKITA. Le passage à l'échelle 1 et à des interactions naturelles induisent des difficultés pour la reconnaissance de plan. L'activité effective n'est plus déduite à partir des menus, mais il faut détecter les intentions de l'utilisateur. Même si l'apprentissage du geste n'est pas au cœur de nos travaux, il s'agit de prendre en compte à la fois pour les traces et pour la scénarisation, des aspects perceptivo-gestuels (e.g. prise en compte de connaissances perceptivo-gestuelles dans ACTIVITY-DL, génération de comportements cognitifs et gestuels des personnages virtuels autonomes pour créer des situations pertinentes) ;

- La prise de risques en environnement de travail à haut risque, type sites SEVESO. Nous nous intéresserons à l'anticipation et à la notion de résilience. La résilience est la capacité de l'Homme, d'un composant, d'un groupe ou de l'environnement à récupérer ou s'adapter sans problème face à des agressions ou des perturbations externes. La prévention de risques ou de crises par anticipation permet à partir d'efforts *a priori* de déterminer un plan de gestion afin de réduire la pression sur l'opérateur humain lors de l'occurrence d'un événement déclencheur de risque ou de crise. Lorsque ces mesures d'anticipation sont insuffisantes, la résilience peut être définie comme la capacité de contrôle des risques nécessitant chez les opérateurs humains sur le terrain un degré de liberté d'action pour improviser et récupérer des situations imprévues ;
- La prise de risques dans des situations critiques de contrôle, type de conduite automobile. Ces travaux seront menés avec Jean-Marie Burkhardt, chercheur en ergonomie cognitive, avec qui nous avons développé nos modèles, puisqu'il vient de rejoindre l'INRETS (IFSTTAR) sur l'étude des simulateurs pour la formation des conducteurs automobile. Sur cette problématique, nous montons un projet européen et visons à coupler nos approches à celles sur la scénarisation pédagogique et les rétroactions épistémiques proposées par Vanda Luengo au LIG (Laboratoire d'informatique de Grenoble) ;
- La gestion du stress comme la gestion de crise ou de pré-crise, notamment des situations comme les attaques terroristes, la prise d'otage, les urgences médicales, les catastrophes naturelles, etc. Ce qui nous intéressera plus particulièrement dans ce type de situations, c'est la possibilité de mise en scène amenant des tensions dramatiques. Des travaux ont déjà démarré sur notamment la scénarisation de prises d'otages. Nous avons proposé quelques pistes de mise en scène avec des projets étudiants [Lancry et Martel, 2009] et [Barot et al., 2009]. Un travail de formalisation sera nécessaire pour pouvoir scénariser dynamiquement et de manière pertinente ces situations ;
- Le travail collectif dans sa dimension hautement collaborative, type formation au travail en équipe (e.g. coordination de secours avec des doctrines différentes, gestion de foules, chantiers et relations socio-culturelles difficiles, management d'équipe). Il ne s'agit pas de former de nombreuses personnes au management en général, mais de former une équipe à travailler ensemble sur un contexte spécifique et complexe où elle évoluera réellement par la suite. Nous nous orientons vers une approche socio-constructiviste qui consiste à ancrer l'apprentissage des compétences dans une pratique sociale. Il ne s'agit pas de cibler un fonctionnement efficace ou une organisation du travail en particulier, mais de mettre en évidence les formes de travail collectif qui sous-tendent ces fonctionnements ainsi que les compétences collectives qui contribuent à la réalisation du travail selon les critères de performance et de fiabilité en vigueur. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux aspects suivants
    - La dimension collective : il ne s'agit pas seulement de proposer des formalismes informatiques pour rendre possible au niveau informatique cette coopération. Nous nous intéresserons ici aux modèles sur le travail collectif en psychologie cognitive et notamment aux travaux de [Hoc *et al.*, 2000], [Woods *et al.*, 1994] et [Hutchins, 1995] (voir chapitre III.2.3.5) ainsi qu'aux modèles d'erreurs au sein d'un collectif et notamment les travaux de [Amalberti et Marc, 2002] (voir chapitre III.2.3.6.2) ;
    - Les interactions sociales : nous nous intéresserons aux aspects degré d'appréciation, dominance, solidarité, familiarité, etc. et à leur impact sur la désirabilité (BDI). Une première piste serait l'extension des ALU dans HAWAI-DL qui est une modélisation justement des normes sociales au sein d'un groupe. Nous nous intéresserons aux aspects intelligence collective ;
    - Les interactions culturelles : nous nous intéresserons aux liens entre émotions, personnalité, relations sociales et aspects culturels affectant la prise de décision et la compréhension des situations. Le contexte culturel d'un individu regroupe les éléments de l'environnement qui se réfèrent à une communauté d'individus et donnent un sens à la compréhension de la situation (e.g. : habitudes, coutumes, langues, accent, gestes

spécifiques, etc.). On s'intéressera aux travaux très pertinents de R.L Helmreich sur l'influence de la culture sur les comportements humains dans l'aviation et la médecine [Helmreich, 2004].

3.1 Conclusion

Les résultats obtenus au cours de ces années de recherche sont très encourageants (publications, prix, projets acceptés, etc.). L'émulation intellectuelle positive au sein des consortiums des projets est un aspect que j'aime particulièrement et le passage à l'étape européenne est en cours. Les réflexions avec des personnes d'horizons différents, notamment issues des sciences cognitives sont une grande source d'inspiration. L'apport scientifique des personnes de mon laboratoire (intelligence artificielle, représentation des connaissances, réalité virtuelle) est très dynamisant. Mais l'aspect qui est le plus stimulant pour moi est certainement, les réflexions de fond avec les ingénieurs de recherche, les étudiants, et en tout premier lieu les doctorants. Ma principale récompense est de les voir travailler sur des problématiques de recherche qui les passionnent. Les échanges scientifiques sont toujours très enrichissants. Aussi, si l'exercice auquel je viens de me prêter est de montrer que je peux encadrer des thèses, je dois avouer ici, modestement, que ce travail a été facilité par leur forte implication et leur travail pertinent. Notamment, je suis très fière de l'émulation qu'il y a eu autour de la plateforme HUMANS. Ma principale perspective est donc de pouvoir continuer à insuffler cette motivation, éveiller des vocations de chercheurs et continuer à avoir des échanges aussi productifs.

VI. ANNEXE

1 Positionnement détaillé d'HAWAI-DL

Les besoins en termes de langages sont les suivants :

- **Représentation graphique** : en informatique, nous manipulons plus aisément des graphes orientés que des arbres (graphes non orientés, acycliques et connexes). YALTA permet une représentation sous forme de graphe proche des automates. Cependant, les formalismes utilisés par les ergonomes se présentent sous forme d'arbres. Nous conservons donc cette représentation dans un premier temps ;
- **Niveaux d'abstraction** : lorsqu'il réalise une tâche, l'opérateur cherche à atteindre plusieurs buts. Ces buts sont soit des buts de plus bas niveau qui dépendent directement de la tâche de plus bas niveau réalisée, par exemple « *cadenas fermé* » est le but direct de la tâche « *fermer cadenas* », soient des buts de plus haut niveau qui ne dépendent pas directement de la tâche de plus bas niveau réalisée, par exemple « *vanne consignée* » est le but de plus haut niveau de la tâche « *fermer le cadenas* ».
    - Pour les PVA : un personnage virtuel autonome détermine des buts de hauts niveaux, et détermine pour chacun d'entre eux un plan pour y parvenir composé d'actions de plus bas niveau ;
    - Pour le suivi de l'apprenant : la détection d'une erreur de l'apprenant sur une tâche de plus bas niveau (e.g. « *ne pas fermer le cadenas* ») implique que son but de plus bas niveau n'est pas atteint (e.g. « *cadenas non fermé* »), mais aussi que son but de plus haut niveau n'est pas atteint ou mal atteint (e.g. « *vanne non consignée* »). Comment distinguer alors un but de plus bas niveau d'un but de plus haut niveau ? Et comment les relier à une tâche de plus bas niveau ?
    - Pour la conception collaborative : pour discuter sur le modèle d'activité, il est intéressant de pouvoir se placer à différents niveaux d'abstraction et pas seulement au niveau des tâches élémentaires 1) parce que sinon l'arbre ou le graphe devient illisible et/ou 2) parce que parfois on souhaite discuter des buts de haut niveau ;

  Propriété proposée : il faut donc pouvoir décrire l'activité de référence avec plusieurs niveaux d'abstraction. Les formalismes informatiques tels que les automates classiques, permettent de décrire les enchaînements de tâches élémentaires de bas niveau mais ne permettent généralement pas de décrire différents niveaux d'abstraction (hormis certaines approches en intelligence artificielle comme HTN). Les formalismes en ergonomie cognitive, tels que HTA et GTA permettent de décrire les tâches avec plusieurs niveaux d'abstraction. Dans le même esprit, HAWAI-DL permet une description hiérarchique de la tâche (Figure 54). Cette hiérarchie organise les tâches selon leurs niveaux d'abstraction. Chaque tâche mère correspond à une tâche complexe qui a comme but direct le but de plus haut niveau. Cette tâche complexe est composée de plusieurs sous-tâches qui ont le but de leur tâche mère comme but indirect (but de plus haut niveau). Ces sous-tâches peuvent être des tâches complexes ou bien des tâches simples qui représentent les feuilles de la hiérarchie. Le modèle des tâches consiste en une description formelle de la tâche accomplie par l'opérateur en situation de travail sous la forme d'une décomposition arborescente de la tâche la plus abstraite (racine) en sous-tâches jusqu'au niveau des actions (feuilles). Il s'agit de rendre compte de la logique de composition des taches, exploitable ensuite par le moteur de simulation de personnages virtuels autonomes et de suivi de l'apprenant en même temps que fournir un support facile à la compréhension et à la lisibilité, permettant ainsi à l'ensemble des participants au projet de pouvoir communiquer ;

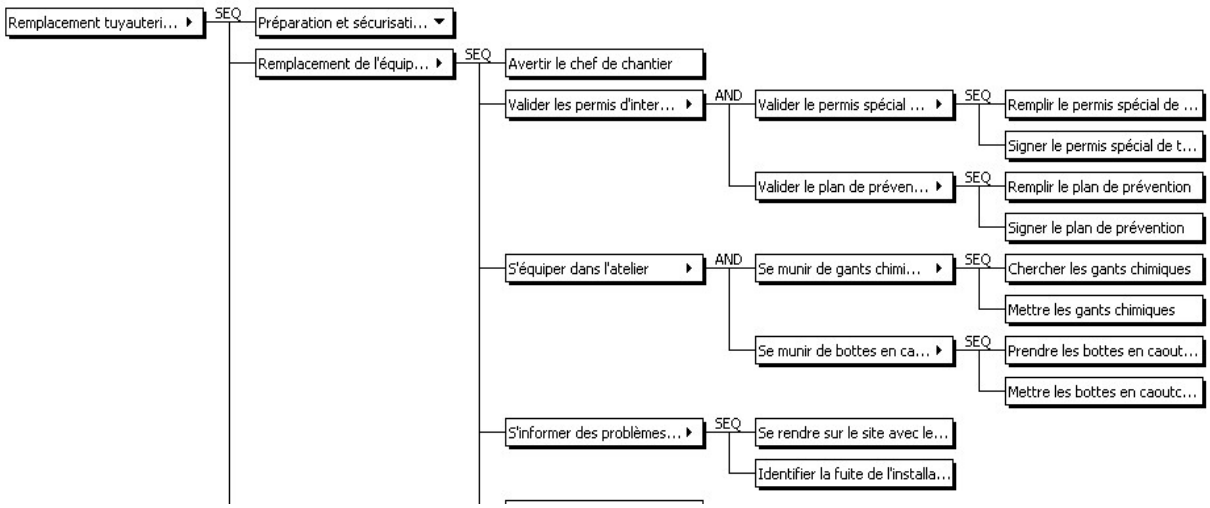


Figure 54 : Décomposition hiérarchique dans HAWAI-DL

- **Tâches indépendantes** : une procédure peut être vue comme une tâche de haut niveau décomposée en sous-tâches de niveaux inférieurs formant un arbre hiérarchique relié à une tâche mère. Cependant, la procédure principale peut être interrompue par d'autres tâches périphériques qui peuvent parfois devenir de nouvelles tâches principales. Comment prendre en compte cette distinction ? Et comment la représenter ?
    - Pour les PVA : si un événement externe ou si des caractéristiques internes (physiologie, etc.) du personnage virtuel autonome sont modifiées, ce dernier doit pouvoir interrompre sa tâche afin de sélectionner ou planifier un autre but ou plan ;
    - Pour le suivi de l'apprenant : si l'apprenant réalise une tâche qui n'est pas dans les sous-buts du but principal poursuivi, le système de suivi doit détecter s'il poursuit plusieurs buts, si le but précédent a été abandonné, si c'est une erreur, etc. ;

    Propriété proposée : nous avons intégré dans HAWAI-DL la prise en compte de tâches hiérarchiquement indépendantes. Ces tâches sont déclenchées par un événement qui se produit dans l'environnement virtuel, ou suite à la réalisation d'une sous-tâche. Par exemple, la tâche principale « changer tuyau » peut amener à la réalisation de la tâche périphérique « gérer fuite » si l'événement « fuite du tuyau » est déclenché ;

- **Caractère d'urgence/priorité** : certaines tâches ne doivent être *déclenchées* que si certains événements surviennent. Par exemple, « *éteindre un feu* » doit être réalisée si l'événement « *feu* » survient et ce, le plus rapidement possible.
    - Pour les PVA : le PVA doit pouvoir déterminer quelle tâche il doit réaliser et quel caractère d'urgence elle a (e.g. feu, fuite, etc.). Doit-il interrompre immédiatement sa tâche principale ou cela peut-il attendre un peu ? Un PVA, doté d'un système BDI (voir chapitre III.2.3.1) devrait, selon la priorité de ses buts (e.g survivre, sauver l'installation, faire son travail) savoir quelle tâche il doit gérer en priorité ;
    - Pour le suivi de l'apprenant : il s'agit de pouvoir savoir si l'apprenant réagit comme il le faut et quand il le faut ;

    Propriété proposée : ces tâches particulières n'interviennent, généralement pas dans la procédure principale ; ce sont dans ce cas des tâches mère indépendantes. Un caractère *d'urgence* (valeur numérique) permet de savoir quelle priorité donner au traitement des tâches et si la tâche principale doit être mise en suspend pour que la tâche d'urgence soit traitée ;

- **Propriété d'une tâche** : hormis le caractère d'urgence, une tâche peut être associée à d'autres caractérisques (e.g. hygiène, sécurité, politesse, etc.).

- Pour les PVA : le PVA doit pouvoir déterminer si c'est une tâche qui est en accord avec ses caractéristiques personnelles (e.g. si c'est une tâche relative à la politesse, et s'il n'est pas poli, c'est donc une tâche qu'il peut ne pas faire) ;
- Pour le suivi de l'apprenant : il s'agit de pouvoir évaluer les performances de l'apprenant sur chaque caractéristiques de l'application (e.g. critères de performance pour la politesse, l'hygiène, etc.) ;

Propriété proposée : il est possible de tagger la tâche avec un marqueur (tag). Les tags sont un ensemble de marqueurs hiérarchisés permettant d'identifier certaines tâches, conditions et/ou commentaires. Ce concept reste volontairement très ouvert, il regroupe un ensemble de flags prédéfinis et peut être enrichi à la volée par l'ergonome lors de la création du modèle d'activité, selon les besoin de l'application ;

- **Objets cibles et ressources** : une ressource est un outil qui sert à réaliser une action sur un objet cible. L'outil peut être interchangeable (e.g. plusieurs tournevis à disposition, tournevis plus gros, couteau suisse).
  - Pour les PVA : lorsqu'une ressource est nécessaire pour effectuer une tâche, le PVA doit pouvoir regarder s'il dispose de la ressource nécessaire ou de quelque chose pouvant lui servir de ressource, sinon, il peut aussi envisager un plan pour trouver la ressource nécessaire (e.g. aller à l'atelier, demander à un autre opérateur) ;
  - Pour le suivi de l'apprenant : lorsque l'apprenant réalise une tâche, le système de suivi doit pouvoir détecter si cette tâche est réalisée sur le bon objet cible et, si une ressource est nécessaire, s'il utilise la bonne ressource ou une « *sorte de* » ressource pouvant être utile pour cette tâche ou encore un outil non-approprié ;

Propriété proposée : comme dans les langages informatiques et ergonomiques, nous avons un champ « *objet cible* » et un champ « *ressources* » ;

- **Atteinte du but** : il est important de savoir si la tâche réalisée permet d'atteindre un but donné. La question est donc de savoir comment vérifier si une tâche permet d'atteindre le but souhaité ou quelle tâche permet d'atteindre tel but ?
  - Pour les PVA : les PVA, lorsqu'ils planifient leurs tâches, doivent pouvoir savoir quelles sont les tâches qui permettent d'atteindre un but. Pour reprendre un exemple précédemment cité : pour « *démonter le groupe motopompe* », la précondition de réalisation de cette tâche est « *électricité coupée* ». Si l'électricité n'est pas coupée, le PVA doit pouvoir chercher à rendre vraie cette condition, il doit pouvoir planifier ses tâches et trouver une tâche dont l'effet est « *électricité coupée* ». Cependant, il est plus facile de raisonner sur un matching de conditions et donc de trouver une tâche ayant pour effet la précondition nécessaire recherchée. Enfin, après avoir réalisé la tâche, le PVA doit pouvoir vérifier si sa tâche a été efficace ou non (e.g. fermer la porte avec une télécommande, il faut pouvoir s'assurer que la porte est bien fermée que quelque chose n'empêchait pas la fermeture) ;
  - Pour le suivi de l'apprenant : le système de suivi doit pouvoir savoir lorsque l'apprenant effectue une tâche si le but est atteint ;

Propriété proposée : nous avons proposé des effets de la tâche et des actions et événements à percevoir pour s'assurer que les effets escomptés sont réalisés :

- des effets de la tâche si celle-ci réussit ;
- des actions pour éventuellement vérifier que les conditions d'arrêt sont atteintes (e.g. pour vérifier que la porte est bien verrouillée, essayer de l'ouvrir) ;
- des événements à percevoir pour vérifier que la postcondition est atteinte (e.g. entendre un feedback sonore indiquant le verrouillage de la porte) ;

- **Conditions d'arrêt** : certaines tâche ont un effet immédiat d'autres non, certaines sont réalisées mais n'ont pas d'effet, etc. Si c'est au module de gestion du fonctionnement du système de réellement vérifier les conditions de réussite de l'action et de calculer l'effet de l'action, le modèle d'activité doit pouvoir renseigner sur les conditions d'arrêt de la tâche. Par exemple, attendre que les effets escomptés sont obtenus (e.g. si on arrose un feu, il faut arrêter l'arrosage quand le feu est éteint), parfois il s'agit d'une action à faire pendant un certain temps, ou un nombre de fois, etc.
    - Pour les PVA : ils doivent pouvoir évaluer quand ils doivent arrêter l'action. Il est possible que selon certains états (e.g. stressé, pressé), ils n'attendent pas l'obtention du résultat mais fasse l'action pendant un certain temps ou un nombre de fois, etc. ;
    - Pour le suivi de l'apprenant : il est intéressant de pouvoir savoir si l'apprenant a réalisé assez longtemps ou le bon nombre de fois, l'action pour réussir la tâche. Mais parfois, il est juste important de savoir si l'apprenant a réalisé la tâche prescrite ;

    Propriété proposée : nous distinguons plusieurs types de conditions d'arrêt :

    - des conditions d'arrêt sur les conséquences : on attend que les résultats (effets) escomptés soient obtenus pour arrêter la tâche ;
    - des conditions d'arrêt sur les tâches : ces conditions d'arrêt évaluent les propriétés de la tâche en cours afin de déterminer si la tâche doit être arrêtée ou non (assertion sur le monde, nombre d'itération, durée, etc.). Dans le cas des tâches mères, ces conditions peuvent également tester l'état de réussite ou d'échec des tâches filles pour déterminer la réussite ou l'échec, et donc l'arrêt, de la tâche en cours (selon les constructeurs/opérateurs logiques de la tâche mère) ;

- **Tâches relatives aux buts principaux** : certaines tâches correspondent au focus de la tâche de plus haut niveau. Prenons un exemple concret : un retrait d'argent dans les anciens distributeurs. Le but évident sera de prendre de l'argent. Le déroulement généralement observé de cette activité était que les personnes une fois l'argent pris oubliaient de reprendre la carte de crédit. En décrivant cette activité avec un ensemble de tâches hiérarchiques (*mettre la carte de crédit, taper le code, préciser le montant, prendre l'argent, prendre la carte de crédit*), la tâche « *prendre l'argent* » est la tâche focus. C'est la tâche principale qui permet d'atteindre le but voulu et les autres tâches étaient « oubliées ». La procédure des distributeurs a maintenant été modifiée, et il faut prendre la carte de crédit avant de pouvoir obtenir les billets.
    - Pour les PVA : nous souhaitons rendre compte de comportements distraits ou lorsque la charge cognitive est trop importante et montrer que le PVA pourrait oublier de reprendre sa carte de crédit ;
    - Pour le suivi : il s'agit de pouvoir expliquer que la tâche oubliée est une tâche n'entrant pas dans le focus principal du but de plus haut niveau ;
    - Propriété proposée : comme dans GTA, nous avons conservé le champ **focus** de la tâche qui correspond à la propriété sous-tâche principale du but de plus haut niveau.

VII. Fiche d'activité

Unité de recherche d'appartenance

UMR CNRS 7253, HEUDIASYC (Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes)
Université de Technologie de Compiègne (UTC)

Nom : LOURDEAUX
Prénom : Domitile
Date de naissance : 03/01/1973
Courriel : domitile.lourdeaux@hds.utc.fr

Enseignant-chercheur ☑ HDR ☐ Corps-grade : MCF
Bénéficiaire de la PEDR

Domaine scientifique principal :
[x] Sciences et technologies de l'information et de la communication

Rattachement scientifique :
Section du CNU : 27

1 Production scientifique :

1.1 Chapitres de livre

1. Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., Couix, S., & Rouillé, M. La modélisation de l'activité finalisée. *Le traité de la réalité virtuelle*. Fuchs, P. Moreau, G., Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, series: sciences mathématiques et informatiques, mines Paris, 3e édition, vol. 5, « Les humains virtuels » sus la coordination de Donikian, S. ISBN 978-2-911256-00-4. 2009.
2. Lourdeaux, D., & Burkhardt, J.-M. chapter: Usages de l'humain virtuel pour la formation. *Le traité de la réalité virtuelle*. Fuchs, P. Moreau, G., Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, series: sciences mathématiques et informatiques, mines Paris, 3e édition, vol. 5, « Les humains virtuels » sus la coordination de Donikian, S. ISBN 978-2-911256-00-4. 2009.
3. Burkhardt, J.M., & Lourdeaux, D., & Mellet d'Huart, D. La conception des environnements virtuels pour l'apprentissage. *Le traité de la réalité virtuelle*. Fuchs, P. Moreau, G., Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, series: sciences mathématiques et informatiques, mines Paris, 2e édition, vol. 4 « Les applications de la réalité virtuelle », sous la coordination de Arnaldi, B. et de Guitton, P. ISBN 2-911762-62-2. 2006.
4. Burkhardt, J.M., & Lourdeaux, D., & Mellet d'Huart., D. La conception des environnements virtuels pour l'apprentissage. *Le traité de la réalité virtuelle*. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 1ère édition, 2 volumes, ISBN 2-911762-47-9 et 2-911762-48-7, 915 pages, septembre 2003.

1.2 Revues internationales avec comité de lecture

5. Barot, C., Lourdeaux, D. Burkhardt, J.M, Amokrane, K. &Lenne, D. Creating generic and adaptive Virtual Training Environments around human factors and ecological situations. *Presence* (article accepté).
6. Jones, H., Saunier, J. & Lourdeaux, D. On the use of fuzzy rules to compute events perception and emotions in an agent architecture. *EAAI: Engineering Applications of Artificial Intelligence, the International Journal of Intelligent Real-Time Automation*, Elsevier (article soumis mars 2012).
7. Amokrane, K., & Lourdeaux, D. A Learner Tracking System in a Virtual Environment for SEVESO Sites. International Journal of Artificial Intelligence in Education. (Article soumis mars 2012).
8. Edward, L., Lourdeaux, D., Barthes, J.P., Lenne, D., & Burkhardt, J.M. Modelling autonomous virtual agent behaviours in a virtual environment for risk. *IJVR : International Journal of Virtual Reality*, IPI Press ISSN 1081-1451, Volume 7, number 3, pp 9-22,September 2008.

9. Amokrane, K. Lourdeaux, D., & Burkhardt, J.M. *HERA: Learner Tracking in a Virtual Environment. IJVR : International Journal of Virtual Reality*, IPI Press ISSN 1081-1451, Volume 7, number 3, pp 23-30, September 2008.
10. Bouslimi, W., Kassaagi M., Lourdeaux, D., & Fuchs, P. Modelling Driver Behavior in a Straight-Line Emergency Situation. N° 2005-01-2700, P 743 – 751, revue *SAE 2005 Transactions Journal of Passenger Cars: Electronic and Electrical Systems*, editor SEA International, 2005.
11. Lourdeaux, D., Burkhardt, J.M., Bernard, F., & Fuchs, P. Relevance of an intelligent agent for virtual reality training. *International Journal of Continuous Engineering and Life-long Learning*. Volume 12, n° 1/2/3/4 2002.
12. Fuchs, P.,Nashashibi, F., & Lourdeaux, D. Three levels of Immersion and Interaction in a Approach of the VR Design. *International Journal of design and Innovation Research*, pp. 30-42, vol. 2,, juin 2000.

1.3 Revues nationales avec comité de lecture

13. Lhommet, L., Lourdeaux, D., & Barthès, J-P. Foule sentimentale : influence des caractéristiques individuelles sur la contagion émotionnelle dans une foule informatique. *Revue d'Intelligence Artificielle 2012*, vol. 26 num. 3, pp.281-308, 2012.
14. Edward, L., Lourdeaux, D., & Barthès, J.-P. Une architecture cognitive pour la simulation de comportements d'agents autonomes. Intégration de facteurs physiques, physiologiques et de personnalité. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 24, num. 5, pp. 673-694, 2010.
15. Burkhardt, J.M., & Bardy, B., & Lourdeaux, D. Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels, Psychologie Francaise, 48-2, 35-42. 2003.

1.4 Conférences internationales sélectives (< 30%)

16. Carpentier, C., and Lourdeaux, D. and Mouttapa-Thouvenin. Dynamic selection of learning situations in virtual environment. ICAART 2012: International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Barcelona, 15-18 february, 2013.
17. Barot, C. and Lourdeaux, D. and Lenne, D. Dynamic scenario adaptation balancing control, coherence and emergence. ICAART 2012: International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Barcelona, 15-18 february, 2013.
18. Barot, C., Burkhardt, J.M, Lourdeaux, D., & Lenne, D. V3S, a virtual environment for risk management training. In *Joint Virtual Reality Conference of EuroVR - EGVE (JVRC 2011)*, pp95-102. Nottingham UK, 20-21 September 2011. (**Prix du Best Paper**).
19. Lhommet, M., Lourdeaux, D., & Barthès, J.B. Never alone in the crowd: a microscopic crowd model based on emotional contagion. In *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT 2011)*, pp89-92. IEEE Press, Lyon France, 2011.
20. Lhommet, M., & Lourdeaux, D. Taking into account emotions in mixed human/agent systems for improving collaborative work. In *Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD 2011)*, pp. 854-857, Lausanne, Suisse, , July, 2011
21. Saunier, J., Jones, H., & Lourdeaux, D. Empathy and Placebo for Autonomous Agents In *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT 2010).* Toronto Canada, vol. 02, pp. 277-282, ed.: IEEE Computer Society, IEEE, WIC, ACM, August 31th - September 3rd, 2010.
22. Edward, L., Amokrane, K. & Lourdeaux, D. Knowledge representation: an ontology for managing a Virtual Environment. In *International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2010)*, pp. 332-335. Valencia 22-24 January, 2010
23. Amokrane, K., & Lourdeaux, D. Pedagogical System in Virtual Environments for High-risk sites. In *International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2010)*, pp. 371-376. Valencia, Spain, 22-24 January, 2010
24. Jones, H., Saunier, J. & Lourdeaux, D. Personality, emotions and physiology in a bdi agent architecture: the pep -> bdi model. In *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT 2009)*, pp. 263-266. IEEE Press, 2009

25. Saunier, J., Jones, H., & Lourdeaux, D. I feel what you feel: empathy and placebo mechanisms for autonomous virtual humans. In *Intelligent Virtual Agents 2009 (IVA 2009)*. volume 5773 of LNCS, pp. 323-329. Springer-Verlag, 2009.
26. Edward, L., Lourdeaux, D., & Barthès, J.P. Virtual Autonomous Agents in an Informed Environment for Risk Prevention. In *Intelligent Virtual Agents 2009 (IVA 2009)*, volume 5773 of LNCS, pp. 496-497, Springer-Verlag, 2009.
27. Edward, L., Lourdeaux, D., & Barthès, J.P. Cognitive Modeling of Virtual Autonomous Intelligent Agents Including Human Factors. In *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT 2009)*, pp. 353-356. IEEE Press, 2009
28. Edward, L. Lourdeaux, D., & Barthès, J.P. Human Factors Affecting Decision in Virtual Operator Reasoning. In *Brain Informatics: International Conference, BI2009,* N. Zhong et al. (Eds.): BI 2009, LNAI 5819, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Lecture Notes in Computer Science, *pp. 84-95.* Beijing, China, October, 22-24 2009.
29. Amokrane, K., & Lourdeaux, D., Virtual Reality Contribution to training and risk prevention. In *International Conference on Artificial Intelligence (ICAI 2009)*, pp. 726-732. July 13-16 , 2009, Las Vegas, USA, 2009.
30. Amokrane, K., Lourdeaux, D., & Burkhardt, J.M. Learning and Training in virtual environment for risks. In *20th IEEE Int'l Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2008)*, pp. 185-193. November 3-5, 2008, Dayton, Ohio, USA, 2008.
31. Bouslimi, W. and Kassaagi, M. Lourdeaux, D. and Fuchs, P. Augmented Naïve Bayesian Network for Driver's Behavior Modeling. In2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Conference Program, Las Vegas, June 7, 2005.
32. Bouslimi, W. and Kassaagi, M. and Lourdeaux, D. and Fuchs, P. Methodology for modeling driver behavior in emergency situations: bayesian networks vs fuzzy logic. In *FISITA 2004*, Barcelone, 4-5 may 2004.

1.5 Conférences internationales (selection >30% ou inconnue)

33. Jones, H., Saunier, J. & Lourdeaux, D. Fuzzy Rules for Events Perception and Emotions in an Agent Architecture. In *The 7th conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT-2011)*. Aix-les-Bains, France, 18-22 july 2011.
34. Edward, L., Lourdeaux, D., & Barthès, J.P. An Action Selection Architecture for Autonomous Virtual Agents. In *International Conference on Computational Collective Intelligence - Semantic Web, Social Networks & Multi-agent Systems (ICCCI 2009), ed. in* Challenges in Computational Collective Intelligence" (published in Springer series Studies in Computational Intelligence), pp. 269-280. Wroclaw, Pologne, October 5-7, 2009.
35. Edward, L., Amokrane, K., Lourdeaux, D., & Barthès, J.-P. An Ontology for Managing a Virtual Environment for Risk Prevention. In *International Conference on Integrated Intelligent Computing (ICIIC 2010)*, Bengalore Inde, pp. 62-67, ed.: IEEE Computer Society, IEEE, August 4-6, 2010.
36. Edward, L. Lourdeaux, D., Barthes, J.P., Lenne, D., & Burkhardt, J.M. Modelling autonomous virtual agent behaviours in a virtual environment for risk. In *International Conference on Intelligent Virtual Environments and Virtual Agents (IVEVA 2008)*. Nanjing, China, June 26-27, 2008.
37. Amokrane, K. Lourdeaux, D., & Burkhardt, J.M. HERA: Learner Tracking in a Virtual Environment. *International Conference on Intelligent Virtual Environments and Virtual Agents (IVEVA 2008).* Nanjing, China, June 26-27, 2008
38. Amokrane, K. Lourdeaux, D., Burkhardt, J.M. Learner behavior tracking in a Virtual Environment. In *Virtual Reality International Conference (VRIC 2008).* Laval Virtual France, April, 2008.
39. Edward, L., Lourdeaux, D., Barthes, J.P., & Burkhardt, J.M. MASVERP: A Multi-agents System for Safety Interventions on SEVESO Sites. In *Satellite Workshop of the European Conference on Complex Systems,* Germany, October 2007

40. Edward, L., Lourdeaux, D., Lenne, D., & Barthes, J.P. Multi-Agents Approach for Modelling Safety Interventions on a SEVESO Site through Virtual Reality. In *Virtual Concept 2006*, Cancun, Mexico, November 2006.

41. Lourdeaux, D., Stanciulescu, B., & Fuchs, P. Collaborative decision in shared environments: Airport management application. In *Virtual Concept 2005*, Biarritz, 8-10 november 2005.

42. Bouslimi, W., Kassaagi, M., Lourdeaux, D., & Fuchs, P. Modeling driver behavior in a straight-line emergency situation. In *Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium.* Iowa City, Iowa, USA. June 14-16 2005.

43. Lourdeaux, D., Burkhardt, J.M., Mellet d'Huart, D. and *al.* APLG Project: a library for Learning Virtual Environments. In *Virtual Reality International Conference (VRIC 2005)*. Laval : France, april, 2005.

44. Stanciulescu, B., Lourdeaux, D., Fuchs, P. Visuairport project: a 3d mobile equipement for airport ground activities management. In *Virtual Reality International Conference (VRIC 2005)*. Laval, France, april, 2005.

45. Stergiopoulos, P., Moreau, G., Lourdeaux, D., & Fuchs, P. Collision detection for haptic interaction with solid object for virtual prototype. In *Virtual Reality International Conference (VRIC 2002)*. Laval, France, juin 2002.

46. Lourdeaux, D., Fuchs, P., & Burkhardt, J.M, An intelligent tutorial agent for training virtual environments, In *5th world multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2001)*, Orlando, Floride, juillet 2001.

47. David, P., & Lourdeaux, D. A simulator using Virtual Reality techniques for training driver to manual interventions on the tracks. In *World Conference on Railway Research (WCRR 2001)*. Cologne, Allemagne, 2001.

48. Lourdeaux, D., & David, P. SOFI : virtual system for track operation training. In *World Conference on Railway Research (WCRR 199)*. Tokyo, Japon, 1999.

49. Fuchs, P., Nashashibi, F., Lourdeaux, D. A therorical approach of the design and evaluation of a virtual device. In *Colloque scientifique international « Réalité Virtuelle et prototypage »* (GTRV'99), Laval, Fance 1999.

1.6 Conférences nationales (avec comité de lecture)

50. Barot, C., Lourdeaux, D., Lenne, D. & Burkhardt, J.M. V3S, un environnement virtuel pour la formation à la maîtrise des risques. In *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH 2011), Atelier IHM avancées pour l'apprentissage*, Mons, Belgique, May, 2011.

51. Lhommet, M., Lourdeaux, D., & Barthès, J.B. De l'individu à la foule : un modèle informatique de contagion émotionnelle. In *Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle (RJCIA 2011)* pp. 949-962. Presses de l'Université des Antilles et de la Guyane. Chambery, Suisse, May 16-21th, 2011.

52. El-Mawas, N., Edward, L., Lourdeaux, D. & Barger, P. Validation d'algorithmes de décision à l'aide des réseaux de Petri. In *MAnifestation des JEunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (Majestic, 2010)*. Bordeaux, France, October 13-15th, 2010.

53. Jones, H., Saunier, J., & Lourdeaux, D. Vers une intégration des facteurs physiologiques, de personnalité et d'émotion dans les agents cognitifs. *Rencontres Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle 2009 (RJCIA 2009)*, Hammamet, Tunisie, May, 25-29th, 2009

54. Olive, J., Thouvenin, I., Lourdeaux, D., & Sbaouni, M. Formation aux techniques industrielles à l'aide des environnements virtuels. In *10ème Colloque Nationnal AIP-PRIMECA : "Les Innovations en Conception des Produits et des Systèmes de Production"*, La Plagne, France, April, 18-20th, 2007.

55. Burkhardt, J.M., Lourdeaux, D., & Lequatre, F. Environnements Virtuels pour l'Apprentissage : de l'image d'Epinal à la réalité des usages et des configurations socio-techniques. In *Interface Homme-Machine (IHM 2005)*, France : Toulouse, 27-30 septembre 2005.

56. Burkhardt, J.M., Lourdeaux, D., & Fuchs, P. Conception d'un système de RV pour la formation des agents de conduite aux opérations en milieu ferroviaire. In *Colloque Réalité Virtuelle et Cognition,*

Paris, décembre 1999.

57. David, P., & Lourdeaux, D. Une application de la réalité virtuelle dans le domaine de la formation à la SNCF. In *Complex Systems, Intelligent Systems & Interfaces (Nîmes'98),*. Nîmes, 1998.

1.7 Revues nationales sans comité de lecture

58. Lourdeaux, D. Réalité virtuelle et formation. Techniques de l'ingénieur, TE 5 975v2, août 2012.

1.8 Conférences nationales (sans comité de lecture)

59. Fricoteaux, L., Mouttapa Thouvenin, I., Lourdeaux, D., Pourplanche, A., & Hissel, F. Guidage Auto-Adaptatif par des Métaphores de Visualisation pour l'Apprentissage à la Navigation Fluviale en Environnement Virtuel Informé. In *5èmes journées de l'AFRV*, Orsay, France, pp. 53-58, 2010.

1.9 Articles de vulgarisation

60. Lourdeaux, D. Réalité Virtuelle et Formation. *Techniques de l'ingénieur, Collection « Le traitement du signal et ses applications »*. TE5975. 30 pages (à paraître août 2012).

61. Lourdeaux, D. V3S : un environnement virtuel pour la formation à la maîtrise des risques. *Revue I-Mag de l'ENSIMAG*. 2 pages (à paraître juin 2012).

62. V3S. *Cad_magazine* Numéro mars-avril 2010. Issn : 1134- 541 x.

63. V3S. *Journal du CNRS*. Numéro 219, avril 2010

2 Projets

Parmi les projets sur lesquels j'ai travaillé, je coordonne ou ai coordonné les projets et thèse suivantes :

Bourse de thèse DGA		
Type	:	Bourse de thèse 100% DGA (octobre 2009 – octobre 2012)
Objectif	:	Emergence des comportements de groupe et modélisation des foules et des populations pour la simulation interactive
Encadrement	:	Thèse de doctorat (M. Lhommet) sujet rattaché au projet SAGECE
NIKITA : Natural Interaction, Knowledge, Immersive system for Training in Aeronautic		
Type	:	Projet ANR/CONTINT (2011- 2014).
Objectif	:	Proposer des modèles informatiques pour la formation dans le domaine aéronautique. Ce projet s'intéresse à quels contenus et quelles interactions pour favoriser les apprentissages.
Encadrement	:	A venir : thèse de doctorat, 3 h/an ingénieurs recherche, stages, projets d'UV, vacations étudiants
Partenaires	:	**Heudiasyc** UMR 7253 de l'UTC est coordonnateur du projet et je suis **chef de file**. Les autres partenaires sont le CEA-LIST, LATI (Univ. Paris Descartes), EADS, EMISSIVE.
ARAKIS : Scénarisation d'environnements virtuels pour la formation à la maîtrise des risques à base de jeux sérieux		
Type	:	Projet financé par le conseil régional de Picardie (2010- 2013).
Objectif	:	Proposer des scénarisations attrayantes des situations d'apprentissage en lien avec les objectifs de formation visés. Proposer des modèles informatiques pour construire et adapter dynamiquement les environnements support de l'activité de façon cohérente avec les objectifs visés
Partenaires	:	**Heudiasyc** UMR 7253 de l'UTC est coordonnateur du projet et je suis **chef de file**.

		Les autres partenaires sont l'INERIS et le LATI (Univ. Paris Descartes). L'APTH, CICR, SI-GROUP, TICN, EXXON-MOBIL participent aussi à ce projet.
V3S : Virtual Reality for Safe Seveso Subcontractors		
Type	:	Projet ANR/RNTL (2007- 2010).
Objectif	:	Proposer des modèles informatiques pour la simulation des situations de travail dangereuses touchant aux activités de maintenance réalisées par des entreprises extérieures sur des sites Seveso. Ce projet couple les problématiques de modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes et d'ingénierie des connaissances dans les environnements virtuels. http://www.v3s.fr (voir vidéos)
Partenaires	:	**Heudiasyc** UMR 7253 de l'UTC est coordonnateur du projet et je suis **chef de file**. Les autres partenaires sont l'INERIS, le CEA-LIST, LATI (Univ. Paris Descartes), EbTrans, APTH, CICR, SI-GROUP, TICN, SEEMAGE remplacé par EMISSIVE.
FIANNA : FormatIon au mANagemeNt des risques en réAlité Virtuelle		
Type	:	Projet financé par le conseil régional de Picardie (décembre 2006-décembre 2009).
Objectif	:	Interpréter les comportements de l'apprenant et scénariser l'environnement virtuel. L'originalité est de proposer une interprétation du comportement de l'apprenant et lui fournir une explication sur les conséquences de ses décisions.
Partenaires	:	**Heudiasyc** UMR 7253 de l'UTC est coordonnateur du projet et je suis **chef de file**. Les autres partenaires sont l'INERIS et le LATI (Univ. Paris Descartes).
SIMSECUR : plateforme de simulation pour la Sécurité Globale		
Type	:	Abondement CARNOT TIE et CNRS (PEPS) (janvier 2008 – janvier 2010).
Objectif	:	Contribuer au développement d'un outil de réalité virtuelle permettant de scénariser des personnages virtuels autonomes pour permettre à des acteurs de la sécurité globale de simuler des moyens de contrôle des personnes et des biens dans des installations critiques**.** Ce projet vise, en autre à simuler des comportements terroristes.
Partenaires	:	**Heudiasyc** UMR 7253 de l'UTC (coopération entre domaines ICI et ASER). Ce projet est en collaboration avec le CEA-LIST.
Modélisation des conducteurs sur SIMNAV : SIMulateur pour la NAVigation fluviale		
Type	:	Projet financé par le CETMEF (2008)
Objectif	:	Etude pour la modélisation de conducteurs de péniche dans le but de modéliser des conducteurs virtuels autonome dans le simulateur SIMNAV.
Partenaires	:	**Heudiasyc** UMR 7253 de l'UTC et CETMEF.
APLG : Atelier Pédagogique Logiciel Générique		
Type	:	Projet RIAM (décembre 2003 – décembre 2006).
Objectif	:	Proposer une bibliothèque logicielle pour la réalité virtuelle pour le suivi de l'apprenant, la détection d'erreur et les feedback pédagogiques.
Partenaires	:	ARMINES/**Ecole des Mines de Paris**, le LEI univ. Paris V, le LIUM univ. du Mans, l'AFPA, CLARTE, la SNCF, CS et Daesign. J'étais coordinateur et **chef de file** pour l'Ecole des Mines de Paris. J'ai continué à piloter ce projet à mon arrivée à Heudiasyc UMR 7253 de l'UTC.

Par ailleurs, je participe ou ai participé aux projets suivants :

CRAKEN : Collective intelligence for multicultuRal Activities in Knowledge based virtual Environments

Type	:	Projet déposé FUI14 pôle Images et Réseaux..
Objectif	:	Concevoir un environnement virtuel type serious game pour la formation d'équipes projets dirigeant des opérations industrielles complexes et difficiles sur les quatre aspects suivants à la fois : « Connaissance générale du produit », « Connaissance générale de l'outil industriel », « Connaissances clefs en management de projet interculturel » et « Connaissances clefs de la gestion d'équipe collaborative ».
Partenaires	:	Heudiasyc UMR 7253 de l'UTC, **DCNS (coordonateur),** LABSTICC UMR3192, CRF CNAM Paris (EA1410), Daesign, I-MAGINER, ECAM, ENSTA Bretagne.
SIMADVF : Formation à la garde d'enfants en environnement virtuel d'Assistantes De Vie		
Type	:	Projet financé par la DGCIS (janvier 2010 – janvier 2012), AAP serious games. Ce projet avait été initié en 2006 par l'AFPA et Heudiasyc.
Objectif	:	Concevoir un environnement virtuel type serious game pour la formation des assistantes de vie de famille et plus particulièrement pour la l'apprentissage des activités touchant à la sécurité dans la garde à domicile des jeunes enfants.
Partenaires	:	Heudiasyc UMR 7253 de l'UTC, AFPA, **VirtuoFacto (coordonateur)**.
OSE : fOrmation pour le tranSport fluvial par Environnement virtuel informé		
Type	:	Projet financé par le conseil régional de Picardie (2009- 2012).
Objectif	:	Modélisation d'un environnement virtuel informé pour la capitalisation des connaissances dans l'aide à la sûreté en navigation fluviale
Partenaires	:	**Heudiasyc** UMR 7253 de l'UTC, CETMEF, Reviatech.
PERF-RV2 : L'humain virtuel au travail dans l'usine du futur		
Type	:	Plateforme ANR/RNTL (décembre 2005 – décembre 2008).
Objectif	:	Proposer des approches de modélisation et de contrôle permettant une interaction en temps réel entre humains réels et humains virtuels au sein d'une usine.
Partenaires	:	Perf RV2 regroupe 21 partenaires industriels et universitaires. L'UTC apparaît dans cette plateforme comme sous-traitant de l'Ecole des Mines de Paris.
SAGECE : Simulation pour l'Amélioration de la formation à la GEstion de CrisE		
Type	:	Projet ANR/sécurité globale (mars 2008 – mars 2010).
Objectif	:	Développer un outil de simulation interactive d'exercice de crise NRBC à l'intérieur de bâtiment public ou industriel, pour la formation des primo intervenants (simulation de foules).
Partenaires	:	Heudiasyc UMR 7253, CEA-LIST, EADS, ECI, **Sogitec**, ENSOSP, EMI, IRSN, AREVA
INTUITION		
Type	:	Réseau d'Excellence Européen en Réalité Virtuelle (2004-2008) 6ème Programme Cadre Européen de Recherche et Développement Technologique
Objectif	:	Participation au groupe de travail 2.9 (Training)
Partenaires	:	60 partenaires européens dont ARMINES (Ecole des Mines de Paris)
LAB		
Type	:	Thèse CIFRE et contrat d'accompagnement de thèse financé par le Laboratoire d'Accidentologie et de Biomécanique PSA/Renault (2003-2006).
Objectif	:	Modéliser le comportement conducteur en situation accidentogène

Partenaire	:	Ecole des Mines de Paris, LAB et PSA
PERF-RV : PlatEfoRme Française de Réalité Virtuelle		
Type	:	Projet RNTL (2001-2004)
Objectif	:	Concevoir des logiciels pour les interfaces haptiques pour des études ergonomiques.
Partenaires	:	30 partenaires et collaboration étroite avec le CEA-LIST et PSA

Les projets sur lesquels j'ai travaillé sont parfois répartis sur plusieurs axes scientifiques avec depuis 2006 un axe principal autour de la représentation des connaissances :

Projets	Fin	1. Représentation des connaissances	Suivi de l'apprenant		Personnages virtuels autonomes		6. Conception
			2. Traces	3. Scénarisation a	4. Individuels	5. Collectifs	
CRAKEN	2015	X		X		**X**	
NIKITA	2014	X	**X**	**X**	X	X	
ARAKIS	2013	X	X	**X**	X		
Thèse DGA	2012	X				**X**	
V3S	2010	X		X	**X**		
SAGECE	2010	X				**X**	
SIMADVF	2011	X	**X**	**X**	X		
SIMSECUR	2009	X				**X**	
OSE	2012	X	X	**X**			
FIANNA	2009	X	**X**	**X**			
PERF-RV2	2008	**X**	**X**	**X**			
SIMNAV	2008	X			X		
APLG	2006	**X**	**X**				x
LAB	2006				X		
PERF-RV	2004						X
Thèse	2001		X	X			X

Figure 55 : Répartition des projets par axes scientifiques

L'importance et l'orientation des axes scientifiques sur lesquels j'ai travaillé peut se mesurer au nombre de projets s'y rapportant (figure 2). Comme nous l'avons dit précédemment l'axe sur les méthodologies de conception d'environnements virtuels pour l'apprentissage humain a laissé le pas à d'autres axes : tout d'abord les traces depuis 2003, puis la scénarisation adaptative depuis 2007, les comportements individuels de personnages virtuels autonomes depuis 2008 et récemment les comportements collectifs (2009). La représentation des connaissances reste un axe transversal. Aujourd'hui, nous nous orientons fortement sur la scénarisation adaptative et les comportements de personnages virtuels autonomes.

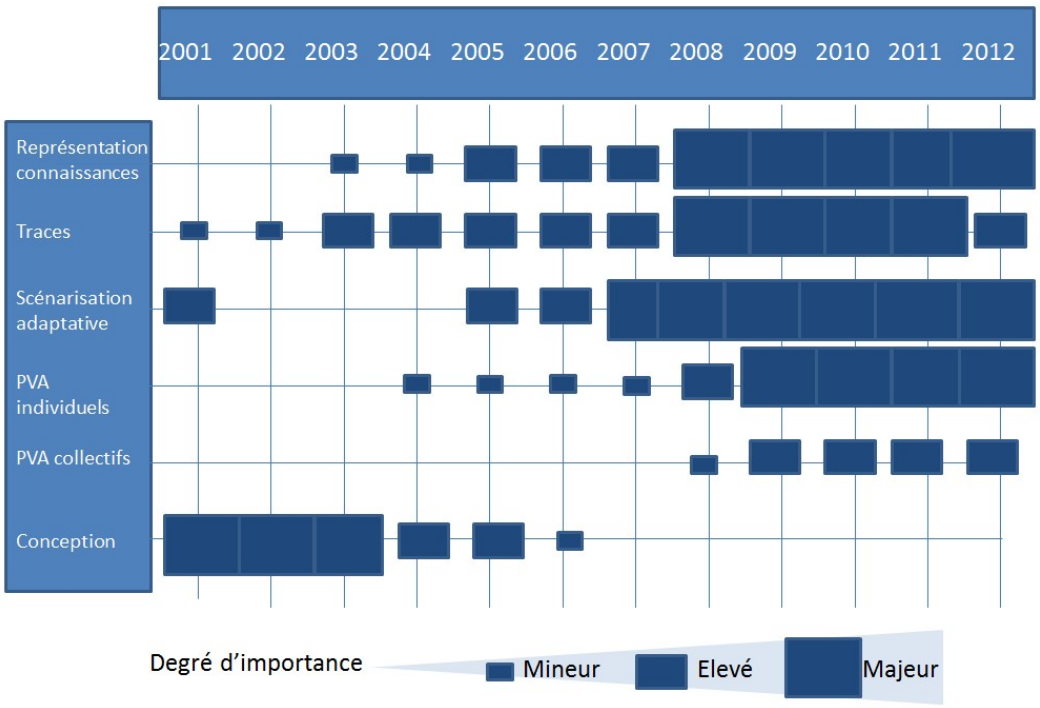


Figure 56 : Degré d'importance des verrous par an

3 Encadrements

3.1 Encadrement de thèses

- **Kevin Carpentier** (démarrage 08/11) « Adaptation dynamique de situations d'apprentissage dans des environnements virtuels immersifs pour des activités collectives décisionnelles et perceptivo-gestuelles » Thèse de doctorat en Informatique à l'UTC. .
- **Camille Barot** (démarrage 09/10) « Scénarisation d'environnements virtuels pour la formation : vers un équilibre entre contrôle, cohérence et émergence ». Thèse de doctorat en Informatique à l'UTC. Co-encadrant : D. Lenne (50%) (4 publications).
- **Margaux Lhommet** (soutenue le 11/12) « REPLICANTS : humains virtuels cognitifs, émotionnels et sociaux. De l'empathie cognitive à l'empathie affective ». Thèse de doctorat en Informatique à l'UTC. Co-encadrant : JP Barthès (50%). (4 publications).
- **Lydie Edward** (soutenue le 05/11) « Modélisation décisionnelle de personnages virtuels en Environnements virtuels pour la prévention de risques ».Thèse de doctorat en Informatique à l'UTC. Co-encadrant : JP Barthès (50%). (10 publications).
- **Kahina Amokrane** (soutenue le 02/10) « Suivi de l'apprenant *en environnement virtuel pour la prévention des risques* ». Thèse de doctorat en Informatique à l'UTC. Co-encadrant : JP Barthès (50%). (9 publications).

3.2 Suivi scientifique de thèses

J'assure ou ai assuré le suivi scientifique de manière très soutenue de :

- **Wajih Bouslimi** (soutenue le 01/06) « Modélisation du comportement des conducteurs dans des situations d'urgence ». Thèse de doctorat en Informatique temps réel, automatique et robotique à l'Ecole des Mines de Paris. Encadrant : P. Fuchs (100%). (4 publications).

J'ai aussi suivi, de manière plus éparse, dans le cadre du projet APLG, la thèse de Naïma El-Kechaï sur le suivi et assistance des apprenants dans les environnements virtuels de formation.

3.3 Encadrement de postdoctorants et ingénieurs de recherche

- Kahina Amokrane, ingénieur de recherche (depuis mars 2010).

- Lydie Edward, ingénieur de recherche (mai à décembre 2011).
- Jocelyn Thiery, ingénieur de recherche (octobre 2010 à décembre 2011)
- Hazaël Jones, postdoctorat puis ingénieur de recherche (janvier 2009 à janvier 2011) (5 publications).
- Julien Saunier, postdoctorat (septembre 2008 à août 2009) (5 publications).
- Morgan Fraslin, ingénieur de recherche (septembre 2008 à décembre 2008).
- Mehdi Sbaouni, ingénieur de recherche (mars 2008 à juillet 2008).
- Amel Ben Ayed, ingénieur d'étude (novembre 2007 à juillet 2008).

3.4 Encadrement stages master et/ou fin d'études

J'ai encadré plusieurs stage de master recherche et de fin d'études : Yasmine Mokkadem (2012), Nabil Hammami (2011), Jocelyn Thiery (2010), Dorine Dufour (2010), Nour El-Mawas (2010) (1 publication), Alassane Diallo (2009), Farid Graïne (2009), Racha Ali (2008), Pierre-Yves Gicquel (2008), Julien Mehreb (2006), etc. J'ai aussi encadré de nombreux projets étudiants à l'UTC sur nos domaines de recherche.

4 Rayonnement

4.1 Comités scientifiques

- Membre du comité scientifique TICE2012.
- Membre du comité scientifique de VRIC, Laval Virtual depuis 2006.
- Membre du comité scientifique de la conférence internationale « Virtual Concept » 2002-2007
- Relectrice externe d'un article pour Intellectica, revue de l'Association pour la Recherche Cognitive (N° 45).
- Relectrice externe d'un article pour la Revue des Sciences et Technologies de l'Information, série Techniques et Sciences de l'informatique, numéro spécial *Innovations en réalités virtuelle et augmentée* (Numéro 28), 2009.
- Examinatrice de soutenance de thèse de N. Marion « Modélisation de scénarios pédagogiques pour les environnements de réalité virtuelle d'apprentissage humain », Université de Bretagne Occidentale, CERV, soutenance prévue mars 2010.
- Membre expert extérieur au comité d'évaluation de l'appel à projets « Concepts Systemes et Outils pour la Sécurité Globale » de l'ANR depuis 2010.

4.2 Groupes de recherche

- Membre du comité scientifique et membre du comité d'organisation de l'ARP PREA2030 « L'apprentissage demain : savoirs et outils » (en tant que membre représentant pour l'AFRV : Association Française pour la Réalité Virtuelle), démarrage en 2010.
- Membre de l'AFRV (Association Française pour la Réalité Virtuelle)
- Membre de l'AS « réalité virtuelle et cognition » du RTP « Interfaces médiatisées et réalité virtuelle » du CNRS et responsable d'un sous-groupe « Immersion et Réalisme ».
- Membre de l'AS « humain virtuel » du RTP « Interfaces médiatisées et réalité virtuelle » du CNRS

5 Responsabilités scientifiques et adminstratives

5.1 Responsabilités et animations scientifiques

- Membre du comité de programme de Virtual Reality International Conference 2009. Co-organisatrice du symposium DiFac (Digital Factory : Comment les technologies de la réalité virtuelle s'inscrivent-elles dans le processus d'industrialisation) avec le VIRART University of

Nottimgham (Angleterre) et le Laboratory Computer and Automation Research Institute (Budapest, Hongrie).

- Membre du comité de programme de Virtual Reality International Conference 2008. Co-organisatrice du symposium « Training, Education and Employment ». Organisation et sélection du comité scientifique, du comité de programme et des tables rondes.

5.2 Responsabilités administratives

- Responsable des séminaires du domaine ICI de l'UMR CNRS 7253, HEUDIASYC (depuis 2006).
- Liste Alternative CNU 27e nonélue (4e position) CNU 2011.
- Co-Correspondant communication du domaine ICI pour l'UMR CNRS 7253, HEUDIASYC.

5.3 Responsabilités enseignements

- Responsable de l'UE Environnement Immersif – Technologie énactive (ICI61), Niveau D (Master 2-R).
- Responsable de l'UE Réalité virtuelle et connaissances (UED04), Niveau D (cours de thèse).

6 Enseignement

Etablissement : UTC
Discipline : Génie Informatique
Volume : 288-305 UTP / an

Intitulé	Niveau	Type	Nombre d'heures TP
Environnement Immersif – Technologie énactive (ICI61) – responsable UV	D (master 2)	Cours TD	0-21 0-25
Interaction et Connaissance (ICI52)	D (master 2)	Cours TD	0-4,5 0-2
Intelligence Artificielle (IA01),	L, M (3e-4e année ingénieur)	TD TP	36 48
Algorithmique et programmation (NF01)	L (1ère année ingénieur)	TD	48-96
Ingénierie des systèmes interactifs (NF28)	M (4e année ingénieur)	Cours	4,5
Réalité Virtuelle (RV01)	M (4e-5e année ingénieur)	Cours	4,5
Réalité Virtuelle et Connaissances (UED04) – responsable UV	D (cours de thèse)	Cours	0-22
Encadrement stage TN9, TN10, TX	M (4e-5e année ingénieur)	TP	60-80

VIII. Biblio

[Adamatzky, 2005] Adamatzky, A. Dynamics of crowd-minds: patterns of irrationality in emotions, beliefs and actions. *World Scientific*, 2005.

[Adams, 1965] Adams, J. S. Inequity in social exchange », in L. Berkowitz, *Advances in experimental social psychology*, Academic press, New York, vol. 2, p. 267. 1965.

[Aguilar *et al.*, 2007] Aguilar, R., Antonio, A., &Imbert, R. Emotional agents with team roles to support human group training. In *IVA '07 : Proceedings of the 7th international conference on Intelligent Virtual Agents,* pages 352–353, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag. 2007.

[Allen, 1983] Allen J. Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. *Communications of the ACM*, 26(11) :832{843, November 1983.

[Alvarez, 2007] Alvarez, J. Du jeu vidéo au serious game : approches culturelle, pragmatique et formelle. *Thèse de doctorat en science de l'information et de la communication.* Université Toulouse II et III, laboratoires LARA et IRIT. 17 Décembre 2007.

[Amalberti et Deblon, 1992] Amalberti, R., & Deblon, F. Cognitive modelling of fighter aircraft process control: a step toward an intelligent on-board assistance system. *International Journal of Man-Machine Studies* (36) 639-671. 1992.

[Amalberti, 1996] Amaberti, R. La conduite des systèmes à risque. *Paris: PUF*.1996.

[Amalberti, 2001] Amalberti, R. The paradoxes of almost totally safe transportation systems. *Safety Science*, 37, 109-112. 2001.

[Amalberti et al., 2001] Amalberti, R., Fuchs, C., & Gilbert, C. (Eds.). Risques, erreurs et défaillances: approche interdisciplinaire. Actes de la première séance de séminaire « Le risque de défaillance et son contrôle par les individus et les organisations dans les activités à hauts risques. *Paris : Éditions CNRS.* 2001

[Amokrane, 2010] Amokrane, K. Suivi de l'apprenant en environnement virtuel pour le diagnostic des apprentissages et la prévention des risques. *Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne*. 2010

[Amokrane, Lourdeaux et al., 2008a] Amokrane, K., Lourdeaux, D., & Burkhardt, J. Hera : Learner tracking in a virtual environment. *IJVR : International Journal of Virtual Reality*, 7(3) :23_30. 2008.

[Amokrane, Lourdeaux et al., 2008b] Amokrane, K. Lourdeaux, D., & Burkhardt, J.M. HERA: Learner Tracking in a Virtual Environment. *IVEVA 2008: The International Conference on Intelligent Virtual Environments and Virtual Agents*, Nanjing, China, June 26-27, 2008

[Amokrane, Lourdeaux et al., 2008c] Amokrane, K., Lourdeaux, D., & Burkhardt, J. Learning and training in virtual environment for risks. In *ICTAI 2008 : 20th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, Dayton, Ohio, USA. 2008

[Anderson, 1993] Anderson, J. R. Rules of mind. *Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum associates*.1993.

[Annet, 2003] Annett, J. Handbook of Task Analysis for Human Computer Interaction. Mahwah, *New Jersey : Laurence Erlbaum Associates.* 2003.

[Atkinson et Shiffrin, 1968] Atkinson, R. C., & Shiffrin R.M. Human memory : A proposed system and its controlled processes. In K.W. Spence & J.T. Spence (Eds.). *The Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 2). New York: Academic Press. 1968

[Aylett, 1999] Aylett R., « Narrative in virtual environments – towards emergent narrative ». *AAAI Symposium on Narrative Intelligence*, 1999

[Badawi et Donikian, 2004] Badawi, M., & Donikian, S. Autonomous agents interacting with their virtual environment through synoptic objects. *Computer Animation and Social Agents,* 2.3.3, 5.7. 2004

[Badler et al., 1999] Badler, N., Cassell, J., Hayes-Roth, B., Johnson, W.L., Lester J. & Rickel, J. Smart(er) animated agents. *Cours numéro 27 de la conférence SIGGRAPH'99*. ACM, 1999.

[Baggio, 2006] Baggio, S. Psychologie sociale. Bruxelles : De Boeck Université. 2006 http://books.google.fr/books?id=4MqI34U1fagC&lpg

[Bainbridge, 1984] Bainbridge, L. Diagnostic skill in process operation, *International Conference on Occupational Ergonomics,* Toronto. 7–9 May, , 1984,

[Bardy, Burkhardt et Bardy, B., Burkhardt, J.M., & Lourdeaux, D. Immersion, réalisme et présence dans la

Lourdeaux, 2003]	conception et l'évaluation des environnements virtuels, *Psychologie Francaise*, 48-2, 35-42. 2003.
[Barnier, 2001]	Barnier, B. Théories de l'apprentissage et pratiques d'enseignement**,** *http://www.aix-mrs.iufm.fr/formations/fit/doc/divers/Theories_apprentissage.pdf***.** 2001
[Baron et al., 2006]	Baron, M. Lucquiaud, V. Autard, & D. L. Scapin. K-made : un environnement pour le noyau du modèle de description de l'activité. In 18me Conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine *IHM 2006* pages 287–288, Montréal, Canada. ACM Press. 2006.
[Barot, Lourdeaux et al., 2011]	Barot, C., Lourdeaux, D., Lenne, D. & Burkhardt, J.-M. V3S, un environnement virtuel pour la formation à la maîtrise des risques. *EIAH'2011: Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, Atelier IHM avancées pour l'apprentissage*, Mons, Belgique, May, 2011.
[Barot, Burkhardt, Lourdeaux et Lenne, 2011]	Barot, C., Burkhardt, J.M., Lourdeaux, D., & Lenne, D. V3S, a virtual environment for risk management training. *Joint Virtual Reality Conference of EuroVR - EGVE 2011.* Nottingham UK, 20-21 September 2011.
[Barthès et Ramos, 2002]	Barthès, J.-P. A. and Ramos, M. Agents assistants personnels dans les systèmes multi-agents mixtes - réalisation sur la plate-forme omas. *Techniques et sciences informatiques*. 21(4) : 473_498. 2002
[Barthès et al., 1979]	Barthès, J. P., Vayssade, M., & Miaczynska-Znamierowska, M.. Property driven data base. 6th *IJCAI*, Tokyo. 1979
[Barthès, 2009]	Barthès, J.-P. Omas a flexible multi-agent environment for cscwd. CSCWD. 2009.
[Bellet, 1998]	Bellet, T. Modélisation et simulation cognitive de l'opérateur humain : une application à la conduite automobile. *Thèse de doctorat*, Université Paris V. 1998.
[Benson, 1997]	Benson, H. The nocebo effect : History and physiology. *Preventive Medicine*, 26(5) :612 { 615, 1997.
[Bétrancourt et al., 2000]	Bétrancourt, M., &Tversky B. Effect of computer animation on user's performance: a review. Le travail humain, 63, pp311-329. 2000.
[Bickmore *et al.*, 2001]	Bickmore, T. W., Cassell J. Relational agents : a model and implementation of building user trust. *CHI*, p. 396-403, 2001.
[Bieder, 2006]	Bieder, C. Les facteurs humains dans la gestion des risques, évolution de la pensée et des outils, *Hermes*, 2006.
[Borghi, 2004]	Borghi, A. M. Objects concepts and action : Extracting affordances from objects parts. *Acta Psychologica, 115*, 69-96. 2004.
[Bossard et al., 2006]	Bossard, C & Kermarrec G. Quelles Conditions Facilitent le Transfert d'Apprentissage en Environnement Virtuel de Formation ? *Journées de l'Aber-Wrac'h EA3883. l'Aber-Wrac'h* (France). Janvier 2006.
[Bossard, 2008]	Bossard C. L'activité décisionnelle en situation dynamique et collaborative. Application à la contre-attaque au football. Université Européenne de Bretagne. Université de Brest. *Publiée aux Editions Universitaires Européennes, I*SBN : 978-613-1-50351-1. DOI : 10.1051/sm/2010002. Brest. pp. 307. Octobre 2008.
[Bouslama et al., 2009]	Bouslama, O., Delorme, J., Gaillot, F. & Sertier, K. NF28 : Projet Hawai.. *Rapport de projet NF28*. Département Génie Informatique. Université de Technologie de Compiègne. 2009.
[Bouslimi, 2005]	Bouslimi, W. Modélisation du comportement des conducteurs dans des situations d'urgence. *Thèse de doctorat en Informatique temps réel, automatique et robotique à l'Ecole des Mines de Paris.* 2005
[Brehmer, 1987]	Brehmer, B. The psychology of risk, *in* W. T. Singleton, J. Hovden (Eds) : *Risk and decision*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp. 25-39. 1987.
[Brook, 1999]	Brooks, K.M.. Metalinear Cinematic Narrative: Theory, Process and Tool. *Thèse de doctorat, MIT*, avril 1999.
[Brousseau, 1998]	Brousseau, G. Théorie des situations didactiques. Grenoble: *La Pensée Sauvage*. 1998
[Bruillard, 1997]	Bruillard, E. Les machines à enseigner. *Hermès*, Paris, 1997.

[Bruner, 1983] Bruner J. Le développement de l'enfant : savoir faire, savoir dire. Paris : *PUF*. 1983.

[Buche, 2005] Buche. C. Un système tutoriel intelligent et adaptatif pour l'apprentissage de compétences en environnement virtuel de formation. *Thèse de doctorat*, UBO-ENIB. 2005.

[Buche et al., 2006] Buche, C., Querrec, R., Chevaillier, P., & Kermarrec, G.. Apports des systèmes tutoriaux intelligents et de la réalite virtuelle à l'apprentissage de compétences. *In Cognito - Cahiers Romans de Sciences Cognitives (CRSC)*, 2(2):51-83. ISSN 1267-8015. 2006.

[Burkhardt, 2007] Burkhardt, J., Couix, S., Donikian, S., & Rouillé, M.. Etat de l'art sur les modèles de comportements et les modèles de tâches pour la génération d'opérateurs virtuels au travail. Technical report, Projet RNTL PerfRV2, Sous-Projet 2, Lot 1. 2007.

[Burkhardt, Lourdeaux et al., 2009] Burkhardt, J., Lourdeaux, D., Couix, S., & Rouillé, M. Chapitre : la modélisation de l'activité finalisée. Le traité de la Réalité Virtuelle, ed. *Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, series : Collection sciences mathématiques et informatiques, Mines Paris,* 3th edition, Avril, 2009, 5 :213_245. 2009.

[Burkhart, 2010] Burkhardt J.M. Conception, utilization et formation : trois perspectives sur l'apprentissage en ergonomie des technologies émergentes. *Habilitation à diriger des recherches, Univsersité de Provence*, 11 octobre, 2010.

[Byrne, 2001] Byrne, M. D. ACT-R/PM and menu selection: Applying a cognitive architecture to HCI. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55, 41-84. 2001.

[Cacciabue et al., 1992] Cacciabue, P. C., Decortis, F., Drozdowicz, B., Masson, M., & Nordvik, J.-P. COSIMO: a cognitive simulation model of human decision making and behavior in accident management of complex plants. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, 22 (5), 1058-1074. 1992.

[Caillois, 1967] Caillois R., Les jeux et les hommes. *Gallimard*, 1967.

[Card, Moran et Newel., 1992] Card, S., Moran T., & Newell, J. The Psychology of Human- Computer Interaction. Hillsdale, New Jersey : Laurence Erlbaum Associates 1992.

[Cattell, 1977] Cattell, R.B. The scientific analysis of personality. *London, UK: Penguin Books.* 1965.

[Cavazza et al., 2002] Cavazza M., Charles F., & Mead S.J. Character-based Interactive Storytelling. *IEEE Intelligent Systems, special issue on AI in Interactive Entertainment,* pp. 17-24, 2002.

[Cavazza et al., 2003] Cavazza M., Martin O., Charles F., Marichal X., & Mead S.J. Interacting with Virtual Characters in Interactive Storytelling. *IEEE/ACM ISMAR*, 2003.

[Cavazza et al., 2006] Cavazza M., & Pizzi D. Narratology for interactive storytelling, a critical introduction. *International Conference on Technologies for Interactive Digital Storytelling and Entertainment*, Darmstadt, 2006.

[Champagnat, 1998] Champagnat R., Supervision des systèmes discontinus : définition d'un modèle hybride et pilotage en temps-réel. *Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier,* Toulouse III, 1998.

[Champion, Mandiau, et al., 2001] Champion, A., Mandiau, R., Espié, S., & Kolski, C. Multi-Agent Road Traffic Simulation: Towards Coordination by Game Theory Based Mechanisms. *Proceedings of the Agents in Traffic and Transportation, workshop in conjunction with the ITS World Congress 2001*, Sydney, Australia, octobre, 2001.

[Chauvin, 2003] Chauvin, C. Gestion des risques lors de la prise de décision en situation d'interaction dynamique : approches systémique et cognitive. *Actes des Deuxièmes Journées d'Etude en Psychologie Ergonomique – EPIQUE,* Le Chesnay, France: INRIA, 123-134, 2003.

[Chevaillier et al., 2009] Chevaillier, P., Querrec, R., & Septseault, C. Veha : Un méta-modèle d'environnement virtuel informé et structuré. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information, série Techniques et Sciences Informatiques (RSTI-TSI).* 2009

[Chevalard, 1999] Chevalard, Y. L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en didactique des mathématiques* , 221-226. 1999.

[Clancey, 2002] Clancey, W.J. Simulating activities: Relating motives, deliberation, and attentive coordination. *Cognitive Systems Research*, vol. 3, n3, 2002, pp. 471–499. 2002.

{Cloninger, 1987] Cloninger, C.R. A systematic method for clinical description and classification of

personality. Archives of General Psychiatry, 44, 573-588. 1987

[Cohen et Squire, 1980] Cohen, N.J, & Squire, L.R. Preserved learning and retention of pattern-analyzing skill in amnesia: dissociation of knowing how and knowing that. *Science* 210:207-210. 1980.

[Corbett et Anderson, 1995] Corbett, A. T., & Anderson, J. Knowledge tracing: modeling the acquisition of procedural knowledge. *User Modeling and User Adapted Interaction , 4*, 253-278. 1995.

[Costa et McCrae., 1985] Costa, P., & McCrae R., Psychological Assessment Resources I., The NEO Personality Inventory: Manual, Psychological Assessment Resources, 1985.

[Costa et McCrae, 1992] Costa, R., &McCrae, R.. Resources, Revised NEO Personality Inventory (NEO PI-R) and Neo Five-Factor. Inventory (NEO-FFI). Psychological Assessment Resources Odessa, FL, 1992

[Costa et McCrae., 1996] Costa R., &McCrae. Toward a new generation of personality theories: Theoretical contexts for the five-factor model, The five-factor model of personality: Theoretical perspectives, Wiggins, J.S., *The Guilford Press, New York*, p. 51–87, 1996.

[Crocq, 2002] L. Crocq. Special teams for medical/psychological intervention in disaster victims. World Psychiatry, 1(3) :154, 2002

[Csikszentmihalyi, 2005] Csikszentmihalyi, C. Handbook of compétence and motivation. *The Guilford press*, New York, London 2005.

[David et Lourdeaux, 1998] David, P. & Lourdeaux, D.. *Une application de la réalité virtuelle dans le domaine de la formation à la SNCF*. Nîmes'98, Complex Systems, Intelligent Systems & Interfaces. Nîmes, 1998

[Debray et al., 2006] Debray, B., Chaumette, S., Descourière, S. & Trommeter, V. Méthodes d'Analyse des Risques Générées par une Installation Industrielle. *Rapport Omega 7, INERIS*, France, 2006.

[De la Garza et Fadier., 2005] De la Garza, C., & Fadier, E.. Towards proactive safety in design: a comparison of safety integration approaches in two design processes. *International Journal of Cognition Technology and Work*, 7 (1), 51-62. 2005

[De la Garza et Fadier, 2007] De la Garza, C., & Fadier, E. Le retour d'expérience en tant que cadre théorique pour l'analyse de l'activité et la conception sûre. Revue *@ctivités*, *Vol 4 N° 1, mars 2007, 188-197pp. 2007.*

[Delmas, 2009] Delmas, G. Pilotage de récits et mise en oeuvre de formes narratives dans le contexte du jeu vidéo. *Thèse de doctorat, Université de la Rochelle*. 16 septembre 2009.

[De Loor et al., 2009] De Loor, P., Manac'h, K. & Tisseau, J. Enaction-based artificial intelligence: Toward co-evolution with humans in the loop. Minds and Machine, 19(3):319–343, 2009.

[Devillers et Donikian, 2003] Devillers, F., Donikian, S. A scenario language to orchestrate virtual world evolution. In *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation* (2003), p. 265–275. 2003.

[de Vries, 2001] de Vries, E. Les logiciels d'apprentissage : panoplie ou éventail ? *Revue Française de Pédagogie*, 137, 105-116. 2001.

[Diagne, 2009] Diagne, F. Modèle de supervision des processus d'apprentissage. *Thèse Informatique*. Université Joseph Fourier, Grenoble. 2009.

[Diallo, 2009] Diallo, A.A. Modélisation d'objets pour la représentation des connaissances en environnement virtuel. *Rapport de stage à l'Université Technologie de Compiègne dans le laboratoire Heudiasyc, Université Paris Dauphine*. Paris, 2009.

[Djaouti, 2011] Djaouti, D. Serious Game Design Considérations théoriques et techniques sur la création de jeux vidéo à vocation utilitaire. *Thèse de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier,* Novembre 2011.

[Djouad, 2011] Djouad, T. Ingénierie des indicateurs d'activités à partir de traces modélisées pour un Environnement Informatique d'Apprentissage Humain. *Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard Lyon1*, 2011.

[Donikian, 2004] Donikian, S. Modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels autonomes évoluant dans des environnements informés et structurés. *Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Rennes 1 Institut de Formation Superieure en Informatique et en Communication*. 2004

[Donikian, 2009] Donikian, S. & Thalmann, D. Le Traité de la Réalité Virtuelle, 3ème édition, Volume "Les humains virtuels". *Le Traité de la Réalité Virtuelle, 3ème édition*, Volume 2009.

[Dubois et Prade, 1992] Dubois, D., & Prade, H. Fuzzy rules in knowledge-based systems – Modelling gradedness, uncertainty and preference. In *R. Yager and L. Zadeh, editors, An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems*, pages 45-68. Kluwer Acad. Publ. DP179. 1992.

[Dugdale *et al*., 2000] Dugdale, J., Pavard, P., & Soubie, B. A pragmatic development of a computer simulation of an emergency call center. In *Designing Cooperative Systems : The Use of Theories and Models*, pages 241-256. IOS Press, 2000.

[Dufour, 2010] Dufour D. Scénarisation et conception de serious game pour la formation. *Rapport de Master 2, Parcours Innovation, Connaissance et Interaction, Université de Technologie de Compiègne,* 2010.

[Durupinar, 2010] Durupinar, F., From Audiences to Mobs: Crowd Simulation with Psychological actors, *PhD thesis, Bilkent University*, July, 2010.

[Edward, 2011] Edward, L. Modélisation décisionnelle de personnages virtuels en Environnements virtuels pour la prévention de risques. *Thèse de doctorat en Informatique, Université de Technologie de Compiègne*. Mai, 2011.

[Edward, Amokrane et Lourdeaux, 2011] Edward, L., Amokrane, K. & Lourdeaux, D. Knowledge representation: an ontology for managing a Virtual Environment. In *ICAART: International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, Valencia 22-24 January, 2011

[Edward, Lourdeaux et al., 2008] Edward, L. Lourdeaux, D., & Barthès, J.P. Virtual Autonomous Agents in an Informed Environment for Risk Prevention. In *Intelligent Virtual Agents 2008*, volume 5773 of LNCS, pages, Springer-Verlag, 2008

[Egges et al., 2004] Egges, A., Kshirsagar, S., & Magnenat-Thalmann, N. Generic personality and emotion simulation for conversational agents. In *Computer Animation and Virtual Worlds,* vol. 15, n° 1, p. 1–13, 2004.

[El-Kéchaï, 2007] El-Kechaï, N. Suivi et assistance des apprenants dans les environnements virtuels de formation. *Thèse de doctorat, Université du Maine*, France. 18 décembre, 2007.

[Eliott et al., 1999] Elliott, J., Rickel, C., & Leste, J. Pedagogical Agents and Active Computing : An Exploratory Synthesis. In *Artificial Intelligence Today: Recent Trends and Developments journal*, 1999.

[Emin, 2010] Emin, V. Modélisation dirigée par les intentions pour la conception, le partage et la réutilisation de scénarios pédagogiques. *Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier,* http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00545553/fr/ 2010.

[Espié, 1999] Espié, S. Research in human factors using simulators : the INRETS tools. *ESM Proceedings*, Leon, Spain, ESM, 1999

[Eysenck, 1991] Eysenck, H.J. Dimensions of personality: 16, 5 or 3?− Criteria for taxonomic paradigm. *Personality and Individual Differences*, 12, 773-790. 1991

[Felicia, 2009] Felicia, P. Les jeux électroniques en classe : manuel pour les enseignants. *GIS. Handbook,* http://games.eun.org/upload/GIS_HANDBOOK_FR.PDF. *2009.*

[Fikes et Nilsson 1971] Fikes, R.E. & Nilsson, N.J. STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence* 2. 189-208. 1971.

[Frété, 2002] Frété, C. « *Le potentiel du jeu vidéo pour l'éducation* ». Mémoire du DESS STAF, Université de Genève, 2002.

[Fricoteaux, Thouvenin et al., 2011] **Fricoteaux L., Mouttapa Thouvenin I., Olive J.** Heterogeneous Data Fusion for an Adaptive Training in Informed Virtual Environment. *IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems (VECIMS)*, Ottawa, Canada, 2011.

[Funge, 1999] Funge, J., Tu, X., & Terzopoulos, D. Cognitive modeling: Knowledge, reasoning and planning for intelligent characters. In *SIGGRAPH'99*, Los Angeles, pages 29_38. 1999.

[Genvo, 2005] Genvo, S. Transmédialité de la narration vidéoludique : quels outils d'analyse ? Comparaison, Peter Lang, 2002, 2, p. 103-112, disponible en ligne : http://www.ludologique.com/publis/articles_en_ligne.html. 2005

[Gérard, 2004] Gérard, Y. Mémoire sémantique et sons de l'environnement. *Thèse de doctorat Université de Bourgogne.* 15 décembre 2004.

[Gerbaud, 2008] Gerbaud, S. Contribution à la formation en réalité virtuelle : scénarios collaboratifs et intégration d'humains virtuels collaborant avec des utilisateurs réels. *Thèse de doctorat, INSA de Rennes* 2008.

[Gerbaud et Arnaldi, 2009] Gerbaud, S. & Arnaldi, B. Humains virtuels etcollaboration dans un environnement virtuel de formation. *Technique et science informatiques (RSTI - TSI)*, Lavoisier, Paris, FRANCE (Revue), 28(6-7) :741-766. 2009

[Gibson, 1977] Gibson, J. J. The theory of affordances. In R. Shaw & J. Bransford (Éds.), *Perceiving, acting, and knowing.* Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 67-83. 1977

[Gicquel, 2008] Gicquel, P.Y. Modélisation d'objets pour la représentation des connaissances en environnement virtuel. *Rapport de stage à l'Université Technologie de Compiègne dans le laboratoire Heudiasyc*, Institut de Cognitique. Bordeaux, 2008

[Goguelin, 1988] Goguelin P. Risque et prise de risque, *in* P. Goguelin, X. Cuny (Eds) : *La prise derisque dans le travail*, Octarès Entreprise, Marseille, pp. 21-38. 1988.

[Gosse, 2008] Gosse, D. La construction de modèles de tâches avec le logiciel-éditeur HAWAI. *Rapport de TER, master 1 Biomédicale « Sciences de la vie et de la santé », spécialité ergonomie. Université Paris Descartes*, 2008.

[Graf et Schacter, 1985] Graf, P., & Schacter, D. L. Implicit and explicit memory for new associations in normal and amnesic subjects.*Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory,* 1985.

[Grandbastien et Labat, 2006] Grandbastien, M., & Labat, J.M. Environnements informatiques pour l'Apprentissage Humain. *Collection IC2*, 2006.

[Gratch, 2000] Gratch, J. Emile : Marshalling passions in training and education. In *Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Agents,* Barcelona, Spain. 2000

[Gratch, 2002] Gratch, J. Socially situated planning. *Socially Intelligent Agents*, p. 181–188, 2002.

[Gratch et Marsella, 2001] Gratch, J., & Marsella, S.. Tears and fears : Modeling emotions and emotional behaviors in synthetic agents. In *5th International Conference on Autonomous Agents*, Montreal, Canada. 2001.

[Gratch et Marsella, 2004] Gratch J., Marsella S. A domain-independent framework for modeling emotion. *Cognitive Systems Research*, vol. 5, n° 4, p. 269–306, 2004.

[Greeno et Moore, 1993] Greeno, J. G., & Moore, J. L. Situativity and Symbols : response to Vera and Simon. *Cognitive Science, 17*(1), 49-60. 1993.

[Gresselle, 2007] Greselle, O.Z. Vers l'intelligence collective des équipes de travail : une étude de cas. *Management & Avenir*, 2007/4 n° 14, p. 41-59. DOI : 10.3917/mav.014.0041. 2007.

[Guéraud et al., 2004] Guéraud, V., Adam, J.M., Pernin, J.P., Calvary, G., & David, J. L'exploitation d'Objets Pédagogiques Interactifs à distance : le projet FORMID. *Revue STICEF : Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Education et la Formation*, 11. 2004.

[Harrington, 1997] Harrington, A. The placebo e_ect : an interdisciplinary exploration. *Harvard University Press*, 1997.

[Hatfield et al., 1992] Hatfield, E., Cacioppo, J. T., & Rapson, R. L. Primitive emotional contagion. *Emotion and Social Behavior*, vol. 14, pp. 151–177, 1992.

[Helmreich, 2004] Helmreich, R.L. Chapter 3. The threat and error management model. In *R. Dietrich & T.M. Childress (Eds.), Group Interaction in High Risk Environments*. 2004.

[Hoc, 1998] Hoc, J. Modèles cognitifs de l'opérateur humain. In *Journées Automatique et Homme*, LAMIH Valenciennes. 1998.

[Hoc et Amalberti, 1994] Hoc, J.-M. & Amalberti, R. Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques. *Psychologie Française, 39, 2,* 177-192. 1994.

[Hoc et al., 2000] Hoc, J.M., Morineau, T., Denecker, P. Gestion de l'espace problème et organisation temporelle de l'activité de contrôleurs aériens professionnels sur simulateur (Rapport de Recherche). Athis-Mons, F: CENA, Projet AMANDA, 2000.

[Hoc, 2001] Hoc, J.-M. Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies, 54,* 509-540. 2001

[Hoc, 2003] Hoc, J.-M., & Amalberti, R. Adaptation et contrôle cognitif : supervision de situations dynamiques complexes. *EPIQUE'2003, pp.135-146. 2003.*

[Hodhod, 2010] Hodhod, R. Interactive Narrative for Adaptive Educational Games: Architecture and an Application to Character Education. *PhD thesis, University of York*. http://etheses.whiterose.ac.uk/909/. 2010.

[Hollnagel, 1994] Hollnagel E.: *Human Reliability Analysis: Context and Control*, 1 ed. Academic Press, Feb. 1994

[Hollnagel, 1998] Hollnagel, E. Cognitive Reliability and Error Analysis Method - CREAM. Elsevier. 1998.

[Hollnagel, 2003] Hollnagel, E. Handbook of cognitive task design. Mahwah, NJ: Erlbaum. 2003.

[Hutchins, 1995] Hutchins, E. Cognition in the wild: Bradford Books-MIT Press. 1995.

[Ingalls et al., 2004] Ingalls, G., Rossetti, M. D., Smith, J. S. & Peters, B. A. Applying a cognitive architecture to control of virtual non-player characters. *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. eds.* 2004.

[Isbister, 2006] Isbister K. Better Game Characters by Design : A Psychological Approach (The Morgan Kaufmann Series in Interactive 3D Technology). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2006.

[Izard, 1977] Izard, C. Human Emotions. *New-York : Plenum Press*. 1977.

[Jackson et al., 1998] Jackson, S.L. Krajcik, J., Soloway, E. The Design of Guided Learner-Adaptable Scaffolding in Interactive Learning Environments. In *proceeding of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. CHI 1998*, Los Angeles, California, United States. 187-194. 1998

[Jenkis, 2003] enkins, H. Game design as narrative architecture, *First person: New media as story, performance, and game*. 2003.

[Jiang et al., 2007] Jiang, H., Vidal, J. M., & Huhns, M. N. Ebdi : an architecture for emotional agents. In *AAMAS '07 : Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pages 1-3, New York, NY, USA, 2007. ACM. 2007.

[Johnson et al., 1998] Johnson L., Rickel J., Stlies R., & Munro A. Integrating pedagogical agents into virtual environments. *Presence :Teleoperator and Virtual Environments* 7(6),p. 523-546 1998.

[Jones, Saunier et Lourdeaux, 2011] Jones. H., Saunier, J., & Lourdeaux, D. Fuzzy Rules for Events Perception and Emotions in an Agent Architecture. In *The 7th conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT-2011).* Aix-les-Bains, France, 18-22 july 2011

[Jones, Saunier et Lourdeaux, 2009a] Jones, H., Saunier, J., & Lourdeaux, D. Vers une intégration des facteurs physiologiques, de personnalité et d'émotion dans les agents cognitifs. *Rencontres Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle 2009 (RJCIA 2009)*, Hammamet, Tunisie, May, 25-29th, 2009.

[Jones, Saunier et Lourdeaux, 2009b] Jones, H., Saunier, J., & Lourdeaux, D. Personality, emotions and physiology in a bdi agent architecture: the pep -> bdi model. In *Intelligent Agent Technology 2009*, page 4. IEEE Press, 2009.

[Julien et Roman, 2004] Julien, C., & Roman, G.-C. Supporting context-aware interaction in dynamic multi-agent systems. In *D. Weyns, H. V. D. Parunak, and F. Michel, editors, E4MAS, volume 3374 of Lecture Notes in Computer Science*, pages 168-189. Springer Verlag, 2004.

[Kallman et Thalmann, 1999] Kallmann, M., & Thalmann, D. A behavioral interface to simulate agent object interactions in real time. In *Computer Animation*, pages 138–146. 1999.

[Kallman, 2004] Kallman, M. Interaction with 3-d objects. Handbook of Virtual Humans, In Magnenat-Thalmann, N. and Thalmann, D. editors, volume 13, pages 303-332. 2004.

[Kendira, 2009] Kendira, A. L'animation d'avatars comme support à la communication dans les Environnements Virtuels Informés**.** *Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne*, France, 2009.

[Kerbrat, 2005] Kerbrat, J.Y. Manuel d'écriture de jeux vidéo. *L'Harmattan*, 2005

[Keskinen et al., 1992] Keskinen, E., Hatakka, M., & Katila A. Inner models as basis for traffic behaviour. *Traffic Med*, Vol. 20, n°4, pp. 147-152. 1992

[Kleinginna et Kleinginna, P., Jr., & Kleinginna, A. A categorized list of motivation definitions, with

Kleinginna, 1981]	suggestions for a consensual definition. *Motivation and Emotion, 5*, 263-291. 1981
[Koper, 2001]	Koper, R. Modeling units of study from a pedagogical perspective. *Educational Technology Expertise Centre, Open University of the Netherlands, First Draft, version*, 2. 2001.
[Koper et al., 2003]	Koper, R., Olivier, B., et Anderson, T. IMS Learning Design Information Model. *IMS Global Learning Consortium*. 2003.
[Kopp et al., 2003]	Kopp, S., Jung, B., Leßmann, N., & Wachsmuth. I. Max – A Multimodal Assistant in Virtual Reality Construction. *KI-Künstliche Intelligenz* 4/03, pp. 11-17 2003.
[Lacy et Benedek, 2003]	Lacy, T. & Benedek, D.. Terrorism and Weapons of Mass Destruction: Managing the Behavioral Reaction in Primary Care. *Southern Medical Journal*, 96(4) :394, 2003.
[Laird et al., 1987]	Laird, J., Newell, A., & Rosenbloom, P. Soar: An architecture for general intelligence. *Artificial Intelligence*, pages 1_64. 1987.
[Lamarche, 2003]	Lamarche, F. Humanoïde virtuels, réaction et cognition : une architecture pour leur autonomie. *Thèse de Doctorat, I.F.S.I.C., Université de Rennes I, IRISA-INRIA*, décembre 2003.
[Lamarche et Donikian, 2009]	Lamarche F. & Donikian S. Sélection d'action et planification. *Le Traité de la Réalité Virtuelle*, 3ème édition, Volume "Les humains virtuels, 12, 5. 2009
[Lanquepin et al., 2011]	Lanquepin, V., Denonain,, J., Huet, T., & Palancher, V. NF28 : Visual HAWAI 2. *Rapport de projet NF28, Département Génie Informatique. Université de Technologie de Compiègne*. 2011.
[Lanquepin et Palancher, 2011]	Lanquepin, V. & Palancher, V. TX 4095 Serious Game: Représentation des connaissances de personnages virtuels autonomes. *Rapport de TX, Département Génie Informatique, Université de Technologie de Compiègne*, 2011.
[Largier, Delgoulet et De la Garza, 2008]	Largier, A., Delgoulet, C. & De la Garza, C. Quelle prise en compte des compétences collectives et distribuées dans la gestion des compétences professionnelles? *PISTES* © Vol. 10 No. 1 Mai 2008.
[Lasagne, 2004]	Lasagne M. Management des risques, Stratégies d'entreprise et règlementation : le cas de l'industrie maritime.*Thèse de doctorat en Sciences de Gestion à l'Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers Centre de Paris*. Décembre, 2004.
[Lazarus, 1991]	Lazarus, R. S., Emotion and adaptation, *Oxford University Press*, USA, 1991.
[Lebodic, 2005]	Lebodic, L. Approche de l'évaluation des systèmes interactifs multimodaux par simulation comportementale située. *Thèse de doctorat. Université de Bretagne occidentale*, 2005.
[Le Bon, 1895]	Le Bon, G. Psychologie des foules. *ed. Paris: Presses Universitaires de France*, 1895.
	Le Cardinal, G., Guyonnet, J-F., & Pouzolic, B. La dynamique e la confiance, construire la coopération dans les projets complexes. *Dunod*, ISBN 2100034987. 1997.
[Ledoux, 1994]	Ledoux J. Émotion, mémoire et cerveau, *Pour La Science*, 202 : 50-57. 1994.
[Lejeune et Pernin, 2004]	Lejeune, A., & Pernin, J. Modèles pour la réutilisation de scénarios d'apprentissage. *Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement (TICE) Méditérranée*, (pp.48-55). Nice. 2004.
[Léman et al., 1996]	Léman, S., Marcenac, P. & Giroux, S. A generic architecture for ITS based on a multi-agent approach. Intelligent Tutoring Systems. *Lecture Notes in Computer Science*, Volume 1086/1996, 75-83, DOI: 10.1007/3-540-61327-7_103. 1996.
[Lenay, 2006]	Lenay C. Enaction, Externalisme et Suppléance Perceptive. *Intellectica*, 2006/1, 43, 27-52. 2006.
[Leplat et Hoc, 1983]	Leplat J., & Hoc, J.M. Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 3, 1, pp 49-63, 1983
[Leplat, 1985]	Leplat, J. Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail. *Collection U, A. Collin*, Paris. 1985.
[Lester et al., 1999]	Lester, J., Zettlemoyer, Gregoire, L., & Bares. J. Explanatory lifelike avatars : Performing user-designed tasks in 3d learning environments. In *Third International Conference on Autonomous Agents*. 1999.

[Lhommet, 2007] Lhommet, M. Évolution de l'état d'opérateurs virtuels travaillant dans des environnements à risques (Projet V3S). *Rapport de TX, Département Génie Informatique, Université de Technologie de Compiègne*, 2007.

[Lhommet, Lourdeaux et al., 2011a] Lhommet, M., Lourdeaux, D., & Barthès, J.B. Never alone in the crowd: a microscopic crowd model based on emotional contagion. In *Intelligent Agent Technology 2011* (IAT 2011). IEEE Press, 2011.

[Lhommet, Lourdeaux et al., 2011b] Lhommet, M., & Lourdeaux, D. Taking into account emotions in mixed human/agent systems for improving collaborative work. *Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), 2011 15th International Conference on*, Lausanne, Suisse, pp. 854-857, Jul, 2011.

[Lhommet, Lourdeaux et al., 2011c] Lhommet, M., Lourdeaux, D., & Barthès, J.B. De l'individu à la foule : un modèle informatique de contagion émotionnelle. *Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle* 2011 (RJCIA 2011) de la 7ème plateforme AFIA, pp949-962. Presses de l'Université des Antilles et de la Guyane. Chambery, Suisse, May 16-21th, 2011.

[Lhommet, 2012] Lhommet, M. REPLICANTS : humains virtuels cognitifs, émotionnels et sociaux. De l'empathie cognitive à l'empathie affective. *Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne*, 9 novembre 2012.

[Louchart et al., 2004] Louchart, S, & Aylett, R. Emergent narrative, requirements and highlevel architecture. *SETN04*, 2004.

[Lourdeaux, 2001] Lourdeaux, D. Réalité virtuelle et formation : conception d'environnements virtuels pédagogiques. *Thèse de doctorat en Informatique temps réel, Robotique et Automatique, École des Mines de Paris*, 2001.

[Lourdeaux et al., 2002] Lourdeaux, D., Fuchs, P., Burkhardt, J., & Bernard, F. Relevance of an intelligent tutorial agent for virtual reality training systems. *International Journal of Continuing Engineering Education and Life Long Learning*, 12(1) :214_229. 2002.

[Lourdeaux, Burkhardt et Mellet d'Huart, 2006] Lourdeaux, D., Burkhardt, J.M, Mellet d'Huart, D.. Chapitre : « La conception des environnements virtuels pour l'apprentissage » . *Le traité de la réalité virtuelle deuxième* édition. P. Fuchs, G. Moreau, B., Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, troisième édition, 3ème édition ISBN 2911762657, pp43-100, février 2006

[Lourdeaux et Burkhardt, 2009] Lourdeaux, D., & Burkhardt, J.-M. chapter: "Usages de l'humain virtuel pour la formation" *Le traité de la réalité virtuelle* , vol. 5, pp. 1-10, series: sciences mathématiques et informatiques, Mines Paris, 3e édition, Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 04, 2009.

[Lourdeaux, Barot et Lenne, 2011] Lourdeaux D., Barot C., & Lenne D. Rapport d'avancement année 1 du projet ARAKIS. Technical report, Projet Région Picardie/FEDER ARAKIS. 2011.

[Lucquiaud, Scapin et al., 2002] Lucquiaud, V., Scapin, D., & Jambon, F. Outils et mod_elisation des tâches utilisateurs : exigences du point de vue utilisation. XIV conf_erence sur l'interaction Homme Machine : IHM2002, 243{246. ACM press. 2002.

[Luengo, 2009] Luengo V. Les rétroactions épistémiques dans les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. *Habilitation à diriger des recherches. Habilitation à diriger des recherches. Université Joseph Fourier*, 2009.

[Luengo et al., 2011] Luengo, V., Vadcard, L., Tonetti, L., & Dubois, M. Diagnostic des connaissances et rétroaction épistémique adaptative en chirurgie. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 25:499-524, 2011.

[Maes, 1990] Maes, P. Situated agents can have goals. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 6, pp. 49–70. 1990.

[Magerko et Laird, 2003] Magerko B., & Laird J.E. Building an Interactive Drama Architecture. *International Conference on Technologies for Interactive Digital Storytelling and Entertainment*, Darmstadt, 2003.

[Magerko et Laird, 2004] Magerko, B., & Laird, J.E. Mediating the Tension Between Plot and Interaction. *AAAI Workshop Series: Challenges in Game Artificial Intelligence*, San Jose, 2004.

[Magerko et al., 2005] Magerko, B., Wray, B., Holt, L., & Stensrud, B. Improving Interactive Training through Individualized Content and Increased Engagement. *Interservice / Industry Training, Simulation, and Education Conference*. Orlando, FL, 11 pgs.2005

[Magerko, 2006] Magerko, B. Player Modeling in the Interactive Drama Architecture. *Ph.D. Thesis, Electrical Engineering and Computer Science Department, University of Michigan,* Ann Arbor, MI.2006.

[Magne et Vasseur, 2006] Magne, L., & Vasseur, D. Risques industriels - complexité, incertitudes et décision : une approche interdisciplinaire. *Lavoisier*, 2006.

[Malone et Lepper, 1987] Malone, T. W., & Lepper, M. R. *Making learning fun: taxonomy of intrinsic motivations for learning*. IN R. E. Snow & M. J. Farr (Eds.), *Aptitude, learning, and instruction, III: Conative and affective process analysis*, (pp. 223-253). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. 1987.

[Mandani et Assilian, 1975] Mamdani, E. H., & Assilian, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal on man-machine studies*, 7 :1-13, 1975.

[Marc et Amalberti, 2002] Marc, J., & Amalberti, R.. Contribution individuelle à la sécurité du travail : l'exemple de la regulation du samu. *Le travail Humain*, 65(3), 217-242. 2002.

[Marc, 2002] Marc, J. Contribution individuelle au fonctionnement sûr du collectif : Protections cognitives contre l'erreur individuelle et collective (le cas du SAMU). *PhD thesis, Université Paris 8*, Décembre 2002.

[Marion, 2010] Marion, N. Modélisation de scénarios pédagogiques pour les environnements de réalité virtuelle d'apprentissage humain. *Thèse de doctorat de l'Université Européenne de Bretagne*. Mai 2010.

[Maris, 2009] Maris, F. Planification SAT et planification temporellement expressive: les systèmes TSP et TLP-GP. *Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier,* septembre 2009.

[Marsella et al., 2004] Marsella, S., Pynadath, D.V., & Read, S.J. PsychSim: Agent-based modeling of social interactions and influence. In *Proceedings of the International Conference on Cognitive Modeling*, pp. 243–248, 2004.

[Marsella et al., 2010] Marsella, S., Gratch, J., & Petta, P. Computational models of emotion », A Blueprint for an Affectively Competent Agent: Cross-Fertilization Between Emotion Psychology, *Affective Neuroscience, and Affective Computing. Oxford University Press, Oxford*, 2010.

[Mateas, 2002] Mateas, M., Interactive Drama, Art, and Artificial Intelligence. *Ph.D. Thesis. Technical Report CMU-CS-02-206, School of Computer Science, Carnegie Mellon University*, 2002.

[Mateas, 2010] Mateas, M. The authoring challenge in interactive storytelling. In *Proceedings of the Third joint conference on Interactive digital storytelling ICIDS'10*. 3-642-16637-7, 978-3-642-16637-. Edinburgh, UK, 2010.

[Mayers et al., 2001] Mayers, A., Lefebvre, B., & Frasson, C. MIACE, a human cognitive architecture. *SIGCUE Outlook ACM*, pp61-77, volume 27, issue 2,, March 2001.

[McCrae et al. 2003] McCrae, R., & Costa, P. Personality in adulthood: A five-factor theory perspective, *The Guilford Press*, 2003.

[McDermott, 1982] McDermott, D.V. A Temporal Logic for Reasoning About Processes and Plans. *Cognitive Science* 6, pp. 101-155, 1982.

[McDermott, 1998] McDermott, D.V. PDDL, The Planning Domain Definition Language. *Technical Report, Yale University*, (http://cs-www.cs.yale.edu/homes/dvm/), 1998.

[Mellet d'Huart et Michel, 2006] Mellet d'Huart, D., & Michel, G. Réalité virtuelle et apprentissage. In Grandbastien, M. Labat, J.-M. (Eds.) *Les environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain.* Ed. Hermes, Collection "Traité IC2 Information Commande Communication", 2006.

[Mellet d'Huart, 2004] Mellet d'Huart, D. De l'intention à l'attention : contributions à une démarche de conception d'environnements virtuels pour apprendre à partir d'un modèle de l'(én)action. *Thèse de doctorat de l'Université du Maine*, 2004.

[Michel et al., 2005] Michel, G., Paugam, B., Portugal, J.-N., & Beck, S. IVT : Des agents virtuels pour apprendre à conduire un entretien. In *First International VRLearning Seminar*, Laval, France. 2005

[Michel et Mellet d'Huart, 2006] Michel, G., & Mellet d'Huart, D. Didactique professionnelle et conception d'environnements virtuels pour l'apprentissage. In *ASTIER P. et OLRY P. (Dir.) Analyse du travail et formation (2)*. Education Permanente, N° 166, p. 115-125. Mars 2006.

[Mikropoulos, 2011] Mikropoulos T. A., & Natsis A. Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009). *Computers & Education.* 2011.

[Mille et Prié, 2006] Mille, A. & Prié, Y. Une théorie de la trace informatique pour faciliter l'adaptation dans la confrontation logique d'utilisation/logique de conception. *In the Proceeding of : la 13èmes journées de Rochebrune - Traces, Enigmes, Problèmes,* Rochebrune, France. 2006.

[Mollet et al., 2006] Mollet, N., & Arnaldi, B. Storytelling in Virtual Reality for Training. *Edutainment*: 334-347. 2006.

[Mollet et al., 2007] Mollet, N., Gerbaud, S. & Arnaldi, B. STORM: a Generic Interaction and Behavioral Model for 3D Objects and Humanoids in a Virtual Environment. *IPT-EGVE the 13th Eurographics Symposium on Virtual Environments*: 95—100. 2007.

[Moreau, 2003] Moreau, G. *Le traité de la réalité virtuelle. Paris* : Presses de l'école des Mines de Paris. 2003.

[Moulin et al., 2007] Moulin, C., Bettahar, F., Barthès, J., & Sbodio, M. L. Extension d'ontologie favorisant la catégorisation et l'indexation sémantique. *Premières journées francophones sur les ontologies*, Sousse, Tunisia, pp. 301-319. 2007.

[Mouttapa-Thouvenin, 2009] Mouttapa-Thouvenin, I. Interaction et connaissance : construction d'une expérience dans le monde virtuel. *Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne*. 2009

[Mufti-Alchawafa, 2008] Mufti-Alchawafa, D. Modélisation et représentation de la connaissance pour la conception d'un système décisionnel dans un environnement informatique d'apprentissage en chirurgie. *Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble*. 2008.

[Muldner et Conati, 2007] Muldner, K., & Conati, C. Evaluating a Decision-Theoretic Approach to Tailored Example Selection. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (pp. 483-488). Hyderabad, India. 2007.

[Musse et Thalmann, 2001] Musse S. R., & Thalmann D. Hierarchical model for real time simulation of virtual human crowds. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 7, n° 2, p. 152–164, 2001.

[Natkin, 2009] Natkin, S. Du ludo-éducatif au jeux vidéo éducatifs. *Les Dossiers de l'Ignénierie Educative*. 2009.

[Neisser, 1987] Neisser, U. Concepts and conceptual development. *Ecological and intellectual factors in categorization. Emory Symposium in Cognition 1*. New York: Cambridge University Press. 1987.

[Niehaus et al., 2009] Niehaus, J., & Riedl , M.O. Scenario Adaptation: An Approach to Customizing Computer-Based Training Games and Simulations. *Proceedings of the AIED 2009 Workshop on Intelligent Educational Games*, Brighton, UK, 2009.

[Niehaus et al. 2011] Niehaus, J., Boyang, L., & Riedl, M.O. Automated Scenario Adaptation in Support of Intelligent Tutoring Systems. In *Proceedings of the 24th Conference of the Florida Artificial Intelligence Research Society*. Palm Beach, Florida, 2011.

[Nodenot, 2005] Nodenot, T. Contribution à l'ingénierie dirigé par les modèles en EIAH: le cas des situations-problèmes coopératives. *Habilitation à Diriger des Recherches, IUT de Bayonne, Université de Pau*. 2005.

[Norman, 1981] Norman, D.A. Catégorisation of action slip, *Psychological Review*,88, 1-15. 1981.

[Noy, 2004] Noy, S. Minimizing casualties in biological and chemical threats (war and terrorism) : the importance of information to the public in a prevention program. *Prehospital and Disaster Medicine*, 19(1) :29-36, 2004.

[Nuttin, 1963] Nuttin, J. Motivation, Planning and Action — A Relational Theory of Behaviour Dynamics. *Leuven University Press*. 1963.

[Nuxoll et Laird, 2007] Nuxoll, A. M., & Laird, J. E. Extending Cognitive Architecture with Episodic Memory. In *Proceedings of the 22nd National Conference on Artificial Intelligence* (AAAI). 2007.

[Ochanine, 1978] Ochanine, D. Le rôle des images opératives dans la régulation des activités de travail. *Psychologie et Éducation, 2*, 63-72. 1978.

[Ochs, Sabouret et al., 2009] Ochs, M., Sabouret, N., & Corruble, V. Simulation de la dynamique des émotions et des relations sociales de personnages virtuels. *Revue d'Intelligence Artificielle (RIA)*, Editions spéciale "Jeux vidéo", 23(2), mars 2009.

[Ohlsson, 1992] Ohlsson, S. Constraint-based student modeling. *Artificial Intelligence and Education , 3* (4), 429-447. 1992.

[Ollagnier et Mille, 2007] Ollagnier, M., & Mille, A. *5ième école thématique du CNRS sur les EIAH – Personnalisation des EIAH*, Juillet 2007.

[Ortony et al., 1990] Ortony, A., Clore, G. L. & Collins, A. The cognitive structure of emotions. *Cambridge University Press*, May 1990.

[Palanque, 1992] Palanque, P., Modélisation par objets coopératifs interactifs d'interfaces homme-machine dirigées par l'utilisateur. *PhD Thesis, Université Toulouse I*, France 1992

[Paris, 2007] Paris, S. Caractérisation des niveaux de services et modélisation des circulations de personnes dans les lieux d'échanges. *Thèse de doctorat, Université de Rennes 1*, France, Octobre 2007.

[Parunak, 2006] Parunak, H. V. D., Bisson, R., Brueckner, S., Matthews, R., & Sauter, J. A model of emotions for situated agents. In *AAMAS '06 : Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pages 993-995, New York, NY, USA, 2006. ACM.2006.

[Patrick, 1992] Patrick, J. Training : research and Practice. *London: Academic Press*. 1992.

[Pearl, 1985] Pearl, J. Heuristics : Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving. *Addison-Wesley Editeur*, 1985.

[Perney, 2007] Perney, R. Développement d'une IHM pour la description de tâches. *Rapport de TX, Département Génie Informatique, Université de Technologie de Compiègne*, 2007.

[Pernin, 2003] Pernin, J.P. Objets pédagogiques : unités d'apprentissage, activités ou ressources ? *Revue "Sciences et Techniques Educatives"*, Hors série 2003 "Ressources numériques, XML et éducation", pp 179-210, avril 2003, éditions Hermès. 2003.

[Pernin et Lejeune, 2004] Pernin, J.P., & Lejeune, A. Modèles pour la reutilization de scenarios d'apprentissage. In *actes en ligne du colloque TICE Méditérranée*, p 48, Nice, novembre http://nte.unice.fr/nte/colloque/communication_fichiers/48-pernin-lejeune.pdf, 2004.

[Pew et al., 1998] Pew, R. W. & Mavor, A. S. Modeling Human and Organizationnal Behavior : application to military simulations. *Washington D. C.: National Academic Press.* 1998.

[Platon, Sabouret et al., 2007] Platon, E., Sabouret, N., & Honiden, S. Tag interactions in multi-agent systems : Environment support. In *Proceedings of Environment for Multi-Agent Systems, Workshop held at the Fifth Joint Conference in Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, volume 4389 of Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 106-123. Springer Verlag, 2007.

[Porteous et al., 2010] Porteous, J., Cavazza, M., & Charles, F. Applying planning to interactive storytelling: Narrative control using state constraints. ACM Trans. Intell. Syst. Technol., 1(2):10:110:21. 2010.

[Porteous et Cavazza, 2009] Porteous, P., & Cavazza, M. Controlling Narrative Generation with Planning Trajectories: The Role of Constraints. *Proc. of the 2nd International Conference on Interactive Digital Storytelling*. 2009.

[Portugal, 2009] Portugal, J.N. Usage des humains virtuels dans les serious games. *Le Traité de la Réalité Virtuelle, 3ème édition, Volume « Les humains virtuels »*, 18, **5**. 2009.

[Prendinger *et al.*, 2001] Prendinger, H., & Ishizuka, M. Social role awareness in animated agents. *AAMAS, ACMpress*, Montréal, Canada, p. 270-277, 2001.

[Prensky, 2001] Prensky, M. Digital game-based learning. *New York: McGraw Hill*. 2001.

[Py, 1990] Py, D. Reconnaissance de plan pour l'aide à la démonstration dans un Tuteur Intelligent de la géométrie. *Thèse de l'université de Rennes I.* 1990.

[Querrec, 2010] Querrec, R. Apprentissage de procédures en environnements virtuels. *Habilitation à diriger des recherche*. Université européenne de Bretagne, décembre, 2010.

[Rabasse, 1997] F. Rabasse. Emergence de compétences collectives au regard des compétences individuelles dans un processus de transfert des innovations technologiques dans le domaine des technologies de l'information. *Thèse de Doctorat CNAM Paris*. 1997.

[Rao et Georgeff, 1990] Rao, A. & Georgeff, P. Modeling rational agents whithin a bdi architecture. In

Proceedings of KR Reasonning, pages 473-484. 1990.

[Rasmussen, 1982] Rasmussen, J. Human errors : A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations. *Journal of Occupational Accidents*, 4 :311_333. 1982.

[Rasmussen, 1983] Rasmussen, J. Skills, rules, and knowledge ; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1983.

[Rasmussen, 1986] Rasmussen, J. Information processing and human-machine interaction : An approach to cognitive engineering. *North-Holland, New-York*. 1986.

[Rasmussen, 1997] Rasmussen, J. Risk Management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety Science*, 27 (2-3), 183-213.1997.

[Raybourn et al., 2005] Raybourn, E.M., Deagle, E., Mendini, K., & Heneghan, J. Adaptive Thinking & Leadership Simulation Game Training for Special Forces Officers. I/ITSEC 2005 In *Proceedings, Interservice/ Industry Training, Simulation and Education Conference*, November 28-December 1, Orlando, Florida, USA. 2005.

[Reason, 1990] Reason, J. Human error. *Cambridge University Press*. 1990.

[Resnick et al., 1991] Resnick, L., Levine, J. & Teasley, D. Perspectives on socially shared cognition. *Washington : APA*. 1991.

[Rhodes, 1996] Rhodes, B. J. PHISH-Nets : Planning Heuristically In Situated Hybrid Networks. *Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology*, 1996.

[Richard, 2001] Richard, N. Description de comportements d'agents autonomes dans des mondes virtuels hatbités. *Thèse de doctorat de l'ENST*. 12 octobre 2001.

[Riedl et al., 2008] Riedl, M.O., Stern, A., Dini, D., & Alderman, J. Dynamic Experience Management in Virtual Worlds for Entertainment, Education, and Training. *International Transactions on Systems Science and Applications*, 4(2). 2008.

[Ritter et al., 2003] Ritter, F. E., Shabolt, N. R., Elliman, D., Young, R., Gobet, F. & Baxter, G. D. Techniques for modeling human performance in synthetic environments: a supplementary review. *Technical report, Human systems Information Analysis Center - Wright Patterson Air Force Base, OH*. 2003.

[Rogalski, 2004] Rogalski, J. La didactique professionnelle: une alternative aux approches de « cognition située » et «cognitiviste » en psychologie des acquisitions. *@ctivités* , 103-120. 2004.

[Rouillé et al., 2008] Rouillé, M., Bilavarn, J., Burkhardt, J.M., Couix, S., Lourdeaux, D. & Amokrane, K. Prototype du langage de modélisation de l'activité humaine. *Technical report, Projet RNTL PerfRV2, Sous-Projet 2, Lot 1*. 2008.

[Rouse et al., 1986] Rouse, W. B., & Morris, N. M. On looking into the black box : prospects and limits in the search for mental models. *Psychological bulletin*, 100 :349–363. 1986.

[Rousseau et al., 1998] Rousseau, D., & Hayes-Roth, B. A Social-Psychological Model for Synthetic Actors. In *K. P. Sycara,M.Wooldridge (eds), International Conference on Autonomous Agents, ACMPress*, New York, p. 165-172, 9–13 1998.

[Roussos, Johnson et al., 1999] Roussos, M., Johnson, A., Moher, T. Leigh, J., Vasilakis, C., & Barnes, C. Learning and building together in an immersive virtual world. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 8(3) :247-263, 1999.

[Russel et Norvig, 2003] Russell, S., & Norvig, P. Artificicial Intelligence a modern approach. *Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall Series in Artificial Intelligence.* 2003.

[Russel et Norvig, 2006] Russell, S., & Norvig, P. *Intelligence artificielle. Paris: Pearson Education.* 2006.

[Saad et al., 1989] Saad, F., Van Elsande, P., Delhomme, P., Lepesant, C., & Gaujé, T. Analyse des comportements en situations de conduite critique: le franchissement d'intersections, *Convention DSCR-INRETS,* 1989.

[Salembier, 2002] Salembier, P. Cadres conceptuels et méthodologiques pour l'analyse, la modélisation et l'instrumentation des activités coopératives situées. *Systèmes d'information et Management (SIM)*, n°2, Vol. 7, 37-56. 2002.

[Samurçay et Pastré, 1995] Samurçay, R., & Pastré, P. La conceptualisation des situations de travail dans la formation des compétences. *Éducation permanente*, 123, 13-31. 1995.

[Saunier, Jones et Lourdeaux, 2010] Saunier, J., Jones, H. & Lourdeaux, D. Empathy and Placebo for Autonomous Agents *Proceedings of the 2010 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT '10)*, Toronto Canada, vol. 02, pp. 277-282, ed.: IEEE Computer Society, IEEE, WIC, ACM, August 31th - September 3rd, 2010.

[Saunier, Jones et Lourdeaux, 2009] Saunier, J., Jones, H. & Lourdeaux, D. I feel what you feel: empathy and placebo mechanisms for autonomous virtual humans. In *Intelligent Virtual Agents 2009*, volume 5773 of LNCS, pages 323{329. Springer-Verlag, 2009

[Saunier et Balbo, 2009] Saunier, J. & Balbo, F. Regulated multi-party communications and context awareness through the environment. *Multi-agent and Grid Systems*, 5(1) :75-91, 2009.

[Scapin et Bastien, 2001] Scapin, D. L. & Bastien, J. Analyse et conception de l'IHM. *Interaction homme-machine pour les SI*. Paris : Hermes. 2001.

[Segrestin, 2004] Segrestin D. Les chantiers du manager. *Armand Colin*, Paris.2004.

[Self, 1999] Self, J. The defining characteristics of intelligent tutoring systems research: ITSs care, precisely. *International Journal of Artificial Intelligence in Education, 10*, 350-364. 1999.

[Shao and Terzopoulos, 2005] Shao, W. & Terzopoulos, D. Environmental modeling for autonomous virtual pedestrians. In : *SAE Symposium on Digital Human Modeling for Design and Engineering*. 2005.

[Shute, 2009] Shute, V. Simply Assessment. *International Journal of Learning, and Media , 1* (2), 1-11. 2009.

[Si, Marsella et al. 2005] Si, M., Marsella, S., & Pynadath, D. Thespian: Using multi-agent fitting to craft interactive drama, *4th international joint conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, 2005.

[Si, Marsella et al. 2009] Si, M., Marsella, S., & Pynadath, D. Directorial control in a decisiontheoretic framework for interactive narrative. *Interactive Storytelling*, 221233, 2009.

[Silverman et al., 2002] Silverman, B. G., Johns, M., O'Brien, K., Weaver, R., & Cornwell, J. Constructing virtual asymmetric opponents from data and models in the literature: Case of crowd rioting. In *Proceedings of the 11th Conference on Computer Generated Forces and Behavioral Representation*. p. 97–106. Orlando, Florida,. 2002.

[Silverman, 2006] Silverman, B.G, Johns, M., Cornwell, J., & O'Brien, K. Human Behavior Models for Agents in Simulators and Games: Part I: Enabling Science with PMFserv. *Departmental Papers (ESE)*. 2006

[Silverman, 2007] Silverman, B.G., Bharathy, G.K., Nye, B., & Smith, T.E. Modeling Factions for 'Effects Based Operations': Part II Behavioral Game Theory. *Departmental Papers (ESE)*. 2007.

[Sleeman et al., 1989] Sleeman, D., Kelly, A., Martinak, R., Ward, R., & Moore, J. Studies of diagnosis and Remediation with High School Algebra Students. *Cognitive Science* , 551-568. 1989.

[Sperandio, 2003] Sperandio, J.C. Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie. *Paris : PUF*. 2003.

[Stanney et al., 1998] Stanney, K.M. Kennedy, R.S. Human Factors Issues in Virtual Environments: A Review of the Literature. *Presence.* 7(4): 327-351. 1998.

[Steels, 1994] Steels, L. The artificial life roots of artificial intelligence. *Artificial Life Journal*, 1. 1994.

[Suchman, 1987] Suchman, L. A. Plans and situated actions - The problem of human-machine communication. *Cambridge: Cambridge University Press*. 1987.

[Svennevig, 1999] Svennevig J. Getting Acquainted in Conversation. *Philadephia : John Benjamins*. 1999.

[Swain, 1983] Swain, A.-D. Handbook on human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant application », *Tech. Report NUREG/CR-1278*, USNRC, 1983.

[Swartjes et al., 2008] Swartjes, I., Kruizinga, E., & Theune, M. Let's Pretend I Had a Sword, *Interactive Storytelling*. pp264-267. 2008.

[Swartout, Gratch et al., 2006] Swartout, W., Gratch, J., Hill, R.W., Hovy, E., Marsella, S., Rickel, J., & Traum, D. Toward virtual humans. *AI Magazine 2*, 96–108. 2006.

[Szilas, 1999] Szilas, N. Interactive Drama on Computer: Beyond Linear Narrative. *AAAI Fall Symposium on Narrative Intelligence – Rapport Technique FS-99-01*, 1999.

[Tahri, 1993] Tahri, S. Modélisation de l'interaction didactique. Un tuteur hybride sur Cabri-Géométre. *Thèse Université Joseph Fourier, Grenoble.*1993

[Tchounikine, 2002] Tchounikine P. Conception des environnements informatiques d'apprentissage : mieux articuler informatique et sciences humaines et sociales. *Les technologies en éducation : Perspectives de recherche et questions vives, Baron G.L., Bruillard E.* (ed.), p. 203-210, Edité par Paris : INRP - MSH - IUFM de Basse Normandie. 2002.

[Tchounikine, 2009] Tchoukinine, P. Précis de recherche en ingénierie des EIAH. http://membres-liglab.imag.fr/tchounikine/Articles/PrecisV1.pdf. 2009.

[Terzopoulos, 2008] Terzopoulos, D. Autonomous virtual humans and lower animals : from biomechanics to intelligence. In *AAMAS '08 Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multi-agent systems*. 2008.

[Thalmann, 2000] Thalmann, D. Individual and group behaviours for virtual humans. In *Proceedings Computer Animation*. 2000.

[Thomas, 2000] Thomas, G. Virtual Urban Environments: modelling necessary informations for the simulation of pedestrians. *Thèse de doctorat, Université de Rennes 1*, December 1999.

[Thomas-Benjamin et al., 2011] Thomas-Benjamin, P., Yessad, A., & Labat, J.M. Petri nets and ontology: tools for the learning player assessment in serious games. In *IEEE International Conference on Advance Learning Technologies*, pp. 415--419, IEEE, 2011.

[Tisseau et Parenthoën, 2007] Tisseau, J., and Parenthoën, M. *Modélisation énactive et autonomisation*, vol. Intelligence de la complexité : épistémologie et pragmatique of Colloque de Cerisy. Editions de l'Aube, 2007, ch. I.6, pp. 149-174. 2007.

[Tulving, 1972] Tulving E. Episodic and semantic memory. Tulving E & Donaldson W, eds. Organization of memory. *New York: Academic Press* p. 381-403, 1972.

[Tyrrell, 1993] Tyrrell, T. Computational mechanisms for action selection. *PhD thesis, University of Edinburgh*. 1993.

[Ulrich, 2007] Ullrich, C. Course Generation as Hierarchical Task Network Planning Problem. *Saarbrücken: Computer Science Department, Saarland University*. 2007.

[van Welie et van der Veer, 2003] van Welie, M., & van der Veer, G. Groupware task analysis. *Hollnagel, E. ed. Handbook of Cognitive Task Design, Laurence Erlbaum Associates*, New Jersey, US, pages 447_476. 2003.

[van der Veer et al., 1996] van der Veer, G. C., Lenting, B. F., & Bergevoet, B A. GTA: groupware task analysis - modeling complexity. *ACTA PSYCHOLOGICA 91*, 297—322. 1996.

[Varela, 1996] Varela, F. J. Neurophenomenology: A Methodological Remedy for the Hard Problem, *Journal of Consciousness Studies*, 3, 4, pp. 330-50. 1996.

[Vergnaud, 1991] Vergnaud, G. La théorie des champs conceptuels. (L. P. Sauvage, Éd.) *Recherche en didactique des mathématiques* , 133-170. 1991.

[Vidal-Gomel, 2001] Vidal-Gomel, C. Le développement des compétences pour la gestion des risques professionnels. Le domaine de la maintenance des systèmes électrique. *Thèse de psychologie ergonomique. Saint-Denis: Université Paris 8*. 2001.

[Vidal-Gomel, 2007] Vidal-Gomel, C. Compétences pour gérer les risques professionnels : un exemple dans le domaine de la maintenance des systèmes électriques. *Le travail humain*, 70, 2. 2007

[Vygotsky, 1985] Vygotsky, L. Pensée et langage. *Paris: Éditions sociales* (Première édition, 1934 en russe). 1985.

[Walker et al., 1997] Walker, M. A., Cahn, J. E., & Whittaker, S. J. Improvising Linguistic Style : Social and Affective Bases for Agent Personality. *First international conference on Autonomous Agents*, p. 96-105, 1997.

[Wang et Laird, 2006] Wang, Y., & Laird, J.E. Integrating Semantic Memory into a Cognitive Architecture.. *2006*.

[Weyns et al., 2007] Weyns, D., Omicini, A., & Odell, J. Environment as a _rst-class abstraction in multi-agent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 14(1) :5-30, Feb. Special Issue on Environment for Multi-agent Systems. 2007

[Wild et al., 2001] Wild, B., Erb, M., & Bartels, M. Are emotions contagious? evoked emotions while viewing emotionally expressive faces: quality, quantity, time course and gender differences. *Psychiatry Research*, vol. 102, no. 2, p. 109–124, June, 2001

[Win et al., 2002] Winn, W., Windschitl, M., Fruland, R., & Lee, Y. When does immersion in virtual environment help students construct understanding? *ICLS.* 2002.

[Winograd et Flores, 1986] Winograd, T., & Flores, F. Understanding computers and cognition. *Norwood: Ablex*. 1986.

[Woods et al., 1994] Woods, D. D., Johannesen, L. J., Cook, R. I., & Sarter, N. B. Behind Human Error: Cognitive Systems, Computers and Hindsight. *CSERIAC, Wright-Patterson Air Force Base*, Ohio. 1994.

[Woolf, 2009] Woolf, B. P. Building Intelligent Interactive tutors : student-centered strategies for revolutionizing e-learning. *Burlington, MA, USA: Elsevier*. 2009.

[Wooldridge et al., 2000] Wooldridge, M., Jennings, N. R., & Kinny, D. The gaia methodology for agent-oriented analysis and design. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 3(3) :285_312. 2000.

[Young, Riedl et al., 2004] Young, R.M., Riedl, M., Branly, M., Martin, R.J., Saretto, C.J. An architecture for integrating plan-based behavior generation with interactive game environments. *Journal of Game Development*, 2004.

[Zadeh, 1965] Zadeh, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8 :338{353, 1965.

IX. Glossaire

Activité collective : regroupe des activités collaboratives, collaboratives ou des co-activités ;

Co-activité : La co-activité qualifie une situation dans laquelle des agents sont présents dans un même environnement de travail, mais réalisent des tâches apparemment indépendantes. Dans cette situation, les agents n'ont pas de but commun et n'ont pas pour objectifs d'interagir [Marc, 2002] ;

Activité collaborative : Situation dans laquelle les agents sont amenés à interagir ponctuellement, en vue d'atteindre un objectif commun. Les agents en présence ont chacun leurs objectifs personnels, qu'ils délaissent partiellement au profit d'un objectif qui devient commun [Marc, 2002] ;

Activité coopérative : Elle renvoie à une situation dans laquelle des agents mettent en œuvre des actions communes ou interdépendantes en vue d'atteindre un objectif commun, sans période temporelle particulièrement définie. Pour cela, les membres du collectif échangent des informations, produisent de nouvelles connaissances, stratégies ou encore agissent pour atteindre cet objectif commun. Durant la période de coopération, la mise en commun des compétences est nécessaire car elle permet la création d'un référentiel opératif élaboré en commun (Schmidt, 1988, 1989) qui permettra d'articuler cette coopération [Marc, 2002].

Erreur : Les erreurs sont des écarts à la norme non-intentionnels. Les erreurs peuvent être attribués à la méconnaissance, à l'inexpérience [Reason, 1990].

Scénario : Selon les travaux, le « *scénario* » peut désigner des concepts assez différents. Dans, nous proposons une généralisation, ainsi le « *scénario* » peut selon les cas : désigner une séquence linéaire, un graphe multi-linéaire, un ensemble de contraintes, d'événements partiellement ordonnés, etc. ; être défini de manière explicite ou implicite ; tre traité comme un ensemble de possibles ou comme un fil-rouge dont il faut éviter de s'écarter. Un scénario est un déroulement spécifique des événements de l'environnement virtuel. Au niveau formel, un scénario est donc défini comme une séquence d'événements marqués temporellement [Barot *et al.*, 2012].

Scénario pédagogique : le scénario pédagogique est défini comme le résultat du processus de conception des activités d'apprentissage. La scénarisation pédagogique consiste à définir les objectifs, la planification des activités d'apprentissage, les ressources pédagogiques, la description des tâches des apprenants, les modalités d'évaluation, les interactions entre les acteurs, les élements à observer, etc. Les modèles de scénarios pédagogiques peuvent ne pas prendre en charge les dimensions épistémiques ;

Scénario d'apprentissage : le scénario d'apprentissage représente la description, effectuée a priori (prévue) ou a posteriori (constatée), du déroulement d'une situation d'apprenissage ou unité d'apprentissage visant l'appropriation d'un ensemble précis de connaissances, en précisant les rôles, les activités ainsi que les ressources de manipulation de connaissances, outils nécessaires à la mise en oeuvre des activités [Pernin, 2003].

Scénarisation : La scénarisation consiste donc à définir un espace de scénarios.

Situation d'apprentissage : Une situation d'apprentissage est un ensemble de conditions et de circonstances susceptibles d'amener une personne à construire des connaissances.

Violation : Les violations sont des écarts à la norme intentionnels. Ce sont infractions à une loi, à un règlement, à une règle de sécurité ou à un interdit concernant la sécurité [Vidal-Gomel, 2001].