



HAL
open science

Scénarisation personnalisée dynamique dans les environnements virtuels pour la formation

Kévin Carpentier

► **To cite this version:**

Kévin Carpentier. Scénarisation personnalisée dynamique dans les environnements virtuels pour la formation. Autre. Université de Technologie de Compiègne, 2015. Français. NNT : 2015COMP2169 . tel-01120040

HAL Id: tel-01120040

<https://hal.science/tel-01120040>

Submitted on 24 Feb 2015

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.

Thèse
pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Technologie de Compiègne
Spécialité : Technologies de l'Information et des Systèmes

Scénarisation personnalisée dynamique dans les environnements
virtuels pour la formation

par
Kevin Carpentier

Soutenue le 19 Janvier 2015 devant un jury composé de :

M ^{me} Monique GRANDBASTIEN	Professeur émérite Université de Lorraine <i>Rapportrice</i>
M. Pierre DE LOOR	Professeur Université de Bretagne <i>Rapporteur</i>
M. Jean-Marie BURKHARDT	Directeur de recherche Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux <i>Examineur</i>
M. Jean-Charles MARTY	Maître de Conférence (HDR) Université de Savoie <i>Examineur</i>
M ^{me} Vanda LUENGO	Maître de Conférence (HDR) Université de Grenoble <i>Examinatrice</i>
M. Nicolas SZILAS	Maître d'Enseignement et de Recherche Université de Genève <i>Examineur</i>
M ^{me} Marie-Hélène ABEL	Professeur Université de Technologie de Compiègne <i>Examinatrice</i>
M ^{me} Domitile LOURDEAUX	Maître de Conférences (HDR) Université de Technologie de Compiègne <i>Directrice</i>
M ^{me} Indira THOUVENIN	Enseignant-Chercheur (HDR) Université de Technologie de Compiègne <i>Invitée</i>





Résumé

Nos travaux portent sur la scénarisation dans les environnements virtuels pour la formation. Nous nous intéressons particulièrement à la formation dans des environnements sociotechniques complexes comme par exemple la gestion des risques. Dans ces environnements, la variabilité des situations que les opérateurs peuvent rencontrer rend difficile la mise en place d'une formation exhaustive. Il est pourtant crucial d'offrir les moyens permettant l'entraînement à ces situations et les environnements virtuels peuvent apporter des solutions efficaces. En effet, ils peuvent offrir une grande liberté d'action et permettre un apprentissage de type essai-erreur. Le contrôle pédagogique de ces environnements peut alors permettre de personnaliser et d'adapter les contenus à chaque apprenant. Cependant, il est difficile pour les concepteurs d'environnements virtuels d'imaginer, de concevoir et décrire toutes les séquences d'actions et d'événements menant aux situations d'intérêt tout en autorisant une grande liberté d'action pour les apprenants. L'approche de description exhaustive se révèle trop coûteuse, voire vouée à l'échec. Pour palier au goulet d'étranglement de l'écriture et du codage des contenus, nous proposons de générer dynamiquement l'enchaînement des situations d'apprentissage au sein d'une simulation. L'architecture TAILOR que nous proposons permet la scénarisation dynamique de chaque session d'apprentissage, en accord avec un modèle du parcours d'apprentissage, en utilisant des modèles à base de connaissances. Pour cela, nous avons tout d'abord proposé le langage WORLD-DL permettant de produire du contenu scénaristique reconfigurable, adaptable et générique pour des environnements virtuels pour la formation. Ce langage permet à la fois de décrire le modèle du monde, les objectifs scénaristiques ainsi que de maintenir la base de connaissances liée à la simulation. Afin de ne pas s'appuyer sur une élicitation du domaine d'apprentissage, nous avons proposé un modèle de l'apprenant opérationnalisant la théorie de la Zone Proximale de Développement. Celui-ci repose sur un espace vectoriel de classes de situation auxquelles sont associées des valeurs de croyance sur la capacité de l'apprenant à gérer les situations qu'elles décrivent.

La scénarisation que nous proposons est essentiellement intra-diégétique : elle s'intègre au monde simulé par l'environnement virtuel. Pour cela, nous proposons une méthode de génération dynamique et adaptative de situations d'apprentissage s'appuyant sur des modèles de l'activité et de la causalité inspirés d'analyses ergonomiques. Par ailleurs, les situations d'apprentissage générées sont articulées sous la forme d'une fiction grâce au processus de diégétisation inspiré du courant structuraliste de la sémiologie.

Les travaux sur l'architecture TAILOR ont donné naissance au moteur du même nom au sein de la plateforme logicielle HUMANS. L'approche a été appliquée dans un environnement virtuel pour la formation des assembleurs en aéronautique.



Abstract

Dynamic personalized orchestration in virtual environment for training

This work addresses the issues of the specification of the scenario in virtual environment for training. We especially address adult lifelong training in complex domains where technical systems are difficult to apprehend and human factors are critical. Workers have to be trained to react to a wide range of situations. Virtual environment can provide this kind of training by offering them the possibility to experiment different behavior in a situation. Yet to foster learning, such environment should provide a wide range of appealing scenarios adapted to learners' need. The design and the production of all possible scenarios and of all their adaptations is a tedious task. It requires designers to imagine and describe every possible sequence of events which leads to interesting learning situation. Such a descriptive approach conflicts with the need for a smoother production process.

To tackle the authoring bottleneck, we propose the TAILOR architecture to dynamically generate sequences of learning situations in a simulation. It takes into account a learner profile and expert knowledge informed in semantic models. We used a space of classes of situations coupled with a belief model to represent the Zone of Proximal Development of a learner. Each point of the space images the ability of the learner to handle a kind of situation.

As we are essentially dealing with intra-diegetic orchestration, i.e. what is happening in the world depicted by the simulation, we propose to use expert model of the domain. We distinguished three kind of knowledge: world knowledge, activity knowledge and causality knowledge. They are used at runtime to procedurally generate a learning situation which will enlarge the Zone of Proximal Development of the learner. To this end, we design the WORLD-DL language to author scenario content for virtual environment for training in a reconfigurable, adaptable and generic way through an ontological representation. This language is used both to describe scenario objectives and to maintain a knowledge-based world state.

Moreover, we operationalize structuralist view of narrative to build a story upon generated learning situation through an automated diegetization process. This process relies on abstract story model describe in the ontological metamodel DIEGETIC.

This work have been implemented in the TAILOR engine used in the HUMANS platform. It was used both for aeronautic assembly virtual training and for baby sitter virtual training.

Remerciements

“ *It is a miracle if you can find true friends, and it is a miracle if you have enough food to eat, and it is a miracle if you get to spend your days and evenings doing whatever it is you like to do, and the holiday season - like all the other seasons - is a good time not only to tell stories of miracles, but to think about the miracles in your own life, and to be grateful for them, and that's the end of this particular story.* ”

The Lump of Coal, Lemony Snicket

Voici enfin venue la partie la plus agréable à écrire (et sans doute à lire). Le moment où la maigre contribution du jeune docteur s’efface devant l’ampleur et la qualité des rapports humains qui l’ont rendue possible.

Tout d’abord, je remercie chaleureusement Pierre Deloor et Monique Grandbastien d’avoir rapporté mes travaux. Leurs analyses et leurs commentaires ont été une nouvelle source d’inspiration ainsi qu’un nouvel apport d’énergie pour la dernière ligne droite qu’est la préparation de la soutenance.

Je remercie également Vanda Luengo, Nicolas Szilas, Jean-Charles Marty et Jean-Marie Burkhardt d’avoir accepté d’examiner mes travaux. Le souvenir des échanges nés de leurs questions me rappellera pourquoi j’aime la recherche.

Je remercie Marie-Hélène Abel d’avoir accepté de présider ce jury et d’avoir assuré une répartition équitable des temps de parole dans ce jury nombreux, mais aussi pour les nombreuses discussions informelles au gré des rencontres dans les couloirs.

Indira, je te suis reconnaissant de tout ce que tu as pu faire pour moi. Notamment, j’ai découvert la réalité virtuelle grâce à toi ! Je me suis ainsi inséré dans une communauté accueillante, chaleureuse, motivée et pleine d’espoir pour l’avenir, une communauté à l’image de sa « présidente » (sinon sa mascotte ?).

Je pense également évidemment à toutes les personnes avec qui j’ai pu collaborer, échanger et partager au sein du laboratoire Heudiasyc et au-delà. En particulier, je remercie Pierre-Yves Gicquel pour les innombrables discussions philosophiques (ou pas). Merci également à Antoine Vincent, qui aura été un soutien indispensable à la fin de la thèse : je ne l’oublierai pas ; de même que je n’oublierai pas les roulés à la confiture de Dorine Dufour (qui décidément porte bien son nom) !

Comme l’a dit un jour une grande directrice de thèse, HUMANS, c’est une âme. Et je suis très heureux d’avoir pu partager avec tant de personnes dans cet esprit. C’est pourquoi mes remerciements vont aussi à Margot Lhomme, Juliette Lemaitre, Vincent Lanquepin, Idir Benouaret, Mélody Laurent, Azzeddine Benabbou, Xuan Tran, Marcio Fuckner, Ning Wang. Mais aussi, ils vont plus largement aux gens du « coté réalité virtuelle » : Jérôme Olive, Loic Fricoteaux, Paul George, Rémy Frénoy, Romain Lelong, Mehdi Sbaouni, Morgan Frasin. Également, ils vont aux anciens : Alistair Jones, Lydie Edward, Adeline Leblanc, Hazael Jones, Fabrice Camus. Enfin, merci à Lucile d’avoir relu le mémoire avec tant d’attention, et aussi, tout simplement d’être si merveilleuse.

Au cours du projet NIKITA, j'ai eu le plaisir de travailler, pour le meilleur et pour le pire, avec des gens de différents horizons dans une atmosphère ô combien stimulante. Merci donc à Paul Evrard, Vincent Boccara, Catherine Delgoulet, Anja Golea, Phonevaly Soulivong, Laetitia Andrieu, Claude Andriot, Emmanuel Guerriero et Thomas Convard. Au cours du projet, j'ai plus particulièrement collaboré avec Kahina Amokrane et Kevin Wagrez (un jour les K domineront le monde) et ce fut toujours avec un grand plaisir malgré la difficulté et l'ampleur de la tâche !

Merci à tous les étudiants qui m'ont grandement aidé dans la réalisation de ce travail : Barthélémy Arribe, Julien Mazars, Martin Salles, Jean-Baptiste Degiovanni, Aliaume Morel, Théo Begault, Baptiste Pirault. Je n'oublie pas toutes ces personnes qui vous rendent la vie plus facile dans le quotidien de la thèse. En particulier, merci à Sabine Vidal, Nathalie Alexandre, Corinne Meyer, Séverine Paprzycki, Bérengère Guermont, Véronique Moisan et Julie Jarek pour avoir supporté mes requêtes et retards administratifs en tout genre !

Merci aux amis, d'être là, inconditionnellement. Merci pour les soirées télés, merci pour les paris gagnés et pour les paris perdus, pour les chocolats, pour les mariages (4 ? Oh non, dit pas 4 !) et pour le reste. Merci à Vincent, Caroline, Aurélie, Nathalie, Morgane, Mélanie, Suté, Gregory, Mathieu, Jean-Pierre, Matthieu, Amélie, Grégoire. Et un grand merci à Walid pour avoir relu le mémoire et avoir permis d'expulser 90% d'erreurs langagières (vous l'aurez compris, il n'a pas relu les remerciements).

Comme disait le Docteur Quinn : « je n'étais pas seule, j'avais une famille ». Je profite donc de ces remerciements pour exprimer ma gratitude envers mes parents et à mes deux grands-mères pour les valeurs qu'ils m'ont transmises et le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de mes études. J'espère vous rendre aussi fier qu'il soit autorisé de l'être.

Dans ce lot, il y en a une que je dois remercier *par-dessus tout*, ma petite sœur Kelly, qui m'a supporté sans faillir chaque jour de cette thèse, jusque dans les moments les plus difficiles. Je remercie également mes frères, qu'ils soient grands et m'aident à réparer ma voiture, ou qu'ils soient petits et que j'aide à faire tenir debout.

Il faut rendre à Caesar ce qui est Caesar, et donc, je suis heureux d'avoir pu compter sur toi, Frédéric, d'avoir été là (presque jusqu'au bout !) pour fêter les victoires et oublier les défaites.

Évidemment, je ne peux finir sans évoquer mon acolyte de toujours, celle dont l'inspiration se fait sentir tout au long des pages qui suivent. Camille, travailler avec toi, ce n'était pas vraiment travailler : du challenge et du plaisir à l'état pur, du flow, de la uncanny valley et des trainées de lumières qui font de la musique. Je n'ai qu'une hâte : voir ce que le monde nous réserve, car à nous deux, on en fera ce que bon nous semble.

Une fois n'est pas coutume, je finirais ces remerciements par l'instigatrice de ce travail, Domitile Lourdeaux. Domitile, je ne pourrais jamais exprimer toute ma gratitude à ton encontre, et les quelques lignes qui suivent ne peuvent qu'effleurer ce sentiment. Merci d'avoir toujours cru en moi. Merci de m'avoir soutenu quand je doutais. Merci d'avoir su doser savamment les moments dans lesquels tu me boostais et les moments dans lesquels tu me laissais me recentrer. Merci de m'avoir donné envie de faire de la recherche, mais, surtout, merci de m'avoir donné l'envie de donner l'envie de faire de la recherche. Merci de me regarder avec les yeux de la maman qui voit son enfant marcher pour la première fois.

Table des matières

1	Introduction	15
1.1	Scénarisation dans les environnements virtuels pour l'apprentissage humain	16
1.1.1	Environnement virtuel pour l'apprentissage humain	16
1.1.2	Scénarisation	17
1.2	Motivations	19
1.2.1	Apprentissage situé en environnement virtuel pour l'apprentissage	19
1.2.2	Production des environnements virtuels pour l'apprentissage	20
1.3	Objectifs	21
1.3.1	Facilitation de la production des environnements virtuels pour l'apprentissage	21
1.3.2	Scénarisation automatique pour l'apprentissage situé	22
1.4	Problématique	25
1.5	Approche	25
1.6	Contexte	26
1.6.1	La plateforme HUMANS	26
1.6.2	Cas d'applications	26
1.7	Organisation du mémoire	28
I	Etat de l'art	31
2	Scénarisation dynamique dans les Environnements Virtuels	33
2.1	La nature des objectifs scénaristiques	34
2.1.1	Des objectifs scénaristiques explicites	34
2.1.2	Des objectifs scénaristiques implicites	35
2.2	La spécification des objectifs scénaristiques	36
2.2.1	Les approches scriptées	36
2.2.2	Les approches génératives	37
2.2.3	Les approches hybrides	37
2.3	L'autonomie dans l'environnement virtuel	39
2.4	Les niveaux d'agrégation	39
2.4.1	Niveau microscénaristique	40
2.4.2	Niveau mésoscénaristique	40
2.4.3	Niveau macroscenaristique	41
2.5	Le type des objectifs scénaristiques	41
2.5.1	Les objectifs scénaristiques pédagogiques	41
2.5.2	Les objectifs scénaristiques narratifs	42
2.6	Le niveau diégétique	42
2.6.1	Intra-diégétique	42
2.6.2	Extra-diégétique	43
2.7	Les mécanismes de résilience	43
2.8	Bilan et positionnement	44

3 Modèles pour la prise en compte de l'apprenant dans les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain	47
3.1 Cadre théorique sur l'apprentissage	48
3.1.1 Le constructivisme de Piaget	48
3.1.2 La Zone Proximale de Développement de Vygotsky	48
3.1.3 L'apprentissage expérientiel de Kolb	49
3.1.4 L'apprentissage situé de Lave et Wenger	50
3.1.5 La théorie des situations didactiques de Brousseau	50
3.1.6 Bilan	51
3.2 Modèles informatiques pour l'adaptation à des fins de formation	51
3.2.1 Les Systèmes Tutoriels Intelligents	51
3.2.2 Les modèles de l'apprenant	52
3.3 Bilan et positionnement	57
4 Représentation des connaissances dans les Environnements Virtuels	59
4.1 Représentation des connaissances sur le monde	61
4.1.1 Les connaissances dans l'objet	62
4.1.2 Les connaissances externalisées	64
4.1.3 Bilan et positionnement	69
4.2 Représentation des connaissances sur l'activité	70
4.2.1 Automates à états finis	70
4.2.2 LORA [Mollet and Arnaldi, 2006]	70
4.2.3 YALTA [Rouillé et al., 2008]	71
4.2.4 HAWAI-DL [Amokrane, 2010, Edward, 2011]	72
4.2.5 Bilan et positionnement	72
4.3 Bilan et positionnement	73
II Contributions	75
5 Approche de scénarisation personnalisée dans les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain	77
5.1 Approche générale	79
5.2 Modèles pour la scénarisation personnalisée	81
5.2.1 Modèle du domaine	82
5.2.2 Profil de l'apprenant	85
5.2.3 Modèle pédagogique	86
5.2.4 Modèle diégétique	86
5.3 Processus décisionnels pour la scénarisation	86
5.3.1 Diagnostic	86
5.3.2 Fonction de transformation	88
5.3.3 La diégétisation	88
5.3.4 Contrôle local pour l'émergence d'une organisation globale	89
5.4 La place du formateur	91
5.5 Intégration dans HUMANS	91
5.6 Bilan	93
6 Modèle du monde pour la simulation et la scénarisation d'un environnement virtuel	95
6.1 Approche	96
6.1.1 Besoins	96
6.1.2 Propositions	97
6.2 WORLD-DL : un métamodèle de représentation des connaissances	98
6.2.1 Éléments de description fondamentaux	99

6.2.2	Description statique	103
6.2.3	Interactions	104
6.2.4	Description dynamique	105
6.2.5	Un mécanisme de résilience : le late commitment	108
6.3	WORLDMANAGER : moteur d'exécution du scénario	109
6.3.1	Saturation de la base de faits	110
6.3.2	Exécution des actions	110
6.3.3	Exécution des comportements actifs	111
6.3.4	Exécution des événements	112
6.3.5	Application des règles d'intégrité	112
6.4	Bilan	112
7	Diagnostic de l'apprenant : du modèle de profil à la prise de décision	115
7.1	Approche	116
7.2	Profil de l'apprenant	116
7.2.1	Modélisation du domaine d'apprentissage	117
7.2.2	Représentation des connaissances sur l'apprenant	120
7.2.3	Mise à jour de l'état de connaissance	123
7.2.4	Mécanisme d'inférence dans l'espace-zpd	126
7.3	Modèle décisionnel	131
7.3.1	Les enjeux de la prise de décision dans l'espace-zpd	131
7.3.2	Résolution du problème de satisfaction de contraintes	134
7.4	Étendre la Zone Proximale de Développement	137
7.5	Bilan	139
8	Instanciation par la génération procédurale de situations à partir de modèles de domaine	141
8.1	Définitions	142
8.2	Modèles de connaissances pour la génération procédurale	142
8.2.1	ACTIVITY-DL : un métamodèle pour la description de l'activité	142
8.2.2	CAUSALITY-DL : un métamodèle pour la description des chaînes de causalité	145
8.3	Algorithmes de génération	148
8.3.1	Génération à partir du modèle d'activité	148
8.3.2	Génération à partir de la causalité	152
8.3.3	Cas de l'adaptation microscénaristique	155
8.4	Bilan	155
9	Processus de diégétisation automatique pour l'enrichissement de situation	157
9.1	Le récit interactif comme support à l'apprentissage	158
9.1.1	Récit interactif et formation	158
9.1.2	Définitions	159
9.2	Approche	160
9.2.1	Besoins	160
9.2.2	Inspirations	161
9.2.3	Propositions	162
9.3	DIEGETIC : représentation des connaissances liées à la diégèse	163
9.3.1	Besoins	163
9.3.2	Description du métamodèle	164
9.4	Diégétisation	166
9.4.1	Principes	166
9.4.2	Le cadrage diégétique	167
9.4.3	Sélections des trames scénaristiques d'intérêt	170
9.4.4	Étayage des objectifs scénaristiques pédagogiques	174

9.5 Bilan	175
III Implémentations et résultats	177
10 Implémentation	179
10.1 Modèle et gestion de l'état du monde	180
10.1.1 Le moteur WORLDMANAGER	180
10.1.2 Utilisation de WORLD-DL pour la production d'environnements virtuels	180
10.2 Architecture TAILOR	181
10.2.1 Le diagnostic	181
10.2.2 Instanciation	182
10.2.3 Diégétisation	182
10.2.4 Interface utilisateur	183
10.2.5 Intégration à Humans	184
10.3 Cas d'application	185
10.3.1 NIKITA - Formation des monteurs-assembleur dans le domaine aéronautique	185
10.3.2 SIMADVF - La formation des assistantes de vie	188
11 Validation	191
11.1 Évaluation informatique	192
11.1.1 Caractère dynamique	192
11.1.2 Liberté d'action	197
11.1.3 Variabilité	198
11.2 Retours d'expérience pour la conception des modèles	199
11.2.1 Conception du démonstrateur NIKITA	199
11.2.2 Conception d'un démonstrateur pour la plateforme HUMANS	200
11.2.3 Bilan	200
11.3 Pistes d'évaluations	201
11.3.1 Validité écologique	201
11.3.2 Qualité du contenu diégétique	201
11.3.3 Opérationnalisation de modèles issus de sciences humaines et sociales	202
IV Discussion et conclusions	205
12 Discussion	207
12.1 Atouts	208
12.1.1 Production des environnements virtuels pour l'apprentissage humain	208
12.1.2 Pertinence des scénarios	208
12.1.3 Mise en œuvre d'un apprentissage expérientiel	209
12.1.4 Robustesse de l'approche	210
12.2 Limites	210
12.2.1 Elicitation des connaissances	210
12.2.2 Faiblesse du caractère dynamique	211
12.2.3 La difficile définition du profil de l'apprenant	211
12.2.4 La porosité des frontières entre le domaine et l'indépendant du domaine	212
12.2.5 Modèles pédagogiques	212
12.2.6 La temporalité pour la diégétisation	213
12.3 Perspectives	213
12.3.1 Ingénierie dirigée par les modèles et cycle de vie des produits	214
12.3.2 Réflexion sur les outils d'accompagnements	214
12.3.3 Coordination avec un tuteur intelligent	214

12.3.4 Intégration du dispositif dans les formations	215
12.3.5 Modèle de progression reposant sur le <i>Périple de l'Apprenant</i>	215
13 Conclusions	217
V Annexes	219
A Glossaire	221
B Langages de modélisation pédagogique	223
C Les couches de modélisation pour la représentation du monde	225
D Cas d'application	227
D.1 Démonstrateur NIKITA	227
D.1.1 Modèle d'activité	227
D.1.2 Modèle du monde	227
D.2 Cas d'application SIMADV	227
D.2.1 Modèle du monde	227
D.2.2 Modèle d'activité	227
D.2.3 Modèle de causalité	227
E Diagrammes UML	235
E.1 Diagramme UML de la librairie ZPDSPACE	235
E.2 Diagramme UML de l'algo génétique	235
E.3 Diagramme UML du WORLDMANAGER	235
F Protocole de communication avec le WORLDMANAGER	239
G Représentation XML d'un profil d'apprenant	241
H Evaluation de la métaheuristique pour le diagnostic	243
I Exemples de classes générées à partir du modèle du monde	247
J Démonstrateur NIKITA	251
Liste des figures	255
Liste des tableaux	259
Publications	260
Bibliographie	261

Chapitre 1

Introduction

“ If you are interested in stories with happy endings, you would be better off reading some other book. In this book, not only is there no happy ending, there is no happy beginning and very few happy things in the middle. ”
The Bad Beginning, Lemony Snicket

Sommaire

1.1 Scénarisation dans les environnements virtuels pour l'apprentissage humain	16
1.1.1 Environnement virtuel pour l'apprentissage humain	16
1.1.2 Scénarisation	17
1.2 Motivations	19
1.2.1 Apprentissage situé en environnement virtuel pour l'apprentissage	19
1.2.2 Production des environnements virtuels pour l'apprentissage	20
1.3 Objectifs	21
1.3.1 Facilitation de la production des environnements virtuels pour l'apprentissage	21
Passage à l'échelle	21
Réutilisabilité	21
Maintenabilité	22
1.3.2 Scénarisation automatique pour l'apprentissage situé	22
Liberté d'action	22
Variabilité	22
Contrôle pédagogique	23
Possibilités d'intervention du formateur	23
Validité écologique	24
Explicabilité	24
Intérêt	24
Résilience	25
1.4 Problématique	25
1.5 Approche	25
1.6 Contexte	26
1.6.1 La plateforme HUMANS	26
1.6.2 Cas d'applications	26
NIKITA - Formation des monteurs-assembleur dans le domaine aéronautique .	26
SIMADVF - Formation des assistantes de vie de famille	28
1.7 Organisation du mémoire	28

1.1 Scénarisation dans les environnements virtuels pour l'apprentissage humain

Les travaux présentés dans cette thèse traitent de la scénarisation dynamique des environnements virtuels pour l'apprentissage humain. L'objectif de ces travaux est de permettre la personnalisation en temps interactif du contenu scénaristique dans un environnement virtuel.

1.1.1 Environnement virtuel pour l'apprentissage humain

Les travaux que nous décrivons ici s'attachent essentiellement aux environnements virtuels pour l'apprentissage humain (EVAH). [Burkhardt, 2003] définit les environnements virtuels comme :

“ des systèmes interactifs permettant à un ou plusieurs utilisateurs d'interagir avec un monde artificiel, généralement en trois dimensions, par le biais d'un ensemble de techniques informatiques couvrant une ou plusieurs modalités sensorielles. ”

Cependant, il est à noter que par cette définition, l'environnement virtuel, en lui-même n'a aucune finalité, et d'ailleurs pré-existe à son utilisation. [Fuchs et al., 2006] précise alors que la finalité de la réalité virtuelle (discipline traitant des environnements virtuels) est de :

“ permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel. ”

Ces précisions permettent de rendre compte du caractère intentionnel de la conception et, corolairement, de l'utilisation de l'environnement virtuel. Le concepteur du dispositif a une intention et fait des choix quant à la façon de représenter le monde artificiel, ceci dans le but de faire réaliser une activité déterminée par le ou les utilisateurs.

Les activités concernées par la réalité virtuelle sont nombreuses : prototypage [Fillatreau et al., 2013], aide à la décision [Schaefer et al., 2001], thérapie [Klinger et al., 2013], etc. Nous nous intéresserons essentiellement aux activités liées à l'apprentissage pour la formation initiale et pour l'entraînement dans le cadre des environnements virtuels pour l'apprentissage humain.

A l'intersection du domaine de la réalité virtuelle et des environnements informatiques pour l'apprentissage humain, les EVAH visent à permettre la construction et le développement des connaissances et de compétences par l'utilisation d'un dispositif de réalité virtuelle par un sujet qu'on appellera *apprenant*. En tant qu'outil informatique pour l'apprentissage, celui-ci dispose d'un certain nombre de spécificités [Burkhardt et al., 2006] :

- la disponibilité et la personnalisation ;
- le suivi et la gestion des parcours ;
- la disponibilité des ressources et la réversibilité des actions ;
- l'accès permanent à des ressources ;
- la trace, le rejeu et l'analyse des tâches réalisées ;
- la simulation.

En plus de ces dimensions propres aux EIAH, les EVAH permettent d'inclure la prise en compte du corps dans le processus d'apprentissage [Mellet-d'Huart and Michel, 2006], et plus généralement la prise en compte des aspects sensori-moteurs et proprioceptifs, grâce à des modalités d'interaction riches. Il est ainsi possible de mettre en œuvre des méthodes d'apprentissage mettant l'apprenant en *immersion* dans un contexte donné.

1.1.2 Scénarisation

Avant d'évoquer la scénarisation, il convient de lever les ambiguïtés sur les différentes acceptions du terme *scénario*. Selon les domaines considérés, le scénario recouvre des réalités différentes. Lorsqu'il prend son sens de l'italien *scenario* (décor théâtral), le scénario n'a, paradoxalement, pas d'existence concrète et n'est qu'une émanation du texte de la pièce désignant à la fois la mise en scène, la description des personnages ainsi que l'enchaînement des événements. S'agissant du domaine du cinéma et de la télévision, la signification du terme diffère quelque peu : dans le monde audiovisuel le scénario est formalisé, figé et matérialisé dans un *document*. Celui-ci, rédigé par une équipe de spécialistes, décrit de façon détaillée les différentes scènes d'un film (ou de tout autre type de production audiovisuelle). Que ce soit dans le contexte théâtral ou le contexte cinématographique, le terme implique **une structure chronologique et spatiale contrainte**. Dans un cas comme dans l'autre, on parlera également du *canevas*.

Le terme de scénario est également utilisé dans le contexte du jeu de rôle et du jeu vidéo. Ces médias diffèrent fortement des précédents en ce qu'ils apportent *l'interactivité* : le spectateur n'est plus un sujet passif assistant à la mise en scène d'un scénario prédéfini, mais un joueur-acteur, que [Rempulski, 2013] qualifie de *spect-acteur*, ayant un rôle dans le dit scénario. L'interactivité du scénario bouleverse sa structure : la linéarité laisse place à des structures arborescentes dans lesquels un embranchement est créé pour chaque décision/action possible du spect-acteur.

Dans le cadre du jeu de rôle mais également de certains jeux vidéo, la structure du scénario, mais aussi sa portée, diffèrent. Ainsi, selon le degré d'improvisation dont est capable le meneur de jeu dans le cas du jeu de rôle, ou le degré d'interactivité offert par le jeu vidéo, les contraintes sur le scénario seront plus ou moins faibles. Surtout, des événements qui n'étaient pas indiqués par le scénario, voire qui n'étaient pas prévus par les auteurs, peuvent alors se produire. Il y a donc ici une distinction entre le scénario tel qu'il a été défini, que nous appellerons le **scénario prescrit**, et le déroulé de son exécution au sein d'un jeu que nous appellerons le **scénario effectif**. Le scénario effectif peut être totalement différent du scénario prescrit.

L'interactivité permise dans les jeux vidéo permet de mettre en lumière le **paradoxe narratif** : le scénario prescrit par l'auteur, supposé véhiculer un contenu et un message particulier, peut être mis à mal par les actions de l'utilisateur qui peuvent aller à l'encontre de ce récit. Le scénario effectif peut alors fortement diverger du scénario prescrit. Dans ce cas, il n'y a aucune garantie que le message du scénario prescrit soit véhiculé par le scénario effectif.

S'agissant d'environnement virtuel, [Barot, 2014] définit le scénario comme un *ensemble d'événements particuliers, partiellement ordonnés et instanciés dans un environnement virtuel*. Cette définition s'adapte particulièrement à une étude informatique de la question mais ne peut être appliquée au cas du scénario prescrit. Ainsi, nous privilégierons la formulation suivante.

Scénario

Un ensemble d'événements particuliers, partiellement ordonnés et instanciables dans un environnement virtuel.

Il convient maintenant de clarifier le processus de **scénarisation**. En se référant à [Barot, 2014] :

“ La scénarisation est un processus comprenant à la fois la spécification du ou des déroulements possibles ou souhaitables de la simulation et le contrôle (exécution et/ou suivi et correction) du déroulement des événements en temps réel. ”

Ces deux étapes de la scénarisation sont ainsi relatives d'une part à la **spécification** du scénario prescrit et d'autre part au **suivi et au contrôle** du scénario effectif. Les travaux de cette thèse se foca-

liseront exclusivement sur la première étape de spécification du scénario, le terme de scénarisation s'y réfèrera donc dans la suite du mémoire. Le suivi et le contrôle du scénario ont fait l'objet de travaux parallèles [Barot, 2014]. Nous attirons l'attention sur le fait que notre objet d'étude n'est pas la problématique de la conception du scénario par des ingénieurs pédagogiques, mais plutôt **la problématique informatique de la spécification automatique et dynamique du scénario**.

Comme nous l'avons vu précédemment, le scénario peut se décrire sous la forme d'un ensemble d'événements. Toutefois, un scénario peut être décrit à différentes granularités que nous appellerons des **niveaux d'agrégation**. S'agissant de scénario ayant pour objectif l'apprentissage, nous nous référons à la notion de **situation** comme unité de base pour décrire le **déroulement** d'un scénario. Ainsi, en didactique, [Brousseau, 2011] mettait au coeur de son approche la **situation didactique** :

“ l'ensemble des circonstances dans lesquelles une personne se trouve, et des relations qui l'unissent à son milieu. Une situation didactique est une situation où se manifeste directement ou indirectement une volonté d'enseigner. ”

Cette approche convient particulièrement à nos propos : nous souhaitons spécifier un déroulement de scénario où chaque *étape* a une vocation d'apprentissage. Cependant, nous proposons maintenant une définition relevant plus de considérations informatiques que de considérations purement pédagogiques.

Situation

Une situation est une description partielle du monde à un instant donné sous la forme d'un agrégat d'assertions.

La situation ne contient pas d'informations relatives à la façon dont elle a été créée. Ainsi, la situation "*la lumière est éteinte*" est strictement identique qu'elle soit précédée de la situation "*Sunny éteint la lumière*" ou de la situation "*il y a une coupure de courant*". Une situation est assimilable à une photographie partielle du monde : elle est incomplète, figée dans le temps et sans informations, *a minima* explicites, de causalité antérieures ou postérieures.

Nos travaux s'inscrivant dans la thématique des environnements virtuels pour la formation, la scénarisation aura tout de même vocation à servir des desseins pédagogiques. Notre objectif n'est donc pas de produire des scénarios *possibles*, qui n'ont pas d'intérêt en eux-mêmes, mais des scénarios *souhaitables* pouvant être source d'apprentissage. Pour cela il sera nécessaire de spécifier à la fois les **situations à favoriser** et les **situations à exclure**.

Ainsi, notre étude sur la scénarisation porte uniquement sur le **processus de spécification des situations souhaitables de la simulation**. Les processus de suivi et de contrôle, chargé d'assurer que le scénario effectif respecte le scénario prescrit, ne sont pas discutés ici. Cependant, la spécification doit prendre en compte l'étape de suivi et de contrôle afin, éventuellement, de re-spécifier un nouveau scénario si le précédent n'est pas atteignable.

Nous distinguerons deux modes de scénarisation complémentaires que sont la scénarisation **intra-diégétique** et la scénarisation **extradiégétique**. Pour [Souriau and Souriau, 1990], la diégèse est :

“ Tout ce qui est censé se passer, selon la fiction que présente le film ; tout ce que cette fiction impliquerait si on la supposait vraie. ”

Ainsi, nous distinguons les deux types de scénarisation selon qu'ils interviennent à l'intérieur de la diégèse (le monde simulé) ou à l'extérieur de la diégèse. La scénarisation intradiégétique concerne ce qui pourrait se produire dans la situation réelle de travail (survenue d'un accident, aide d'un collaborateur). La scénarisation extradiégétique s'intéresse notamment aux assistances permises par l'uti-

lisation d'un EVAH [Lourdeaux, 2001] [Fricoteaux, 2012] : assistances de soutien, rappel de la procédure, simplification de l'environnement visuel, etc.

Enfin, nous tenons à distinguer le processus de scénarisation tel que nous l'avons défini des processus de construction de **scénario pédagogique**. Le scénario pédagogique inclut l'ensemble des activités d'apprentissage qui peuvent être proposées à un apprenant : cours magistraux, exercices papiers, utilisation d'un EVAH, etc. La scénarisation que nous proposons, que [Luengo, 2009] qualifie d'**orchestration** se situe au niveau de l'utilisation de l'EVAH, et vise à agencer les activités d'apprentissage uniquement à l'intérieur de celui-ci.

1.2 Motivations

Nous nous intéressons principalement à ce que nous appellerons dans la suite de ce mémoire des **domaines complexes** : c'est-à-dire des domaines d'activité dans lesquels la complexité des systèmes sociotechniques et la multiplication des facteurs d'imprévisibilité rendent difficile, voire impossible, la compréhension holistique des systèmes considérés. En outre, ces domaines nécessitent en général l'acquisition de compétences non-techniques telles que la gestion du stress ou la gestion du collectif. Enfin, le facteur humain est généralement prégnant dans ces contextes. La maîtrise des risques, l'industrie de haute performance ou les activités domestiques sont des exemples de domaines complexes. La grande diversité des situations qui peuvent être rencontrées dans ce type de contexte requière un entraînement continu des opérateurs. Ce type d'application ayant des contraintes spécifiques est encore très peu représenté dans les EVAH. En effet, d'une part, il nécessite la mise en place de stratégies d'apprentissages particulières. D'autre part, la complexité des systèmes à représenter rend difficile la production des EVAH, il est donc nécessaire de mettre en place des méthodes informatiques pour faciliter leur production.

1.2.1 Apprentissage situé en environnement virtuel pour l'apprentissage

Le paradigme d'apprentissage constructiviste que nous prenons pour référence [Piaget, 1948] [Vygotsky, 1978] [Vergnaud, 1996] précise que **la connaissance se construit dans l'action** : la rencontre de l'apprenant avec une panoplie de situations-problèmes permet la construction de représentations mentales propres.

La capacité de ces situations-problèmes à produire de l'apprentissage est conditionnée par les décisions prises durant leur conception et de la qualité de leur mise en œuvre.

En outre, le cadre constructiviste insiste fortement sur la relation entre l'apprenant et son environnement. L'apprentissage naît de l'interaction entre l'apprenant et son environnement par une approche essai-erreur qui amène l'apprenant à questionner et à justifier, dans ses représentations mentales, le fonctionnement du système. Des erreurs, **les misconceptions**, peuvent naître de cet apprentissage. Un dispositif d'apprentissage ne doit pas prévenir ces misconceptions mais au contraire les mettre à jour car celles-ci sont indispensables à la bonne acquisition des connaissances.

Selon [Winn, 2003], l'apprentissage peut-être plus efficace si l'apprenant est en état de **présence** [Zeltzer, 1992] car il est alors complètement couplé avec son environnement, fut-il virtuel. En outre, pour favoriser l'apprentissage, [Malone and Lepper, 1987] il est essentiel de fournir : du challenge (gestion de la difficulté), de la curiosité (susciter l'intérêt), mais également de la fantaisie (faire prendre conscience qu'il s'agit d'une fiction).

Lorsque ces conditions sont réunies l'apprenant est en état de *Flow* [Csikszentmihalyi, 1991] qui procure :

- du plaisir ;
- un engagement total dans la tâche en cours ;
- une perte de conscience du passage du temps ;

- une concentration extrême et une réduction de la distractabilité ;
- une agréable sensation de fatigue quand la tâche est terminée.

Bien que tardivement verbalisé dans le domaine du jeu vidéo [Chen, 2007], le *flow* y est une notion couramment utilisée, puisque c'est l'objectif de ces médias que de créer et maintenir cet état. Son intérêt pour l'apprentissage paraît évident.

Ainsi, pour produire et maintenir cet état dans le cadre d'une formation en environnement virtuel, il est nécessaire de proposer des activités adaptées et une gradation de la complexité en accord avec le niveau de l'apprenant. En effet, des activités trop *faciles* pour l'apprenant risqueraient de lui faire perdre son attention alors qu'au contraire des activités plus *difficiles* constitueront des challenges qui seront sources d'intérêt. Pour cela, il est nécessaire de savoir quel est l'état de connaissances de l'apprenant par rapport à la tâche pour **l'altérer au regard du profil de l'apprenant** (par exemple augmenter la difficulté ou proposer des assistances), on parlera alors de **personnalisation**.

Dans le cadre d'une formation initiale, il est possible de produire des scénarios types et les situations problèmes qui sont sources d'apprentissage. En effet, pour des novices, les connaissances et compétences à acquérir sont relativement identifiables. Cependant, dans une démarche d'entraînement des experts, une telle description est impossible. Les éléments de connaissances sont difficilement identifiables et les situations qui mettraient en jeu ces éléments le sont d'autant plus. Seul l'entraînement et l'expérience permettent à chaque expert de construire ses référentiels.

1.2.2 Production des environnements virtuels pour l'apprentissage

Les motivations que nous venons d'évoquer sur le plan de l'apprentissage mettent en exergue des besoins liés à la production des environnements virtuels pour l'apprentissage. Les EVAH ont vocation, par leur utilisation, à permettre la construction de connaissances et/ou de compétences chez un apprenant. La diversité des EVAH est grande par les publics auxquels ils se destinent. Un EVAH peut être utilisé par un public scolaire [Dede et al., 1996], pour la formation des novices [Quarles et al., 2009], mais également pour le recyclage des experts [Bibin et al., 2008]. Mais, les EVAH sont divers également par le type d'apprentissage adressé. Ainsi, il existe des EVAH pour la formation au geste technique [Da Dalto, 2004], l'apprentissage d'une procédure [Gerbaud, 2008], ou la gestion des émotions en situation dégradée [Gratch and Marsella, 2003], etc. Enfin, la diversité des champs d'intervention des EVAH se reflète également au travers des domaines d'application considérés : la médecine chirurgicale [Wiet et al., 2002] [Megard et al., 2011], les activités sur les sites à haut risque [Fabre et al., 2006] [Barot et al., 2013], l'industrie manufacturière [Crison et al., 2005], etc.

L'essor des EVAH est grand mais nous pouvons nous interroger sur la viabilité à long terme à la fois de ces applications en elle-même mais également du processus qui les a vu naître. En effet, nous pouvons déplorer le manque de réutilisabilité des contenus et le manque de généricité des approches utilisées. Le travail fourni pour la production d'un simulateur de formation requiert :

- la création de l'environnement virtuel : graphismes 2D et 3D, animations, sons, etc. ;
- l'écriture des scénarios en tant que :
 - fonctionnement du système considéré : comment le système réagit aux actions de l'utilisateur,
 - scénario d'utilisation : les enchaînements d'actions attendus (souhaités ou non) ;
- l'application des scénarios à l'environnement virtuel : cette étape très longue consiste à mettre en œuvre le fonctionnement du monde. Le principal écueil est que l'approche la plus courante est d'intégrer ce fonctionnement directement dans le moteur de la simulation. Il en résulte que la moindre modification requiert l'intervention du développeur.

Ce travail d'écriture et d'intégration des contenus est encore difficile et complètement dépendant des moteurs de rendu utilisés. Une expansion du domaine des EVAH devra passer, notamment, par un meilleur processus de production.

1.3 Objectifs

De nos motivations découlent des objectifs liés aux différentes phases du cycle de vie d'un l'EVAH mettant en place un système de scénarisation personnalisée que sont :

- la **phase de conception** de l'environnement virtuel pendant laquelle des experts du domaine et des concepteurs définissent le périmètre de l'environnement et produisent la majeure partie des ressources que celui intègrera ;
- la **phase d'appropriation et/ou d'exploitation** de l'environnement virtuel pendant laquelle les exploitants, équipe pédagogique et formateurs, adaptent le contenu de l'environnement à leur contexte particulier. Cette phase dure pendant toute la période où le système sera utilisé, il s'agit d'initialiser des scénarios ou de renseigner des informations pour des sessions d'utilisation particulière mais également de faire évoluer le système en mettant à jour les contenus proposés ou en y intégrant de nouveaux ;
- la **phase d'utilisation** de l'environnement virtuel qui est l'utilisation effective, par un apprenant, du dispositif avec la participation éventuelle d'un formateur.

Ces différents objectifs peuvent en réalité être regroupés selon qu'il sont relatifs à la **la facilitation de production de l'environnement virtuel et à son utilisation dans un contexte d'apprentissage située dans le cadre d'une scénarisation automatisée.**

1.3.1 Facilitation de la production des environnements virtuels pour l'apprentissage

Nous avons identifié trois critères principaux que doivent respecter les modes de production des environnements virtuels pour permettre une meilleure intégration en contexte réel :

- rendre possible le passage à l'échelle ;
- permettre la réutilisation des contenus ;
- faciliter la maintenance du système.

Passage à l'échelle

Actuellement, l'écriture de contenu pour les environnements virtuels scénarisés s'avère un réel goulet d'étranglement à la production que ce soit pour les environnements virtuels de récit interactif [Spierling and Szilas, 2009] comme pour les EVAH [Marc and Gardeux, 2007]. La plupart des systèmes ont de fait un ensemble de scénarios limités. Le projet FACADE [Mateas and Stern, 2003] est emblématique : trois ans d'écriture des contenus ont été nécessaires pour rendre possible cette expérience interactive d'une vingtaine de minutes. Bien que ce projet permette une grande rejouabilité, celle-ci finit par atteindre ses limites rapidement.

Afin de permettre la production d'environnement virtuel pour la formation à des situations complexes, il devient nécessaire de rendre possible le passage à l'échelle des systèmes. C'est-à-dire que ceux-ci doivent pouvoir supporter une augmentation significative de la taille, de la complexité, et de la variabilité du domaine. Pour cela, le passage à l'échelle doit notamment se faire sans porter atteinte aux processus de production, à son appropriation ou à son utilisation.

Réutilisabilité

Un écueil majeur des approches de production habituelles est le manque de capitalisation possible d'une application à l'autre. Certains éléments de contenu sont communs à de nombreux domaines et pourtant il ne peuvent pas être ré-utilisés. L'objectif de réutilisabilité vise à rendre possible le partage de ressources entre différentes applications afin de pouvoir adapter la production en fonction des besoins sans investir dans des efforts qui ont déjà été fournis. Ainsi, une application destinée à la formation des novices pourrait facilement être reconvertie en application d'entraînement pour

des opérateurs expérimentés ou même en module d'évaluation.

Maintenabilité

Pour de nombreux environnements virtuels pour l'apprentissage, le moteur de jeu et le contenu qu'il met en œuvre sont intimement liés. Ils peuvent parfois être séparés, néanmoins l'effort d'écriture de contenu requiert à la fois un processus auteur mais également un processus de transposition du contenu auteur en langage compréhensible informatiquement. Ainsi, l'intervention d'un expert informaticien est nécessaire, ce qui rend difficile la maintenabilité et l'évolutivité de l'environnement. Ceci est d'autant plus crucial que le contexte de travail peut être amené à changer du fait de nouvelles procédures, de nouvelles pratiques ou de nouveaux matériels. Des mises à jour de l'environnement virtuel sont indispensables pour éviter de voir celui-ci rendu obsolète.

1.3.2 Scénarisation automatique pour l'apprentissage situé

Pour permettre un apprentissage situé efficace, un système de scénarisation automatique se doit de remplir les objectifs suivants :

- offrir une grande liberté d'action ;
- offrir une large gamme de scénarios ;
- garantir un certain contrôle pédagogique automatique ;
- permettre l'intervention du formateur à tout moment ;
- assurer la validité écologique du contenu proposé ;
- garantir l'explicabilité du scénario ;
- susciter l'intérêt de l'apprenant ;
- être résilient face aux interventions du formateur et de l'utilisateur.

Liberté d'action

Comme nous l'avons précisé, c'est en expérimentant que les apprenants conceptualisent le fonctionnement du monde. Pour rendre cela possible, le dispositif doit offrir une grande **liberté d'action**. Cependant, le système ne peut se limiter à donner à l'apprenant le **sentiment** de la liberté d'action [Thue et al., 2010] : l'impact de ses décisions dans l'environnement doit être réel pour permettre un apprentissage par l'expérimentation. Ainsi, l'environnement proposé doit permettre de prendre en compte les actions de l'utilisateur tout en maintenant le déroulement des événements dans un contexte propice à l'apprentissage.

De surcroît, la prise en compte des actions de l'apprenant doit se faire dans un délai suffisamment court pour que l'apprenant associe l'effet à l'action. Ce délai est le **temps interactif**, la littérature s'accorde sur un intervalle de latence entre 100 millisecondes et 1000 millisecondes.

Variabilité

Pour permettre l'apprentissage, qu'il soit initial ou dans le cadre d'une formation continue, le système doit pouvoir offrir une large panoplie de scénarios allant de situations simples, correspondant à la réalité quotidienne du terrain et au fonctionnement nominal des systèmes techniques et humains, jusqu'à des enchaînements complexes de situations dégradées. Cela permet ainsi de former les apprenants à toutes les éventualités, aussi improbables soient-elles.

Avec la possibilité d'offrir des scénarios variables, chaque session d'utilisation sera différente de la précédente. Ainsi, le système n'est pas contraint par un nombre de scénarios prédéfini et nécessairement limité. Ceci permet alors d'allonger la durée de vie du système et donc son utilisation sur le

long terme.

Contrôle pédagogique

Bien que les scénarios d'usage puissent mettre en jeu des situations de travail collectives, notre démarche vise à fournir un apprentissage individuel. La pluralité des parcours d'apprentissage, notamment dans les contextes de reconversion ou d'entraînement des personnes expérimentées, ne permet pas de proposer une séquence d'apprentissage type. En outre, les apprenants pouvant progresser à des rythmes différents, il est parfois difficile d'assurer la pertinence des activités proposées à un apprenant donné. Celles-ci peuvent s'avérer trop difficiles pour l'apprenant — manque de connaissances préalables, sollicitation cognitive trop intense — auquel cas, l'apprenant peut se retrouver en situation de stress et l'apprentissage est mis en péril. Au contraire, les activités peuvent également s'avérer trop faciles pour l'apprenant, ce qui, d'une part, est inutile du point de vue de l'apprentissage car il n'apporte pas de nouvelles connaissances, et qui, d'autre part, pourra démotiver l'apprenant. La pertinence pédagogique des activités proposées est donc un objectif primordial à remplir par un moteur de scénarisation pour un environnement virtuel pour l'apprentissage.

Pour permettre à l'apprenant une construction progressive de ses compétences ou un entraînement au rythme qui est le sien, il est nécessaire de personnaliser le contenu qui lui est proposé. Cette personnalisation se réalise par l'adaptation autant des éléments du scénario - le contenu intradiégétique - que des assistances - le contenu extradiégétique. Pour une meilleure cohérence des apprentissages, **l'adaptation peut se faire à différentes échelles.**

Au plus haut niveau, l'adaptation de l'enchaînement des types de situations rencontrées permet notamment de construire un parcours d'apprentissage. Dans le même temps, une adaptation fine et locale permet de moduler les effets des actions de l'apprenant dans l'environnement en fonction de son profil. Par exemple, si un apprenant est sur le point de réaliser une erreur, il peut être utile d'adapter la situation. Ainsi, même si une adaptation de haut niveau peut se faire *hors-ligne* (ordonnancement des sessions d'apprentissage), l'adaptation locale est nécessairement **dynamique** pour être pertinente au regard de l'apprenant.

Le scénario prescrit doit donc être modifiable en cours de jeu. A nouveau, le caractère dynamique de la scénarisation est essentiel pour une personnalisation efficiente. Nous définissons le **temps scénaristique** comme étant l'intervalle de temps au cours duquel une prise de décision sur le plan scénaristique est encore pertinente au regard de l'observation qui a été faite. Il faudra distinguer deux niveaux de temps scénaristique. Tout d'abord le cas de l'adaptation de la situation en cours pour lequel temps scénaristique est le temps interactif. Ensuite, le cas de la génération d'une nouvelle situation pour lequel le temps scénaristique est de l'ordre de la seconde compte tenu des temporalités mises en jeu dans les contextes qui nous intéressent.

Possibilités d'intervention du formateur

Nous pensons qu'il est primordial d'assurer l'appropriation d'un EVAH par les formateurs quelles que soient les possibilités technologiques qu'il offre. Il faut donc fournir aux formateurs les outils qui leur permettront d'instrumentaliser le dispositif et de l'insérer dans les parcours d'apprentissage qu'ils conçoivent. Ils doivent notamment avoir la possibilité d'intervenir à tous les niveaux sur la simulation. Cela peut être préalablement à l'utilisation du dispositif par la conception des situations d'intérêt ou le remplissage des informations relatives aux apprenants. Mais cela peut également être pendant l'utilisation du dispositif en proposant des assistances à l'apprenant ou en déclenchant des événements perturbateurs.

Validité écologique

Nous situant dans un paradigme d'apprentissage situé, pour qu'il y ait transfert d'apprentissage entre le monde virtuel et le monde réel, il est nécessaire que le virtuel soit *fidèle*, par certains aspects, au monde réel qu'il dépeint. Il n'est cependant pas nécessaire, voire souhaitable, que cette fidélité soit totale [Lourdeaux, 2001] ; cependant une grande attention doit être portée quand aux choix faits sur ces contraintes de fidélité.

Dans le cas d'un apprentissage au geste, la *fidélité perceptive* sera primordiale afin d'assurer le transfert des repères proprioceptifs entre les sensations simulées du monde virtuel et les sensations réellement éprouvées de la réalité. Au contraire, dans le cas de la formation à des compétences de haut-niveau et non techniques, la fidélité des perceptions sensorielles est bien moins importante que la fidélité des comportements, qu'il s'agisse des comportements du système considéré — le fonctionnement technique — ou qu'il s'agisse des comportements humains. Cette dernière catégorie étant cruciale dans les domaines où les facteurs humains sont prépondérants. L'intérêt d'une telle démarche est de faire en sorte que les processus décisionnels des personnes en situations virtuelles soient au plus proches des processus ayant cours dans les situations réelles [Burkhardt, 2003]. Il est donc nécessaire d'assurer la **validité écologique**, ce qui signifie que les situations proposées par l'environnement virtuel doivent être fidèles aux situations pouvant réellement se produire sur le terrain.

La propriété qui nous intéresse ici est bien la *fidélité* et non la *crédibilité*. Effectivement, l'environnement proposé doit être crédible dans le sens où l'utilisateur doit accepter la simulation comme une reproduction de la réalité. Cependant, l'important ici est de permettre un transfert d'apprentissage, il s'agit donc que les comportements adoptés par l'apprenant puissent être mis en œuvre dans un contexte réel. En outre, la *crédibilité* peut être une notion tout à fait relative si on considère certains domaines comme la maîtrise des risques par exemple. En effet, certaines chaînes d'accidents peuvent paraître complètement improbables et peu crédibles pour un observateur novice. Il n'en reste pas moins que celles-ci sont tout à fait possibles. Une reproduction fidèle, valide sur le plan écologique, de ce contexte doit pouvoir mettre en jeu cette séquence d'événements pour former des apprenants.

Explicabilité

En plus de correspondre au fonctionnement du monde réel, le comportement de l'environnement doit être explicable : l'apprenant peut, seul ou avec l'aide d'un formateur, comprendre les enchaînements d'actions et les chaînes de causalité. Il pourra ainsi reconstruire la chaîne d'événements dans ses représentations propres. Pour être explicable, le fonctionnement du monde doit être **cohérent**.

La cohérence du monde permet en outre à l'utilisateur de se bâtir un modèle mental du monde qui lui permettra d'anticiper les réactions de l'environnement, ce qui, en plus d'être un indicateur de l'apprentissage, permet de renforcer le sentiment de présence [Slater and Usoh, 1993].

Intérêt

La bonne acquisition des connaissances nécessite également la prise en compte de facteurs motivationnels pour optimiser l'apprentissage. [Winn, 2003] démontre l'importance de l'engagement, qu'il s'exprime par le sentiment de **présence** [Slater and Usoh, 1993] ou par l'état de **flow** [Csikszentmihalyi, 1991]. Cet état favorise la mobilisation des ressources cognitives des apprenants pour assurer un apprentissage efficace. Il peut être maintenu en proposant des activités adaptées à l'apprenant ainsi qu'en offrant des contenus suscitant la curiosité. Ceci peut notamment se faire par le récit d'une histoire au travers de la simulation. Par ailleurs, si l'apprenant est conforté dans son apprentissage — qu'il se rend compte qu'il apprend effectivement — il sera plus agréable et plus motivant pour lui de progresser. Un moteur de scénarisation doit donc prendre en compte cette composante et favoriser

la prise de conscience de la progression de l'apprenant.

Résilience

Nous avons vu que la **liberté d'action**, la **validité écologique** et la **pertinence pédagogique** étaient des objectifs qu'un moteur de scénarisation pour l'apprentissage devait remplir. Leur concomitance fait cependant naître un nouvel objectif. En effet, la scénarisation se doit de faire preuve de **résilience** pour assurer une certaine pertinence pédagogique malgré la liberté d'action de l'utilisateur et le respect du fonctionnement du système réel qui peuvent tous deux entraver les objectifs pédagogiques.

1.4 Problématique

L'ambition de ces travaux de thèse est de proposer une nouvelle approche pour la scénarisation personnalisée dans les environnements virtuels pour la formation.

Le verrou majeur vient de l'opposition entre les objectifs que nous nous sommes fixés quant aux possibilités de scénarisation personnalisée offertes par un EVAH et les objectifs liés à la production des EVAH. Nous souhaitons pouvoir offrir un large éventail de possibilités de scénarios pour permettre un apprentissage alliant entraînement, expérimentation, nouveauté et intérêt. S'agissant de domaines complexes, la description des différentes situations et de leurs enchaînements dans un modèle interprétable par les moteurs informatiques constituent un effort important et n'est parfois même pas réalisable. En outre, les possibilités de personnalisation sur les contenus deviennent rapidement limitées dans le cadre d'une approche de description exhaustive. Ce travail d'écriture s'oppose fondamentalement avec les objectifs de maintenabilité et de passage à l'échelle des EVAH.

Une autre difficulté naît du conflit entre la liberté d'action de l'apprenant, expérimentant le fonctionnement du monde par une approche essai-erreur et le souci de proposer un certain contrôle pédagogique. L'apprenant, par ses actions, peut s'écarter de la situation-problème prévue ou la faire évoluer vers un nouveau type de situations, alors qu'il n'a pas les ressources nécessaires pour une issue positive. Ce type d'échec pourrait s'avérer frustrant s'il n'est pas prévenu.

En outre, le besoin de personnalisation des contenus requiert de disposer d'informations relatives à l'apprenant. La question est de déterminer quelles sont ces informations permettant la prise de décisions sur le scénario alors que l'une des hypothèses est l'indisponibilité d'un modèle de la connaissance. En effet, nous partons du principe que chaque apprenant construit des représentations mentales qui lui sont propres. De plus, si une modélisation du domaine de connaissances était possible, elle constituerait un effort de création de contenu supplémentaire qui contreviendrait aux objectifs de facilitation de la production des EVAH.

1.5 Approche

L'apprentissage par essai-erreur étant primordial dans le type de formation auquel nous nous intéressons, nous veillerons à mettre en œuvre des simulations ouvertes qui offrent une grande liberté d'action. Cependant, le manque de garanties pédagogiques de ce type de simulation se révèle un frein à leur utilisation dans un cadre de formation, c'est pourquoi notre approche vise à permettre le contrôle dynamique d'une simulation ouverte afin de la guider vers des situations d'apprentissage. Ainsi, la simulation laisse toute liberté à l'apprenant d'expérimenter tout en proposant des enchaînements d'événements propices à l'apprentissage.

Pour cela, l'approche que nous proposons consiste à faire reposer la scénarisation dynamique et personnalisée sur des modèles experts sous-tendus par des métamodèles indépendants du contexte. Des processus décisionnels opérationnalisant des théories issues de sciences humaines utilisent ces modèles pour générer procéduralement des objectifs scénaristiques.

Notamment, pour répondre aux besoins liés à l'apprentissage, nous avons proposé une représentation du profil de l'apprenant comme une opérationnalisation de la zone proximale de développement de Vygotsky [Vygotsky, 1978] reposant sur un modèle de l'incertain. L'intérêt de l'utilisateur est maintenu par la création dynamique d'une histoire autour des événements se déroulant dans la simulation autonome. Cela est rendu possible par l'opérationnalisation de théories narratives structuralistes.

La simulation repose sur une base de connaissances en lien avec une représentation sémantique. Cette représentation permet de faciliter la production de l'environnement par la réutilisation de contenus existants. Elle permet également de pérenniser son exploitation en offrant aux formateurs, notamment, la possibilité de faire évoluer le contenu proposé.

Ce mémoire décrit l'ensemble de mes contributions pour la mise en œuvre de cette approche dans le cadre de cette thèse. Mes contributions majeures sont :

- un modèle de scénarisation automatique personnalisée reposant sur des modèles de connaissances ;
- TAILOR, une architecture et un moteur de génération dynamique et procédurale de scénarios personnalisés ;
- WORLD-DL, un langage permettant la conception, la production et l'exécution d'un environnement virtuel à partir d'un modèle de connaissances sur le domaine ;
- WORLDMANAGER, un moteur de simulation pour réaliser le maintien du monde décrit par le modèle de domaine ;
- l'espace-zpd, un profil de l'apprenant reposant sur une mise en œuvre informatique des théories constructivistes, et les processus décisionnels qui l'accompagnent ;
- DIEGETIC, un méta-modèle de représentation des connaissances pour décrire les éléments d'une diégèse ;
- la diégétisation, un modèle d'enrichissement diégétique d'éléments scénaristiques ;

1.6 Contexte

1.6.1 La plateforme HUMANS

Les travaux de cette thèse ont vocation à participer à l'élaboration de la plateforme HUMANS, pour HUMan Models based Artificial Environment Software platform. Cette plateforme permet la création et l'exploitation d'environnements virtuels simulant des contextes dans lesquels les facteurs humains sont prégnants. Elle se constitue d'un ensemble de moteurs décisionnels raisonnant sur des modèles communs (voir figure 1.1). Les moteurs sont indépendants les uns des autres, ce qui rend l'approche modulaire et permet d'utiliser l'une ou l'autre des fonctionnalités de la plateforme.

1.6.2 Cas d'applications

Deux cas d'application particuliers ont servi de support de réflexion pour les propositions présentées dans ce mémoire :

- le projet NIKITA, sur la formation des assembleurs-monteurs en aéronautique ;
- le projet SIMADVF sur la formation des assistantes de vie de familles ;

NIKITA - Formation des monteurs-assembleur dans le domaine aéronautique

Le projet NIKITA, pour Natural Interaction Knowledge In Training Aeronautics, dans le cadre duquel s'inscrit cette thèse, est financé par l'ANR (CONTINT 2010). Il réunit un ensemble de parte-

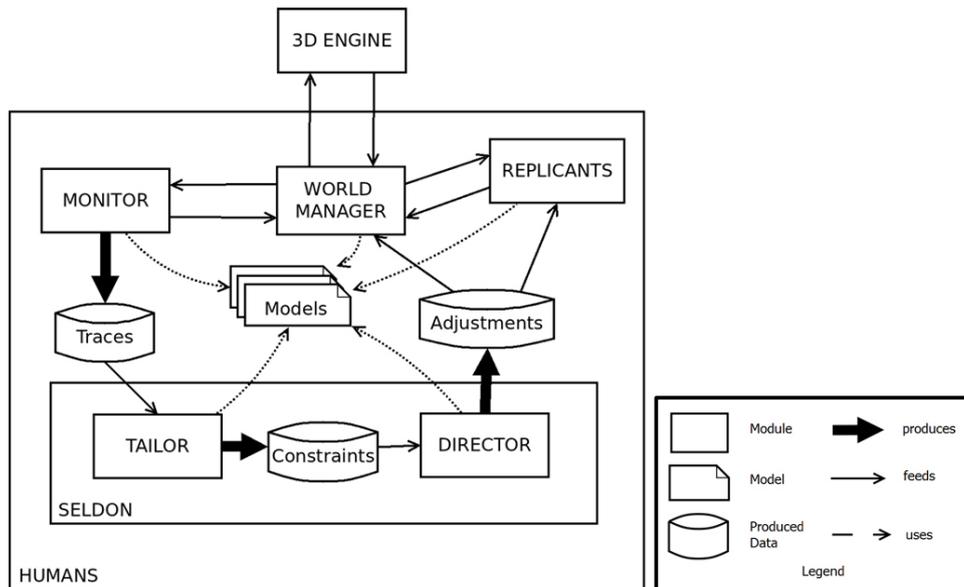


FIGURE 1.1 – La plateforme HUMANS

naires — HEUDIASYC, le LATI (Université Paris-Descartes), le CEA-List, AIRBUS, AEROLIA, EMISSIVE, le lycée technique Henry Potez — autour de la thématique de la formation aux compétences perceptivo-gestuelles dans le domaine de la construction aéronautique.

Les scénarios NIKITA sont complexes dans la mesure où ils incorporent une lourde charge cognitive par la variabilité des situations qu'ils présentent. En effet, la construction aéronautique implique l'utilisation d'un large panel d'équipements, d'outils et d'outillages en fonction des matériaux et des parties de l'appareil concernés. De plus, les opérateurs sont amenés à travailler de manière collective que ce soit en situation de co-activité (plusieurs personnes affectées à des tâches différentes sur un même poste de travail) que de collaboration (plusieurs personnes devant réaliser une tâche ensemble).

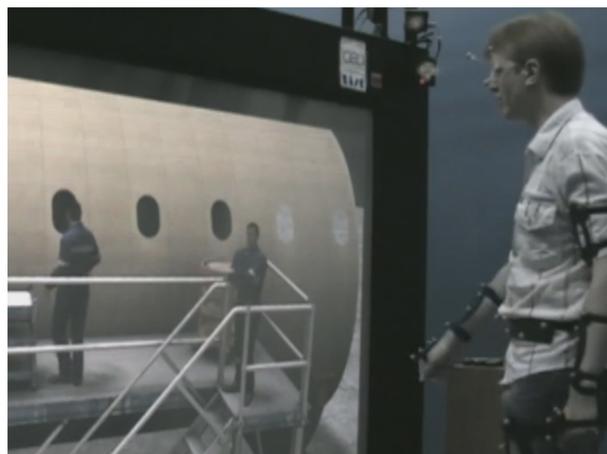


FIGURE 1.2 – Dispositif immersif pour le projet NIKITA

Dans le cadre du projet, deux démonstrateurs ont été réalisés : un démonstrateur en interaction naturelle (voir la figure 1.2) et un démonstrateur avec interface bureautique classique.

SIMADVF - Formation des assistantes de vie de famille

Le projet SIMADVF est financé par la Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services sur l'appel à projets Serious Games 2009 et est réalisé en partenariat avec le laboratoire HEUDIASYC, l'Association nationale pour la Formation Professionnelle des Adultes (AFPA) et la société VIRTUOFACTO. L'objectif de ce projet est de fournir un environnement virtuel pour l'apprentissage humain à destination des assistantes de vie de famille (voir la figure 1.3). Il vise notamment à sensibiliser sur les risques liés à la sécurité dans la garde à domicile des enfants. L'approche HUMANS montre ici sa capacité à être utilisée dans des contextes différents des contextes industriels.



FIGURE 1.3 – Capture d'écran du démonstrateur SIMADVF

L'intérêt de l'approche par environnement virtuel est ici manifeste, elle permet la rencontre entre les apprenants et des situations d'apprentissage sans risque malgré leur gravité parfois extrême. De plus, l'enchaînement soigneusement choisi des situations permet de créer une gradation dans la complexité. En plus d'être formés aux compétences liées à la maîtrise des risques, les apprenants sont sensibilisés à la posture professionnelle qu'ils doivent entretenir avec les enfants et les parents. Un démonstrateur a été réalisé en dehors du cadre de cette thèse et avant son commencement. Cependant, nous avons profité de l'ensemble des données à disposition pour appliquer l'approche à ce domaine.

1.7 Organisation du mémoire

Un état de l'art est présenté dans les chapitres 2, 3 et 4. Le chapitre 2 présente différents travaux sur la scénarisation des environnements virtuels analysés selon différentes propriétés. Le chapitre 3 porte sur les différentes approches d'évaluation automatique des apprenants dans les environnements informatiques pour l'apprentissage humain. L'état de l'art se clôt dans le chapitre 4 en présentant différents travaux de modélisation des connaissances dans les environnements virtuels.

Nos contributions sont décrites dans les chapitres 5, 6, 7, 8 et 9. Le chapitre 5 présente l'approche générale de scénarisation personnalisée que nous avons proposée. Le chapitre 6 décrit WORLD-DL, un métamodèle pour la représentation de connaissances pour la conception et l'utilisation d'environnement virtuel pour la formation. Il décrit également le fonctionnement du moteur WORLD MANAGER assurant le maintien de la base de connaissances sur le monde.

Le chapitre 7 traite de la problématique de la modélisation de l'apprenant dans le cadre constructiviste. Nous y décrivons notre contribution : un espace vectoriel de situations associées à des valeurs de croyance sur la capacité de l'apprenant à gérer les situations et un algorithme de sélection de situations reposant sur des règles pédagogiques.

Nous décrivons dans le chapitre 8 comment les modèles de connaissances sur le domaine sont utilisés pour générer procéduralement des objectifs scénaristiques pédagogiques.

Le chapitre 9 décrit le métamodèle DIEGETIC ainsi que le processus de diégétisation automatique permettant de créer des objectifs scénaristiques narratifs à partir d'objectifs scénaristiques pédagogiques.

Les chapitres 10 et 11 décrivent respectivement l'application de nos propositions dans différents travaux et leurs évaluations.

Nous proposons une discussion sur nos travaux, leurs atouts et leurs limites dans le chapitre 12. Nous y présenterons également un certain nombre de perspectives. Enfin nous concluerons ce mémoire dans le chapitre 13.

Première partie

Etat de l'art

Chapitre 2

Scénarisation dynamique dans les Environnements Virtuels

“ I don't know if you've ever noticed this, but first impressions are often entirely wrong. ”
The Bad Beginning, Lemony Snicket

Sommaire

2.1 La nature des objectifs scénaristiques	34
2.1.1 Des objectifs scénaristiques explicites	34
2.1.2 Des objectifs scénaristiques implicites	35
2.2 La spécification des objectifs scénaristiques	36
2.2.1 Les approches scriptées	36
2.2.2 Les approches génératives	37
2.2.3 Les approches hybrides	37
2.3 L'autonomie dans l'environnement virtuel	39
2.4 Les niveaux d'agrégation	39
2.4.1 Niveau microscénaristique	40
2.4.2 Niveau mésoscénaristique	40
2.4.3 Niveau macroscenaristique	41
2.5 Le type des objectifs scénaristiques	41
2.5.1 Les objectifs scénaristiques pédagogiques	41
2.5.2 Les objectifs scénaristiques narratifs	42
2.6 Le niveau diégétique	42
2.6.1 Intra-diégétique	42
2.6.2 Extra-diégétique	43
2.7 Les mécanismes de résilience	43
2.8 Bilan et positionnement	44

La scénarisation des environnements virtuels est une problématique complexe qui a été traitée par des communautés de recherche différentes.

La communauté du récit interactif (*interactive storytelling*) s'intéresse à la scénarisation depuis de nombreuses années, indépendamment des environnements virtuels [Meehan, 1977]. Les travaux de cette communauté s'attachent principalement à concevoir des systèmes pour lesquels la qualité de l'histoire produite est primordiale.

La communauté des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH), et plus

précisément, les environnements à visée éducative, s'intéresse depuis longtemps à l'orchestration des situations d'apprentissages et plus récemment à la manière de mettre en œuvre ces situations pour les rendre engageantes. Les travaux de recherche sur les Jeux Sérieux (JS) s'inscrivent dans une démarche synergique entre la proposition de contenu engageant et les apports pédagogiques. Nous nous démarquons quelque peu de cette communauté en ce que nous ne faisons pas appel aux ressorts de la **ludification** [Deterding et al., 2011] qui visent à introduire des mécaniques de jeu dans une application non ludique pour encourager l'utilisateur. Bien que la ludification puisse être un levier important pour la motivation des apprenants, celle-ci ne peut se faire qu'à partir du moment où les scénarios sont en place, et c'est la question qui nous a intéressée. Par ailleurs, l'ajout d'aspects ludiques doit se faire en prenant en considération les spécificités de chaque domaine pour éviter de nuire à la validité écologique du contenu proposé.

Les acteurs de la communauté de la réalité virtuelle s'intéressent également à la question de la scénarisation maintenant que les dispositifs rendent possible la mise en place d'expériences hautement interactives et immersives. La scénarisation dans ce contexte peut être liée à une finalité d'apprentissage, on rejoint alors les mêmes enjeux que la communauté ELAH [Gerbaud et al., 2008]. Celle-ci peut être liée à une finalité expérientielle, l'accent pouvant être mis sur le déroulement d'une expérience interactive inédite auquel cas on rejoint la communauté du récit interactif. La scénarisation peut également être parfaitement contrôlée pour offrir une expérience particulière, il s'agit alors des mêmes problématiques de scénarisation que le jeu vidéo.

L'état de l'art proposé ici tente d'analyser les travaux de ces communautés au travers de différentes propriétés. Chaque sous-section de cet état de l'art définit la propriété observée ainsi que sa mise en œuvre dans la littérature.

Nous examinerons notamment l'état de l'art à la lumière des **objectifs scénaristiques**.

Objectif scénaristique

Un **objectif scénaristique** est une unité de composition d'un scénario prescrit, il décrit un ensemble de contraintes que le scénario effectif doit respecter.

L'étape de spécification d'un moteur de scénarisation produit des objectifs scénaristiques pour prescrire un scénario, tandis que l'étape de contrôle vise à assurer que ces objectifs sont atteints au sein d'un scénario effectif.

2.1 La nature des objectifs scénaristiques

Nous distinguons en premier lieu les objectifs scénaristiques selon qu'ils répondent à une description **explicite** ou **implicite** de ce qui est attendu dans le scénario.

2.1.1 Des objectifs scénaristiques explicites

Ces contraintes sont **explicites** lorsqu'elles imposent un déroulement particulier, elles décrivent alors **ce qui doit** arriver. Bien qu'explicite, le **niveau d'abstraction** de l'objectif peut-être plus ou moins grand. Ainsi, un objectif explicite peut être **concret** et reposer sur des instances de la simulation en cours. Par exemple, [Riedl and Young, 2010] définissent une situation initiale et une situation finale pour chaque personnage du scénario (voir figure 2.1) sous la forme d'assertions sur le monde exprimées par des prédicats.

Les objectifs concrets permettent d'assurer un contrôle très fin du scénario en supervisant précisément toutes les étapes du scénario. Cependant, le besoin d'avoir une situation spécifique n'est pas toujours nécessaire.

character(aladdin) male(aladdin) knight(aladdin) at(aladdin, castle) alive(aladdin) single(aladdin) loyal-to(aladdin, jafar) character(jafar) male(jafar) king(jafar) at(jafar, castle) alive(jafar) single(jafar)	character(jasmine) female(jasmine) at(jasmine, castle) alive(jasmine) single(jasmine) beautiful(jasmine) character(dragon) monster(dragon) dragon(dragon) at(dragon, mountain) alive(dragon) scary(dragon)	character(genie) monster(genie) genie(genie) in(genie, lamp) confined(genie) alive(genie) scary(genie) place(castle) place(mountain) thing(lamp) magic-lamp(lamp) has(dragon, lamp)
--	---	--

married-to(jafar, jasmine)	¬alive(genie)
----------------------------	---------------

FIGURE 2.1 – Situation initiale et situation finale explicites [Riedl and Young, 2010]

Au contraire, des descriptions **abstraites** sur les objectifs scénaristiques permettent de ne prescrire que ce qui est essentiel pour les besoins du scénario et ainsi de conserver une marge de manœuvre pour la réalisation de ces objectifs. En effet, la description se faisant alors en terme de concepts ou de contraintes, il existe plusieurs solutions permettant de satisfaire l’objectif. La mise en place de tels objectifs présuppose l’utilisation d’un modèle de connaissances permettant d’exprimer des concepts plutôt que des instances.

Dans SIMADVF [Amokrane et al., 2014], un jeu sérieux pour la formation des assistantes de vie, un objectif scripté est spécifié : la simulation doit mener à une situation d’étouffement d’un enfant. Il y a cependant différentes manières pour qu’un tel accident se déclenche : l’enfant peut avaler des billes en jouant dans la maison, il peut manger des baies dans le jardin, etc.

Les objectifs abstraits permettent de définir des déroulements souhaitables à très haut niveau, cependant, un niveau d’abstraction supplémentaire peut être nécessaire lorsque les événements en eux-mêmes ne sont pas significatifs. Ce niveau d’abstraction peut être atteint grâce à des objectifs implicites.

2.1.2 Des objectifs scénaristiques implicites

Les contraintes sur le scénario peuvent également être **implicites** lorsqu’elles décrivent **comment** le scénario doit se dérouler. Liés au contexte de la simulation, ces objectifs visent à borner le contenu de celle-ci sans pour autant expliciter les déroulements attendus. [Weyrauch, 1997] initie les travaux en ce sens dans le domaine du récit interactif avec l’architecture Moe. L’objectif scénaristique est la maximisation, sur tout le scénario, d’une fonction d’évaluation reposant sur un ensemble de propriétés liées à l’utilisateur (voir figure 2.2). Ainsi, les branches du scénario maximisant cette fonction sont préférées aux autres.

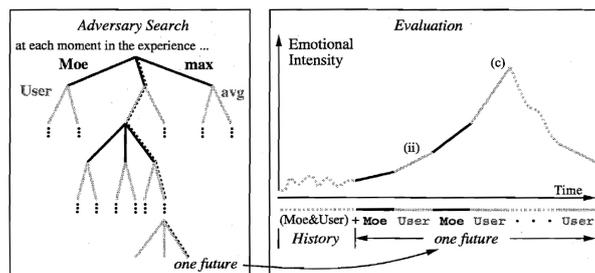


FIGURE 2.2 – Prise de décision à partir d’une fonction d’évaluation [Weyrauch, 1997]

Le système IDTENSION [Szilas, 2003] utilise une approche similaire et cherche à maximiser une fonction d'évaluation reposant sur des *critères narratifs* semblables aux propriétés de Moe. [Delmas, 2009] propose de superviser le déroulement du scénario en faisant en sorte que la succession des situations réponde à un critère de tension suivant un arc aristotélicien. Étant issue des théories sur la narration et sur le récit, l'utilisation d'objectifs implicites est moins courante dans la scénarisation des environnements virtuels pour la formation. Toutefois, dans le projet SIMADVF, un tuteur intelligent fixe des objectifs scénaristiques sous la forme d'une valeur de *complexité* et d'une valeur de *gravité*, toutes deux calculées à partir du profil de l'apprenant. Ces valeurs influencent le processus décisionnel des personnages virtuels peuplant l'environnement : plus la valeur de *gravité* est élevée, plus les enfants auront tendance à se mettre dans des situations risquées (étouffement, chute, etc.).

2.2 La spécification des objectifs scénaristiques

La spécification d'un objectif consiste à déterminer son contenu quels que soient sa nature et son niveau d'abstraction. Nous distinguons trois approches :

- les approches scriptées, dans lesquelles les contenus sont explicitement décrits *hors-ligne* ;
- les approches génératives, dans lesquelles les contenus sont issus d'un processus automatique ;
- les approches hybrides qui utilisent des processus automatisés avec du contenu définis manuellement.

2.2.1 Les approches scriptées

La spécification des objectifs scénaristiques peut se faire directement par des auteurs en amont de l'exécution de l'environnement dans lequel ils prendront place. Cela peut se faire de manière très **linéaire**, comme c'est le cas pour GVT [Gerbaud, 2008] [Gerbaud et al., 2008], CS-WAVE [Da Dalto, 2004], VTT [Crison et al., 2005] et EMSAVE [Buttussi et al., 2013] [Vidani and Chittaro, 2009] qui permettent l'apprentissage de procédures dans des situations clairement définies.

Le projet européen 80Days¹ [Kickmeier-Rust et al., 2011] a permis le développement d'un outil de formation dont la **structure narrative** est scriptée et poursuit une trame définie, celle du *Périple du Héros* [Campbell, 2008].

L'écriture de scénarios à **embranchement** à la manière des "*livres dont vous êtes le héros*" telle qu'elle est faite dans les projets ICTLEADERS [Gordon et al., 2004] et MRE [Swartout et al., 2001] permet d'offrir une certaine variabilité dans les scénarios en prévoyant des alternatives à des moments clés.

Cette méthode est largement privilégiée dans les jeux sérieux commerciaux, certains outils de conception tels que LAMS [Dalziel, 2008] permettent l'écriture de ce type de scénario. Elle permet d'avoir un contrôle très précis sur le contenu présenté à l'utilisateur, mais requiert un effort d'écriture considérable. Afin d'assurer que les objectifs soient atteints, les environnements reposant sur ces approches se montrent très peu résilients et limitent la liberté d'action de l'utilisateur. Ainsi, il est impossible pour un apprenant d'avoir une grande capacité d'intervention sur l'évolution du système (on parle d'agentivité, *user agency*). Cette limitation dans l'interaction de l'utilisateur entrave le sentiment de présence et est dommageable dans le cadre d'un contexte d'apprentissage par essai-erreur. De plus, la linéarité d'un scénario scripté inhibe complètement l'occurrence de situations non prévues pouvant s'avérer pertinentes d'un point de vue pédagogique.

1. <http://www.eightydays.eu/>

2.2.2 Les approches génératives

Une approche complètement opposée consiste à **générer**, de manière automatique et dynamique, les objectifs scénaristiques à partir d'un ensemble de connaissances sur le domaine et sur l'apprenant. Bien que les aspects narratifs aient été décrits manuellement dans 80DAYS, les aspects pédagogiques reposent tout comme dans le projet ELEKTRA sur la modélisation des connaissances sur l'apprenant au travers d'un réseau bayésien pour permettre au système d'inférer automatiquement les types de situations qui seront instanciées sur des problèmes concrets. D'un point de vue pédagogique, ce mode de définition du contenu scénaristique est plus efficace puisqu'il permet d'adapter le contenu scénaristique à l'apprenant sans avoir à prévoir tous les cas possibles.

Cependant, la plupart des travaux que nous avons rencontrés concernent l'apprentissage scolaire ou des domaines clairement définis dans lesquels les actions disponibles, et donc les déviations possibles, sont relativement limitées. Ceci s'adapte donc difficilement aux contextes de situations complexes que nous souhaitons adresser.

2.2.3 Les approches hybrides

Enfin, les approches **hybrides** visent à un compromis entre la détermination hors-ligne des objectifs par les auteurs et leur détermination dynamique et automatique par des systèmes intelligents. Dans les travaux sur AEINS [Rodhod, 2010], Rania Rodhod propose un mode hybride dans lequel des objectifs scénaristiques de haut niveau, les *teaching moments*, sont sélectionnés parmi un corpus en regard du profil de l'apprenant. A l'intérieur des *teaching moments* on retrouve une structure de graphe complètement scriptée (voir figure 2.3)

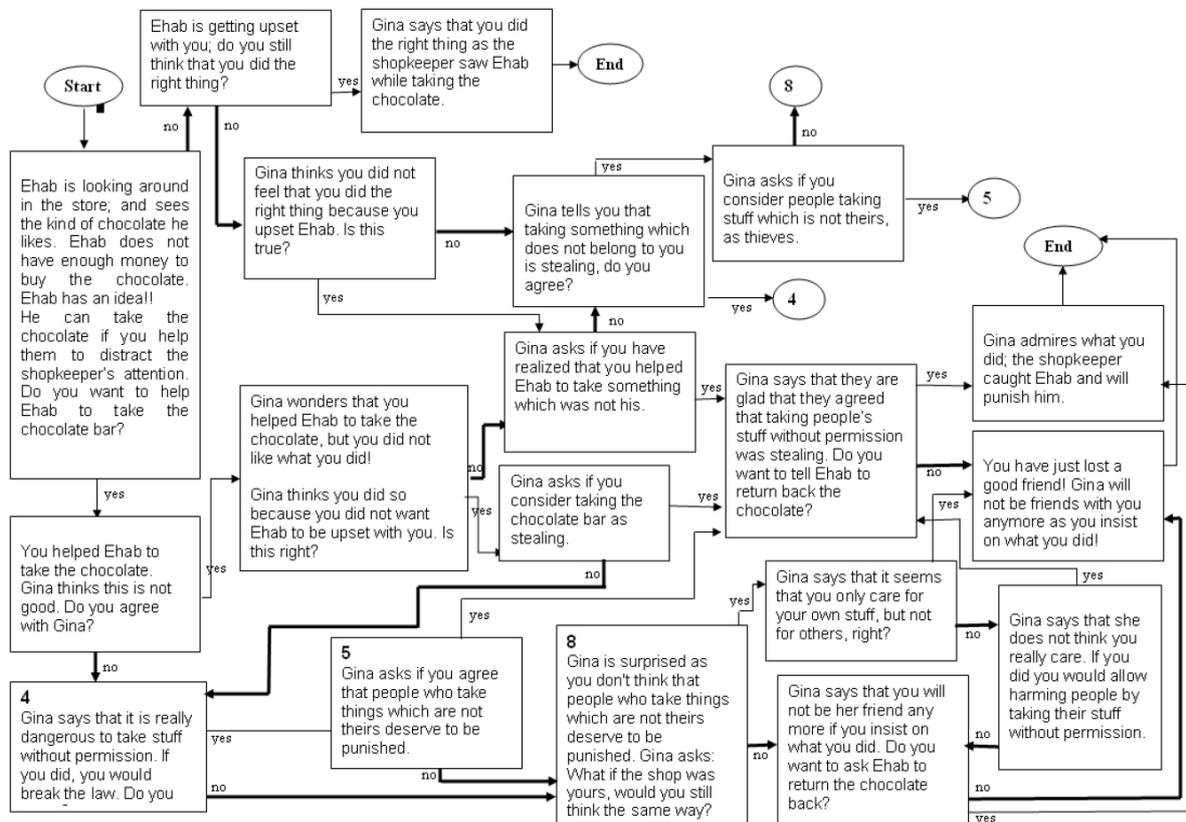


FIGURE 2.3 – Description d'un *Teaching Moment* [Rodhod, 2010]

Pour l'apprenant, l'interactivité se fait également sur deux modes : entre les *teaching moments* il bénéficie d'une grande liberté d'action, alors que celle-ci est considérablement réduite dès lors qu'il entre dans un teaching moment (voir figure 2.4).

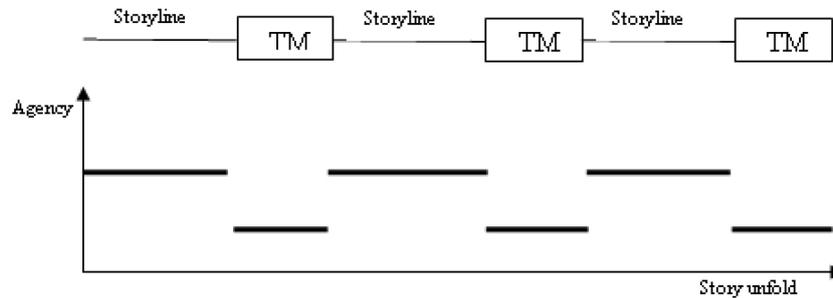


FIGURE 2.4 – Gestion de l'agentivité dans AEINS

Dans IN-TALE [Riedl et al., 2008], des *islands* (qu'on peut également appeler *plot points* [Magerko et al., 2005] ou *landmarks*) ont été spécifiés manuellement : il s'agit d'états du monde par lesquels le scénario doit nécessairement passer. Un moteur de planification s'assure de maintenir des chemins vers ces états du monde quelles que soient les actions de l'utilisateur. La méthode du Automated Scenario Adaptation [Niehaus and Riedl, 2009] [Niehaus et al., 2011] utilise des techniques de raffinement de plan pour modifier un scénario écrit par un auteur en utilisant des connaissances renseignées dans un modèle de domaine incorporant aussi bien des informations sur la structure du monde que sur les stratégies d'apprentissage (voir figure 2.5).

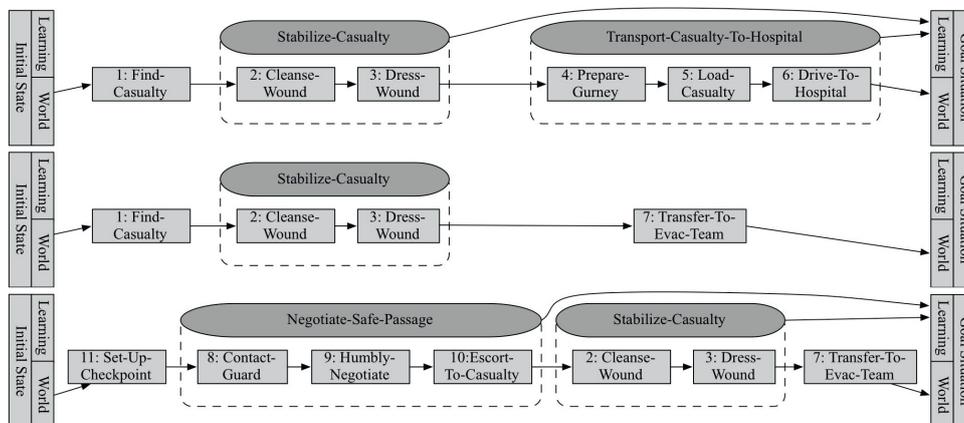


FIGURE 2.5 – Raffinement de plan dans à partir d'un modèle du domaine [Niehaus et al., 2011]

Les travaux de [Zook et al., 2012] [Magerko et al., 2005] [Magerko et al., 2006] sont également des représentants de cette approche. L'approche hybride est poussée à son extrême dans CRYSTAL ISLAND [Mott and Lester, 2006b] [Mott and Lester, 2006a]. Dans cet outil invitant des étudiants à parfaire leurs connaissances en microbiologie en menant une enquête, **un seul objectif** scénaristique est prédéfini et sert de situation finale dans le scénario : il s'agit de la résolution de l'enquête. Un algorithme de génération de plan associé à un modèle du domaine permet de générer des objectifs scénaristiques intermédiaires qui peuvent mener l'apprenant à la situation finale. A l'opposé, dans VRAPTOR [Shawver, 1997], le formateur spécifie la situation initiale et la simulation évolue par elle-même. En combinant des objectifs issus d'auteurs humains et des objectifs générés, ce type de système bénéficie de l'expertise pédagogique humaine tout en offrant une certaine rejouabilité.

2.3 L'autonomie dans l'environnement virtuel

La littérature évoque la distinction entre les **approches centrées scénarios** et les **approches centrées personnages**.

Les approches centrées scénarios, qui sont des **approches fortement contrôlées**, reposent sur une supervision globale du scénario par un *drama manager* tant dans sa spécification que dans sa mise en œuvre. Cela permet notamment d'assurer la rencontre avec des situations particulières impliquant des considérations pédagogiques ou narratives. Cependant, un tel contrôle nécessite de donner des ordres aux entités de la simulation. Si celles-ci ne sont dotées d'aucune autonomie, elles sont inactives lorsqu'elles ne sont pas impliquées dans le scénario. Les entités peuvent être *semi-autonomes* comme dans [Riedl et al., 2008], elles obéissent alors aux ordres issus de la supervision globale au risque de perdre toute cohérence avec leurs comportements passés. Dans les deux cas, l'environnement virtuel souffre d'une perte de cohérence dans la simulation.

Les approches centrées-personnages, que l'on qualifiera également d'**approches fortement autonomes**, sont représentées dans des travaux tels que I-STORYTELLING [Cavazza et al., 2002], FEAR-NOT! [Aylett et al., 2006] ou MRE [Hill et al., 2001], le scénario émerge des interactions entre l'utilisateur et le système qui a ses propres règles d'évolution. Il existe en fait une forme de **contrôle distribué** entre les différentes entités autonomes dont les mécanismes de prises de décision sont conçus pour maximiser l'intérêt du scénario. Le manque de coordination entre les entités autonomes ne permet cependant pas de garantir la rencontre avec des situations d'intérêt.

Nous considérons toutefois que le terme d'approche *centrée-personnages* ne recouvre pas l'étendue des approches qu'il considère. En effet, l'autonomie dans un environnement virtuel ne repose pas uniquement sur les personnages virtuels mais également sur ce que nous appellerons plus généralement des entités autonomes. Celles-ci incluent notamment en plus des personnages virtuels : la simulation physique, la simulation du système technique, de même que la simulation des événements aléatoires. [Aylett, 1999] propose le terme **d'approche émergente** car le scénario *émerge* des comportements autonomes des entités de la simulation.

Les approches hybrides mêlant autonomie et contrôle étant de plus en plus courantes, il ne s'agit plus d'une dichotomie entre les approches contrôlées et les approches non-contrôlées (autonome/émergente), mais plutôt d'un continuum sur lequel se positionnent différents travaux en fonction de l'importance du contrôle ou de l'autonomie (voir figure 2.6). Par exemple, dans FACADE [Mateas and Stern, 2003], les personnages ont des comportements autonomes mais leurs motivations sont monitorées au niveau global pour servir l'intérêt dramatique.

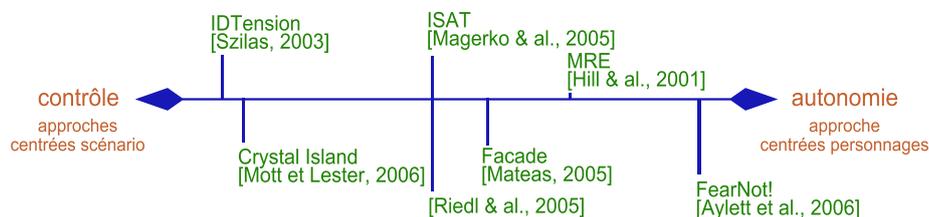


FIGURE 2.6 – Autonomie et contrôle dans différents travaux sur la scénarisation

2.4 Les niveaux d'agrégation

Dans un environnement virtuel d'apprentissage, la scénarisation peut se faire à différents niveaux de granularité. [Delmas, 2009] identifie quatre niveaux de granularité (scène, acte, épisode, série) pour lesquels les formes de la scénarisation diffèrent. Dans le contexte de la scénarisation des envi-

ronnement virtuels, le niveau *acte* ne paraît pas pertinent. En effet, il constitue un découpage artificiel qui ne constitue pas une unité de temps ou de lieu ni du point de vue du contenu scénaristique, ni du point de vue de la façon dont il est expérimenté par l'utilisateur. Ainsi, nous proposons de distinguer plutôt les **niveaux d'agrégation** suivants :

- le niveau **microscénaristique** qui est celui de la **situation en cours** ;
- le niveau **mésoscénaristique** qui est celui de la **session d'apprentissage** ;
- le niveau **macroscénaristique** qui est celui du **parcours d'apprentissage**.

Nous allons maintenant préciser ces notions et étudier leur utilisation dans les travaux liés à la scénarisation interactive.

2.4.1 Niveau microscénaristique

La scénarisation au niveau microscopique vise à agir sur la situation en cours de déroulement. Les interventions possibles permettent de complexifier/simplifier en ajoutant/supprimant des éléments ou en proposant des assistances. Du point de vue de l'apprentissage, le niveau microscénaristique met en jeu un ensemble de connaissances limité qui sont celles mises en jeu par la situation courante. La prise de décision se fait au regard du niveau de l'apprenant, renseigné dans un profil, par rapport à la situation concernée. Les interventions réalisées par le moteur de scénarisation à ce niveau s'apparentent donc aux interventions de la boucle interne d'un système tutoriel intelligent (STI) [Vanlehn, 2006]. Ainsi, la plupart des EVAH associés à un STI disposent de ce niveau d'agrégation. Par ailleurs, les adaptations proposées au niveau microscénaristique n'ont de sens que si elles sont dynamiques : seule la prise en compte du profil de l'apprenant en temps réel peut permettre la mise en place d'une stratégie efficace.

Par exemple, dans le projet v3s, le déclenchement d'une fuite de matière dangereuse est déterminé dynamiquement pendant la réalisation de la tâche pour la rendre plus complexe selon que l'utilisateur est novice ou expert [Barot et al., 2013].

2.4.2 Niveau mésoscénaristique

Ce niveau est celui de la session d'apprentissage. Nous définissons **une session comme étant un moment d'utilisation continue du dispositif d'apprentissage** commençant à l'entrée de l'utilisateur dans l'environnement virtuel et se terminant à sa sortie. Dans l'intervalle, l'apprenant pourra rencontrer différentes situations. Celles-ci sont **sélectionnées** et **ordonnées** pour être présentées à l'utilisateur. Au cours d'une session, différents ensembles de connaissances seront mobilisés sans pour autant couvrir l'ensemble des connaissances à acquérir. La prise de décision quant à la sélection et à l'ordonnement des situations se fait au regard du profil de l'apprenant et des objectifs pédagogiques. Si l'on se réfère à nouveau aux STI, le niveau mésoscopique correspond à la *boucle externe* visant à sélectionner la prochaine tâche à faire exécuter à l'apprenant.

Dans de nombreux systèmes, le niveau mésoscénaristique n'est pas présent ou est confondu avec le niveau macroscénaristique. C'est le cas lorsque l'environnement ne fournit qu'un unique scénario de base [Mott and Lester, 2006b]. Dans d'autres cas [Kickmeier-Rust et al., 2011] [Kickmeier-Rust and Albert, 2008], le parcours d'apprentissage peut être découpé en différentes sessions de manière artificielle par le biais d'un mécanisme de sauvegarde/chargement de la progression. Le découpage ne prend alors pas en compte des considérations pédagogiques mais uniquement un intérêt pragmatique : les sessions de jeu sont limitées dans le temps.

Dans SIMADVF, différents épisodes, rejouables plusieurs fois, mettent en œuvre des situations d'apprentissage différentes. Chaque épisode est introduit par une séquence de présentation et se termine lorsque les tâches ont été réalisées.

2.4.3 Niveau macroscéaristique

Le niveau macroscéaristique est celui du parcours d'apprentissage que fournit l'EVAH. Il débute par la première utilisation du système et se termine lorsque l'apprenant est supposé avoir acquis l'ensemble des connaissances que l'EVAH est chargé de véhiculer.

Lorsque le niveau mésoscéaristique existe, le niveau macroscéaristique est une couche de supervision sur les sessions : il conditionne leurs ordonnancements, leurs initialisations et leurs déroulements afin que celles-ci permettent de faire progresser l'apprenant au sein du parcours.

Le niveau macroscéaristique peut ne pas exister lorsque les sessions d'utilisations n'ont aucun rapport entre elles. C'est généralement le cas dans les travaux en *récit interactif* [Charles et al., 2002] : l'intérêt est de faire le récit d'une histoire dans un moment d'utilisation, et non pas en terme d'une progression entre différentes sessions qu'on assimilerait alors à des *épisodes*.

Le niveau microscescaristique et le niveau macroscescaristique que nous avons développés ici sont à dissocier complètement de la *microadaptation* et de la *macroadaptation* telles que définie par [Arroyo et al., 2006], qui définissent respectivement la distinction entre les adaptations relatives au domaine d'apprentissage et les adaptations relatives à l'apprenant.

Cette distinction dans les niveaux d'agrégation peut s'illustrer en considérant les œuvres à épisode telles que les séries romanesques ou télévisuelles. Le niveau microscescaristique correspond à une scène d'un épisode. Il y a unité de temps et de lieu. Le niveau mésoscescaristique correspond à un épisode. L'action se passe au travers de différentes scènes qui, mises bout à bout, constituent un arc narratif dont le début et la fin sont compris dans l'épisode. Au niveau macroscescaristique, la succession des épisodes fait émerger un arc narratif courant sur toute une saison.

2.5 Le type des objectifs scénaristiques

Deux grandes communautés se sont intéressées à la scénarisation interactive :

- la communauté du récit interactif qui vise la production de récit interactif avec des critères sur la qualité narrative tels que la création de tension dramatique, la prise en compte des motivations des personnages, l'unité de temps, l'unité de lieux, etc., afin d'offrir à l'utilisateur une expérience ludique agréable.
- la communauté des **environnements informatiques pour l'apprentissage humain** (EIAH) qui vise la production et le contrôle de scénario d'apprentissage pour l'assimilation graduelle de connaissances chez un apprenant.

Les deux communautés s'enrichissent mutuellement : la communauté EIAH bénéficie des avancées en IS sur la qualité des scénarios pour favoriser l'intérêt de l'apprenant, alors que la communauté IS profite des avancées en EIAH sur la modélisation et l'évaluation des utilisateurs pour personnaliser les récits.

Il convient cependant de distinguer les objectifs scénaristiques historiques de chacune de ces communautés.

2.5.1 Les objectifs scénaristiques pédagogiques

Ces objectifs ont deux visées : transmettre des connaissances et favoriser leur assimilation. D'une part, il convient de fixer des objectifs scénaristiques dont la réalisation va permettre à l'apprenant d'être mis dans une situation d'apprentissage par l'acquisition et la confortation de connaissances ou par la correction de misconceptions. Mais il convient également de fixer des objectifs destinés à maintenir l'apprenant dans un état particulier pour maximiser ses capacités d'apprentissages. Ainsi, les objectifs scénaristiques pédagogiques peuvent être explicites et viser à faire réaliser une tâche, ce qui

se traduit dans les environnements éducatifs par la proposition d'exercices particuliers [Kickmeier-Rust et al., 2006]. Ils peuvent également être implicites par la prescription de propriétés sur le scénario, liées notamment à la difficulté des situations à gérer [Fricoteaux, 2012] [Amokrane et al., 2014].

2.5.2 Les objectifs scénaristiques narratifs

Ils relèvent de l'histoire créée par la succession des événements indépendamment des contraintes d'apprentissage. Tout comme les objectifs scénaristiques pédagogiques, les objectifs narratifs peuvent être exprimés de manière explicite en spécifiant des assertions sur le monde (états du monde, événements...) qui déterminent le déroulement des événements. Les objectifs scénaristiques permettent notamment d'assurer la **continuité** du récit.

Continuité

Propriété des entités de la diégèse (personnages, lieux, événements...) à être conservées au cours du temps.

Cette définition ne limite pas l'évolution ni la dynamique de ces entités : un personnage adjuvant peut devenir un personnage opposant sans briser la continuité narrative. En effet, un tel passage peut être l'effet d'un événement particulier, qui d'ailleurs, peut ne pas être directement perceptible par l'utilisateur.

Les objectifs scénaristiques narratifs peuvent également être exprimés implicitement par des propriétés que les événements doivent respecter. Cela permet par exemple de superviser la *tension dramatique* dans [Delmas, 2009].

Nous constatons cependant que dans l'état de l'art, pour les travaux mêlant pédagogie et narration, les deux types d'objectifs sont fortement liés, voire confondus. En effet, en général, la définition du contenu narratif se fait en surcouche des activités pédagogiques [Mott and Lester, 2006b] [Rodhod, 2010]. La conception du contenu pédagogique de concert avec le contenu narratif permet de présenter les situations directement dans un scénario attrayant en contrôlant tous les aspects de la narration. Cependant, le mélange de ces deux types d'objectifs demande à ce que le concepteur dispose à la fois de compétence de pédagogue et de compétence de conteur. En outre, cela empêche de réutiliser le contenu décrit par le concepteur dans des contextes différents. Par exemple, une même situation d'apprentissage ne pourra prendre place dans deux histoires différentes.

2.6 Le niveau diégétique

La diégèse est l'univers dans laquelle se déroule l'histoire présentée par un scénario. Les niveaux intra-diégétique et extra-diégétique se distinguent donc par le fait que le contenu qu'il représente appartient, ou non, à la diégèse. Il ne s'agit pas ici de distinguer ce qui appartient aux ressorts de la narration de ce qui n'en relève pas, mais plutôt de distinguer ce qui relève de l'univers simulé de ce qui n'en relève pas.

2.6.1 Intra-diégétique

Le contenu intra-diégétique constitue ce qui est perceptible dans la simulation et qui serait perceptible dans le monde réel. Ainsi, les tâches à effectuer, les relations entre les personnages, les différents événements prenant place relèvent de la diégèse.

Des objectifs pédagogiques peuvent très bien être présentés de manière intra-diégétique, et c'est en

fait généralement le cas lorsqu'il s'agit d'amener l'apprenant à réaliser une certaine tâche ou à mettre en place une situation particulière [Rodhod, 2010]. Le niveau intra-diégétique peut également servir des desseins pédagogiques lorsqu'il s'agit de proposer des assistances à l'apprenant sans sortir du contexte de la simulation. Ainsi, une assistance peut être apportée par un personnage virtuel jouant le rôle d'un collaborateur [Zook et al., 2012].

La pertinence du niveau intra-diégétique pour les objectifs scénaristiques narratifs est plus évidente puisque c'est justement au travers de la diégèse que l'histoire est racontée. L'histoire est un ensemble de changements opérant dans une diégèse, et donc **sans diégèse il ne peut y avoir d'histoire**.

2.6.2 Extra-diégétique

Ce qui est extra-diégétique relève de ce qui n'existerait pas dans le monde réel mais qui peut malgré tout être rendu grâce aux capacités des environnements virtuels. Des objectifs scénaristiques narratifs peuvent également être présentés sous la forme d'interventions extra-diégétiques. En effet, des indications temporelles ou spatiales peuvent être renseignées en sur-impression de l'environnement (voir 2.7). On peut également avoir des informations plus générales sur les relations entre les personnages ou sur des événements passés qui ne peuvent être perçus par l'utilisateur. Il s'agit alors de contenus appartenant à la diégèse mais présentés en dehors de celle-ci.

Du point de vue des objectifs pédagogiques, il est courant dans les EIAH de proposer des assistances virtuelles à l'apprenant pour soutenir l'apprentissage. [Lourdeaux, 2001] dresse une liste complète des possibilités d'assistances pédagogiques.

	intra-diégétique	extra-diégétique
pédagogique	<ul style="list-style-type: none"> • Tâches à réaliser • Assistance d'un personnage • Occurrence d'un évènement 	<ul style="list-style-type: none"> • Assistances virtuelles (guide, retour au cours, démonstration)
narratif	<ul style="list-style-type: none"> • Relation perceptible entre les personnages (conflits, appréciations) • Accident • Tension dramatique 	<ul style="list-style-type: none"> • Indications de temps et de lieu • Résumé textuel de la situation • Musiques

FIGURE 2.7 – Exemples d'objectifs scénaristiques sur différents niveaux diégétiques

2.7 Les mécanismes de résilience

La problématique de la résilience peut être considérée au regard de l'étape de spécification du scénario (créer les objectifs scénaristiques) ou au regard du processus de contrôle du scénario (assurer l'atteinte des objectifs par le scénario effectif). Dans **l'étape de spécification**, la résilience est la capacité à proposer du contenu adéquat, qu'il soit pédagogique ou narratif, quel que soit l'état du monde ou l'état de l'apprenant.

Dans **l'étape de contrôle**, la résilience consiste à s'adapter aux interventions de l'utilisateur ou des entités autonomes de la simulation pour permettre la réalisation des objectifs prescrits.

De nombreux travaux se focalisent sur l'ajout de mécanisme de résilience pour l'étape de contrôle du scénario. L'objectif scénaristique est alors considéré comme fixe et il s'agit de déterminer quels moyens permettent de réaliser l'objectif malgré les aléas. Dans le cadre d'une approche scriptée, les actions de l'apprenant allant à l'encontre du scénario peuvent être prévues pendant le processus de

conception des scénarios. Il est donc tout à fait possible de prévoir des chemins supplémentaires qui rejoignent le scénario nominal. La qualité et le sentiment de contrôle de l'utilisateur sont assurés au prix d'un énorme travail de conception.

Dans les approches de planification privilégiées par [Riedl and Young, 2010, Porteous et al., 2010], des mécanismes de **replanification** prennent en compte le nouvel état du monde causé par les imprévus pour recalculer un nouveau plan vers l'objectif scénaristique prescrit.

Dans le cas de [Riedl et al., 2003], des mécanismes d'**accommodation** et d'**intervention** conjuguent la replanification avec une modulation des effets des actions de l'utilisateur pour en minimiser l'impact sur le déroulement du scénario. Cette supervision a cependant l'inconvénient de nuire à l'agentivité de l'utilisateur. En outre, le fait que les actions de l'utilisateur soient systématiquement moduler nuit fortement à l'acceptation du système.

Le mécanisme de *late commitment* proposé par [Swartjes, 2010] est inspiré des techniques du théâtre d'improvisation. Par ce mécanisme, l'état du monde n'est pas complètement déterminé à chaque pas de simulation. Certaines valeurs du monde peuvent être **inconnues** ou **imprécises**. Elles sont affinées au gré des besoins de la scénarisation. Le scénario étant ainsi le plus ouvert possible à chaque étape, les possibilités de trouver un chemin pour atteindre un objectif donné sont maximales : on assure donc la résilience.

Il y a peu de travaux sur les mécanismes de résilience pour l'étape de spécification. En effet, dans les approches usuelles, soit les objectifs scénaristiques sont déterminés hors-ligne, auquel cas c'est sur l'auteur que repose la résilience, soit l'objectif est généré dynamiquement mais le contrôle sur le scénario est tel que l'objectif sera toujours atteignable quitte à nuire à la cohérence.

Les seuls travaux dans ce domaine relèvent de la prise en compte de l'apprenant en temps réel pour la scénarisation. Dans le système OSE destiné à la formation des conducteurs de péniches [Fricoteaux, 2012], les objectifs scénaristiques s'adaptent en temps réel en fonction de la charge cognitive supportée par l'apprenant. Une limitation majeure de l'approche est que le contexte de la simulation n'est pas pris en compte et donc il n'y a aucune cohérence dans le scénario global. Par exemple, les conditions météorologiques peuvent changer plusieurs fois dans une même session.

A un niveau supérieur, il serait intéressant d'étudier la question de la méta-résilience pour déterminer quels mécanismes mettre en place lorsque l'étape de contrôle ne peut satisfaire aux exigences de l'étape de spécification. En effet, dans certains cas, l'état de la simulation ne permet pas la réalisation des objectifs scénaristiques prescrits. Dans une telle situation, faut-il privilégier la réalisation partielle des objectifs ou bien établir une toute nouvelle prescription ? Quelles mécanismes de négociations permettent de prendre une décision entre la prescription et le contrôle du scénario ? Nous n'aborderons pas ces questions directement dans ce mémoire car elle requiert de disposer en premier lieu d'un mécanisme de prescription fonctionnelle, cependant cette problématique mérite d'être étudiée.

2.8 Bilan et positionnement

Au travers des différentes propriétés listées ci-dessus, nous avons pu mettre en exergue un certain nombre de qualités et de limites de différents systèmes de scénarisation.

Les approches scriptées sont beaucoup trop couteuses en terme de création de contenu. Les approches génératives permettent d'éviter cet écueil mais au prix d'une perte de contrôle sur le contenu généré. L'approche hybride nous paraît pertinente dans la mesure où elle permet d'intégrer au système les connaissances de l'expert pédagogue autant pendant la phase de conception que pendant la phase d'utilisation du dispositif. Idéalement, l'expert pédagogue doit pouvoir définir une stratégie d'apprentissage au travers d'un parcours idéal d'apprentissage pendant la phase de conception du dispositif, mais il doit également pouvoir orienter la scénarisation avant ou pendant les sessions

d'utilisation du dispositif.

Sur la question des contenus, nous constatons que les objectifs narratifs et pédagogiques sont en général fusionnés. Or, nous pensons qu'il serait intéressant de découpler ces deux types d'objectifs au moins dans la conception du système. Une telle distinction permettrait de mettre en scène des situations d'apprentissage similaires au travers d'histoires différentes, assurant ainsi une plus grande variabilité des scénarios proposés. En outre, l'utilisation d'un modèle narratif indépendant du domaine (et donc distinct du modèle pédagogique) permettrait de satisfaire notre objectif de réutilisabilité.

Nous pensons que l'efficacité d'un moteur de scénarisation pour les environnements virtuels de formation est optimale lorsqu'il intègre les trois niveaux d'agrégation dans sa scénarisation. Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas de travaux d'intégration de ces trois niveaux dans des EVAH destinés aux domaines complexes.

De nombreux travaux s'attachent à déterminer du contenu scénaristique extra-diégétique notamment par le biais d'assistances virtuelles. Or, peu de travaux s'intéressent à la difficile conciliation des objectifs pédagogiques et narratifs à l'intérieur de la diégèse. Nous avons donc préféré centrer notre étude sur le niveau intra-diégétique sans pour autant se désintéresser complètement de la question des objectifs scénaristiques extradiégétiques.

L'autonomie de la simulation permet d'assurer une certaine cohérence des comportements et facilite la conception puisqu'il s'agit d'imaginer les comportements de chaque type d'entité indépendamment des autres. Cependant, une autonomie complète ne permet pas de rendre possibles la spécification et la mise en œuvre d'un scénario particulier.

L'approche que nous présentons dans ce mémoire repose sur une hybridation. La simulation est autonome pour faciliter la conception et permettre l'émergence de situations non-prévues. Toutefois, un contrôle global est nécessaire pour garantir la qualité pédagogique et l'intérêt narratif. La spécification du scénario est opérée à partir de l'état du monde courant pour établir des objectifs scénaristiques à la fois pédagogiques et narratifs. La mise en œuvre du scénario se charge de rendre effectives les prescriptions en procédant à des ajustements minimaux ne brisant pas la cohérence. Cette architecture globale, nommée SELDON, est issue de travaux précédents de l'équipe et a été formalisée dans la thèse de Camille Barot [Barot, 2014]. La contribution que nous présentons dans ce mémoire est exclusivement centrée sur l'étape de **spécification dynamique des objectifs scénaristiques** au sein de cette architecture.

Chapitre 3

Modèles pour la prise en compte de l'apprenant dans les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain

“ If you are a student you should always get a good nights sleep unless you have come to the good part of your book, and then you should stay up all night and let your schoolwork fall by the wayside, a phrase which means 'flunk'. ”
The Austere Academy , Lemony Snicket

Sommaire

3.1 Cadre théorique sur l'apprentissage	48
3.1.1 Le constructivisme de Piaget	48
3.1.2 La Zone Proximale de Développement de Vygotsky	48
3.1.3 L'apprentissage expérientiel de Kolb	49
3.1.4 L'apprentissage situé de Lave et Wenger	50
3.1.5 La théorie des situations didactiques de Brousseau	50
3.1.6 Bilan	51
3.2 Modèles informatiques pour l'adaptation à des fins de formation	51
3.2.1 Les Systèmes Tutoriels Intelligents	51
3.2.2 Les modèles de l'apprenant	52
Généralités	52
L'approche QUARTIC	54
L'utilisation des réseaux bayésiens	55
La théorie des espaces de connaissances	57
3.3 Bilan et positionnement	57

La question de la scénarisation personnalisée dans les environnements virtuels de formation nécessite d'aborder d'une part des aspects théoriques sur l'apprentissage, et d'autre part la question de la modélisation informatique pour la mise en place d'un système adaptatif. Ces deux questions seront traitées séparément dans les parties 1 et 2 de ce chapitre. Nous dresserons un bilan de cette étude et nous positionnerons notre approche par rapport à l'état de l'art dans la partie 3.

3.1 Cadre théorique sur l'apprentissage

Nous avons choisi de positionner nos travaux dans le cadre du courant constructiviste. Dans cette première partie, nous décrirons succinctement les origines et les postulats de cette théorie. Nous présenterons également diverses propositions de stratégies d'apprentissages de ce courant qui nous paraissent pertinentes.

3.1.1 Le constructivisme de Piaget

Pour Jean Piaget [Piaget, 1948], l'apprentissage ne résulte pas de l'appropriation par l'apprenant d'une connaissance externe, mais de sa construction au sein de ses représentations mentales propres. L'auteur suggère deux processus supports de l'apprentissage : l'accommodation et l'assimilation. Lorsqu'une nouvelle connaissance est conforme aux représentations propres de l'apprenant, celle-ci est intégrée directement, il s'agit alors de **l'assimilation**. **L'accommodation** se produit lorsqu'une nouvelle expérience mène l'apprenant à intégrer des connaissances qui entrent en conflit avec les représentations propres. Ce processus est intimement lié à la notion *d'erreur* ou de *misconception* (une connaissance fautive). En effet, l'accommodation est, en réalité, le processus d'apprentissage résultant d'une erreur ou d'un échec.

3.1.2 La Zone Proximale de Développement de Vygotsky

En parallèle des travaux de Piaget sur le constructivisme, Lev Vygotsky développe sa théorie de la **Zone Proximale de Développement** (ZPD) [Vygotsky, 1978]. Il décrit la ZPD comme telle :

“ la distance entre le niveau de développement actuel, tel qu'on pourrait le déterminer par les capacités de l'enfant à résoudre seul des problèmes, et le niveau de développement potentiel, tel qu'on pourrait le déterminer à travers la résolution de problèmes par cet enfant, lorsqu'il est aidé par des adultes ou collabore avec des pairs initiés. ”

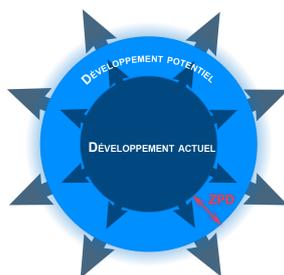


FIGURE 3.1 – La Zone Proximale de Développement

Pour l'auteur, l'enjeu de la formation est de proposer à l'apprenant des problèmes **adaptés**, c'est-à-dire dans sa zone proximale de développement, pour favoriser sa motivation et son processus d'apprentissage individuel.

L'importance de la notion de *l'autre* (l'adulte ou les pairs initiés) dans les travaux de Vygotsky a amené la communauté à parler de **socio-constructivisme**.

Les travaux de la thèse présentée ici reposent sur deux postulats quant à la notion de ZPD. Premièrement, nous supposons que cette théorie est tout à fait applicable à des contextes plus larges que

l'éducation et peut donc être appliquée dans le cadre de la formation professionnelle. Deuxièmement, nous prenons pour hypothèse que l'*autre* n'est pas nécessairement personnifié par un formateur réel ou virtuel mais que son rôle peut être assuré par des moteurs informatiques tels qu'un moteur de scénarisation, un tuteur intelligent, ou par des personnages virtuels.

L'auteur, cependant, ne donne pas d'informations précises, et encore moins de formalisation, de la ZPD. Notamment, les éléments constituant les différentes zones de développement sont vaguement définis comme des **espaces de problèmes**. Pour préciser cette notion, nous avons choisi de nous inspirer de la théorie des situations didactiques de Brousseau que nous présentons dans la section 3.1.5.

Par ailleurs, les travaux sur le constructivisme et sur le socio-constructivisme tentent d'expliquer le processus d'apprentissage par la construction des connaissances de manière internalisée. Cependant, ils ne constituent pas des stratégies pédagogiques. Pour pallier cette lacune, nous proposons d'étudier l'apprentissage expérientiel et l'apprentissage situé.

3.1.3 L'apprentissage expérientiel de Kolb

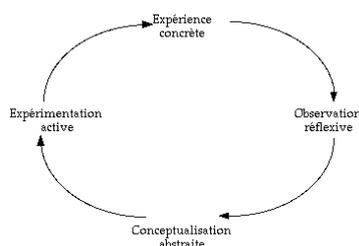


FIGURE 3.2 – Le cycle de l'apprentissage expérientiel de Kolb

S'inspirant des travaux de Piaget, Kolb élabore la théorie de l'apprentissage expérientiel [Kolb, 1984]. L'expérience personnelle est au centre du processus d'apprentissage. Il propose le cycle d'apprentissage expérientiel (voir figure 3.2) se déroulant en 4 étapes :

- **expérience concrète** : l'individu est engagé dans une activité nouvelle. Pendant cette phase, l'individu n'est pas nécessairement en état de réflexion active sur la tâche en cours ;
- **observation réflexive** : l'individu est invité à prendre du recul sur son activité. La vision de l'individu sur sa propre activité étant nécessairement subjective et limitée à ses propres représentations, il est préférable que celle-ci se fasse de manière collaborative avec un formateur ou avec des pairs lors d'un débriefing. Ceux-ci peuvent alors mettre en évidence de nouveaux éléments que l'apprenant intégrera en tant que connaissances ;
- **conceptualisation abstraite** : l'individu internalise l'activité et construit la connaissance dans ses représentations ;
- **expérimentation active** : l'individu tente de mettre en application les nouvelles connaissances. Cela peut se faire dans le cadre de la même activité ou pour prédire le déroulement d'une autre activité de manière imaginaire ou réelle.

Ce type de stratégie d'apprentissage est celui privilégié pour la formation à des domaines complexes. Par exemple, dans le cadre de la formation des équipes de secours, les apprenants sont mis en situations dans des jeux de rôles grandeur nature. À l'issue de l'exercice, les apprenants sont réunis pour un débriefing commun avec les organisateurs. Chacune des situations mises en œuvre dans le jeu de rôle est alors critiquée pour en extraire les bons et les mauvais comportements et faire des préconisations.

3.1.4 L'apprentissage situé de Lave et Wenger

L'apprentissage situé proposé par [Lave and Wenger, 1991] est une stratégie d'apprentissage du courant socio-constructiviste. Cette méthode préconise que l'apprentissage s'opère en immersion dans le contexte dans lequel les connaissances seront appliquées. Tout comme pour l'apprentissage expérientiel, les apprentissages ne sont pas abstraits, mais se font **dans l'action**. L'apprentissage se fait donc par la mise en **confrontation avec une situation réelle**.

La notion d'apprentissage situé est également fortement liée à la notion de **communauté de pratique**. La connaissance se construit également par l'interaction de l'apprenant avec les *autres*. Ceux-ci peuvent être les autres apprenants, les enseignants ou les professionnels du domaine considéré. Dans notre étude, nous considérons les communautés de pratique du point de vue de la conception de l'environnement et des scénarios qui s'y déroulent. En effet, afin d'assurer la validité écologique des situations proposées, il est essentiel d'inclure des membres de la communauté dans le processus d'extraction des connaissances de l'expert. Par ailleurs, les scénarios prenant place dans l'environnement doivent refléter l'existence de cette communauté, le cas échéant, par la mise en valeur des interactions entre les collaborateurs dont les rôles pourront, notamment, être joués par des personnages virtuels.

Par contre, notre objectif n'est pas de fournir des outils liés au développement d'une communauté de pratique au travers ou autour de l'EVAH. Il sera toutefois tout à fait envisageable, voire souhaitable, pour l'équipe pédagogique, de proposer des moyens d'échanges au sujet du dispositif entre les apprenants.

3.1.5 La théorie des situations didactiques de Brousseau

Brousseau a beaucoup travaillé sur l'enseignement des mathématiques. À partir de diverses expérimentations, il a élaboré la **théorie des situations didactiques** [Brousseau, 2011]. Il définit une situation comme étant :

“ l'ensemble des circonstances dans lesquelles une personne se trouve, et des relations qui l'unissent à son milieu. ”

La situation lorsqu'elle suscite la construction des connaissances est appelée une **situation-problème** et s'apparente à la notion de *problème* de Vygotsky. Lorsque la situation-problème a été intentionnellement conçue pour enseigner, il s'agit d'une **situation didactique**. Les situations peuvent être caractérisées par les valeurs des variables qu'elles exposent. Brousseau distingue les **variables cognitives** qui sont les variables prenant sens par rapport à la connaissance en jeu, et les **variables didactiques** qui sont les variables cognitives sur lesquelles le dispositif d'enseignement peut influencer.

Par exemple, dans le cadre d'un environnement d'assemblage aéronautique, on peut considérer que le matériau utilisé est une variable didactique. En effet, selon qu'on utilise un matériau de type métallique ou composite, les procédures, les tolérances et les précautions à prendre sont radicalement différentes alors même que la tâche est la même.

Pour chaque connaissance, ou ensemble de connaissances, il existerait une **situation fondamentale** pour laquelle les valeurs des variables seraient optimales à la réalisation d'un apprentissage. Tout l'enjeu de la didactique est de déterminer quelles sont les variables didactiques, et quelles valeurs elles doivent prendre pour favoriser l'apprentissage. Afin de formaliser cette notion, Brousseau définit un espace de classes de situations Π pour toutes les valeurs envisageables des variables et imagine des fonctions d'évaluations sur l'optimalité des situations.

A nouveau nous postulons que ce que Brousseau applique au contexte de l'apprentissage des ma-

thématiques peut être transposé à l'apprentissage de compétences métier dans des domaines complexes.

3.1.6 Bilan

Les théories que nous avons succinctement décrites ici nous servent de cadre de réflexion pour nos recherches. Notre ambition n'est pas du tout d'apporter des contributions sur ces questions que ce soit sur le plan d'apport théorique comme sur le plan de l'évaluation et de la validation de ces théories. Nous avons choisi de situer notre approche d'apprentissage dans le cadre constructiviste. Les stratégies d'apprentissage expérientiel et situé nous paraissent intéressantes à mettre en œuvre pour l'apprentissage dans des domaines complexes.

Un environnement virtuel pour la formation adoptant ce positionnement doit permettre de mettre les apprenants en situation réelle (apprentissage situé), tout en proposant une variété suffisante de cas (apprentissage expérientiel). Cela requiert donc de proposer des situations d'apprentissages scénarisées dans un environnement virtuel représentant le contexte réel. La théorie des situations didactiques offrira un support à la formalisation de ces notions. Le cadre constructiviste insiste sur l'aspect personnel de la construction de la connaissance. À ce titre, la scénarisation doit être **adaptative** et plus précisément **personnalisée** : elle est asservie aux besoins de l'apprenant.

Nous allons donc maintenant étudier la problématique informatique de la représentation de l'apprenant et de la prise de décision pour l'adaptation.

3.2 Modèles informatiques pour l'adaptation à des fins de formation

La scénarisation personnalisée est un processus visant à produire du contenu scénaristique dédié spécifiquement à un utilisateur, et, dans notre cas, à l'apprenant. Le contenu à produire relève de deux niveaux que nous avons évoqués dans le chapitre 2 : le niveau intradiégétique (le contenu de la simulation) et le niveau extradiégétique (les assistances ajoutées à la simulation). Nous avons choisi de centrer notre étude sur le niveau intradiégétique. Malgré cela, nos travaux pourront bénéficier des apports sur la scénarisation du niveau extradiégétique. Pour produire du contenu adapté à un apprenant, il est nécessaire de raisonner sur des connaissances relatives à l'apprenant. Il est donc indispensable de disposer d'une représentation informatique de celui-ci [Carron and Marty, 2009]. Comme nous le verrons dans le point suivant, l'architecture d'un système de scénarisation adaptatif est comparable à l'architecture d'un Système Tutoriel Intelligent. Nous évoquerons ensuite différents travaux sur la représentation de l'apprenant.

3.2.1 Les Systèmes Tutoriels Intelligents

Il nous paraît impossible d'évoquer l'état de l'art sur l'évaluation des apprenants dans les EVAH sans préciser la notion de système tutoriel intelligent (STI) [Wenger, 1987]. Les STI sont des architectures destinées à assurer un accompagnement des apprenants dans des EIAH. La communauté s'accorde sur une architecture nucléaire de quatre modules (sans distinguer d'ailleurs les modules décisionnels des modèles sur lesquels ils raisonnent) :

- **le module de domaine** intègre les connaissances expertes sur le domaine. Ce module inclut un modèle de référence pour comparer l'activité de l'apprenant à celle d'un expert et détecter les erreurs ;

- **le module d'apprentissage** inclut le modèle de l'apprenant ainsi que son évaluation. Selon les applications, le modèle de l'apprenant peut inclure son historique, ses traces, son état de connaissances de même que les erreurs courantes ;
- **le module pédagogique** utilise les données fournies par le module d'apprentissage ainsi que des stratégies pédagogiques pour guider l'apprentissage : mettre en œuvre des assistances, proposer une nouvelle situation d'apprentissage, etc. ;
- **le module d'interface** fait l'interface entre le système et l'apprenant. Il peut recouvrir diverses modalités selon les dispositifs (interface 2D, site web, simulation 3D, etc.).

Pour compléter cette définition, nous évoquerons la distinction en deux boucles de [Vanlehn, 2006]. La **boucle interne** met à jour le profil de l'apprenant et propose des assistances relatives à la tâche en cours. La **boucle externe** utilise le profil de l'apprenant pour proposer un nouveau problème dans lequel de nouvelles boucles internes prendront place. Certains STI reposent sur l'une ou l'autre des boucles et parfois les deux.

Notre objectif est de fournir un outil de scénarisation produisant du contenu personnalisé. La tâche principale du système de scénarisation s'apparente donc à la boucle externe d'un STI. En outre, nous avons fixé comme objectif pour notre moteur de scénarisation d'être également un support à la scénarisation pédagogique, il doit donc intervenir dans ce qui est comparable à la boucle interne du STI. Pour autant, nous estimons qu'un moteur de scénarisation n'a pas pour vocation de supplanter un STI et qu'il doit plutôt être utilisé en complémentarité avec celui-ci. En effet, le rôle d'un moteur de scénarisation n'est pas d'assurer un tutorat fin et précis, mais de proposer des scénarios dans lesquels un apprentissage tutoré peut éventuellement être mis en place. Nous verrons par ailleurs dans la suite de ce mémoire qu'un moteur de scénarisation raisonne sur des connaissances différentes des connaissances intégrées classiquement à un STI [Bourdeau and Grandbastien, 2010].

3.2.2 Les modèles de l'apprenant

Généralités

De manière générale, les modèles de l'apprenant visent à décrire [Webb et al., 2001] :

- les processus cognitifs sous-tendant les actions de l'apprenant ;
- la différence entre le niveau de connaissance de l'apprenant et le niveau de connaissance expert ;
- les préférences ou comportements de l'apprenant (pour les prédire notamment) ;
- les caractéristiques de l'apprenant (âge, sexe, état mental, etc.).

La modélisation et la reconnaissance des processus cognitifs de l'apprenant permettent dans une certaine mesure de prédire son comportement. Cela permet également d'établir un diagnostic précis pour détecter les misconceptions et proposer des assistances adaptées. Bien que la prise en compte des processus cognitifs de l'apprenant dans le cadre de la scénarisation puisse être tout à fait pertinente, nous avons choisi de l'exclure de notre étude du fait du long travail d'élicitation que cela réclame. Par ailleurs, le positionnement constructiviste n'invite pas à une telle modélisation qui est toujours une approximation du processus réel.

Bien que nous soyons convaincus de leurs intérêts, les préférences et caractéristiques de l'apprenant ne sont pas prises en compte dans nos travaux à l'heure actuelle.

Nous concentrons nos efforts sur une scénarisation adaptée à l'**état de connaissance** de l'apprenant. La prédiction que nous visons relève de la capacité de l'apprenant à gérer des situations. Ainsi, nous avons essentiellement mené notre étude sur les modèles de l'apprenant permettant de décrire l'état de connaissance de l'apprenant.

L'état de l'art [Chrysaftadi and Virvou, 2013] distingue usuellement les types de représentations suivantes pour les modèles de l'apprenant :

- **overlay** [Stansfield et al., 1976] [Carr and Goldstein, 1977] : ce type de modèle cherche à décrire

l'état de connaissance de l'apprenant en comparaison de celui d'un expert qui représente, en général, l'état de connaissance que l'apprenant doit atteindre ;

- **perturbation** (parfois appelé en français *overlay étendu*) [Mayo, 2001] : ce type de modèle inclut, en plus de l'état de connaissance de l'apprenant et de celui de l'expert, un modèle des déviations possibles (sous la forme d'erreurs, de misconceptions voire de violations) ;
- **stereotypes** [Rich, 1979] : ce type de modèle repose sur une catégorisation des apprenants. La détermination de la catégorie peut se faire en dehors de l'EIAH, par le biais d'un entretien ou d'un questionnaire, mais elle peut également être faite au sein des outils décisionnels de l'EIAH ;
- **constraint-based** : dans ce type de modèle introduit par [Ohlsson, 1994], les connaissances sur le domaine sont représentées par un ensemble de contraintes. Le modèle de l'apprenant résulte du sous-ensemble des contraintes violées par l'apprenant.

Bien que les stéréotypes permettent de s'affranchir du travail d'élicitation du domaine de connaissance, ils n'offrent pas une granularité suffisamment fine pour offrir une scénarisation des expériences spécifiquement adaptées à l'apprenant. Les modèles *constraint-based* sont plutôt destinés à l'évaluation de l'apprenant sur des situations d'apprentissage très circonscrites et nécessitent un lourd travail de modélisation du domaine.

Les modèles *overlay* et *perturbations* ont retenu notre attention. En effet, ils permettent de décrire l'état de l'apprenant par rapport à un objectif d'état idéal. Ces approches sont pertinentes pour le problème de la scénarisation adaptative : elles permettent de décrire l'ensemble des lacunes chez l'apprenant pour créer des scénarios destinés à combler ces lacunes.

Ainsi, notre étude se focalisera essentiellement sur les modèles de l'apprenant permettant de décrire l'état de connaissance de l'apprenant (par rapport à l'état de connaissance optimal, ou de l'expert) dans des modèles de types *overlay* ou *perturbation*.

Lorsque l'intérêt est porté sur l'état de connaissance de l'apprenant, on parle de modèle à base de **traçage de connaissances** [Corbett and Derson, 1995]. Ces modèles ont clairement une visée évaluative et permettent d'établir un diagnostic sur l'état de connaissance de l'apprenant pour prendre les décisions pédagogiques. À tout instant, le modèle est une *photographie* des connaissances, ou des misconceptions, de l'apprenant.

L'approche par traçage de connaissances s'oppose à l'approche par **traçage de modèle** [Anderson and Pelletier, 1991] qui cherche à comprendre la façon dont un apprenant résout un problème. Pour cela, ces approches utilisent des techniques de reconnaissance de plan et comparent le plan déroulé par l'apprenant avec un plan expert. Les modèles de l'apprenant à base de traçage de modèle sont utilisés pour guider précisément l'apprenant et pour fournir des assistances ponctuelles directement sur les origines des erreurs.

Ici le **plan expert** ne se limite pas nécessairement au plan tel que déroulé par un opérateur expert sur le terrain. Il s'agit en réalité de l'activité considérée comme nominale pour l'apprentissage. Dans certains cas, le plan expert peut inclure toutes les alternatives possibles à la réalisation d'une tâche ou à la résolution d'un problème. Dans d'autre cas, ne sera considéré qu'une méthode particulière privilégiée par l'équipe pédagogique. Il s'agit d'un choix de méthode pédagogique.

Notre problématique est de permettre une scénarisation dynamique adaptée à l'apprenant. Il s'agit donc de déterminer du contenu à produire en fonction de l'état de connaissance de l'apprenant, indépendamment de ses processus cognitifs. Nos travaux s'orienteront donc plutôt, *a priori*, sur les modèles à base de traçage de connaissances. En outre, nous avons décidé de nous concentrer sur le niveau diégétique des objectifs scénaristiques. La tâche de reconnaissance de l'activité et de production d'assistance pour l'apprenant est laissée à un STI. Cependant, dans l'état de l'art, les deux types de construction du modèle sont souvent hybridés car les problématiques de la reconnaissance de l'activité de l'apprenant et de son évaluation y sont confondues.

Nous avons choisi de ne présenter ici en détail que quelques travaux qui ont inspirés notre réflexion :

- l'approche QUARTIC dans laquelle la notion de contexte est primordiale ;
- les approches de modélisation par réseau bayésien, et plus particulièrement dans le cadre du projet TELEOS ;
- la théorie des espaces de connaissances (Knowledge Space Theory) qui formalisent l'état de connaissance de l'apprenant comme un espace de connaissances, et plus précisément de compétences dans le cas de la *Competence-based Knowledge Space Theory*

L'approche QUARTIC

Dans le cadre du projet européen TARGET¹ [Cowley et al., 2012], les auteurs ont défini le modèle de conception QUARTIC pour la production de jeux éducatifs destinés à l'acquisition de compétences par un apprentissage contextualisé. Un apprentissage contextualisé s'opère lorsque la manière dont sont menées les activités au sein du contexte d'apprentissage est analogue à ce qu'elle serait dans le monde réel [Karweit, 1998]. Pour mettre en œuvre cette approche, les auteurs s'appuient sur le modèle OKEI (Organization, Knowledge, Environment, Individual) proposé par [Petersen and Heikura, 2010]. Cette grille d'analyse permet de définir un ensemble de relations entre les différentes compétences à acquérir, les contextes dans lesquelles celle-ci peuvent prendre place ainsi que les observables qui rendent possible leur évaluation (voir la figure 3.3).

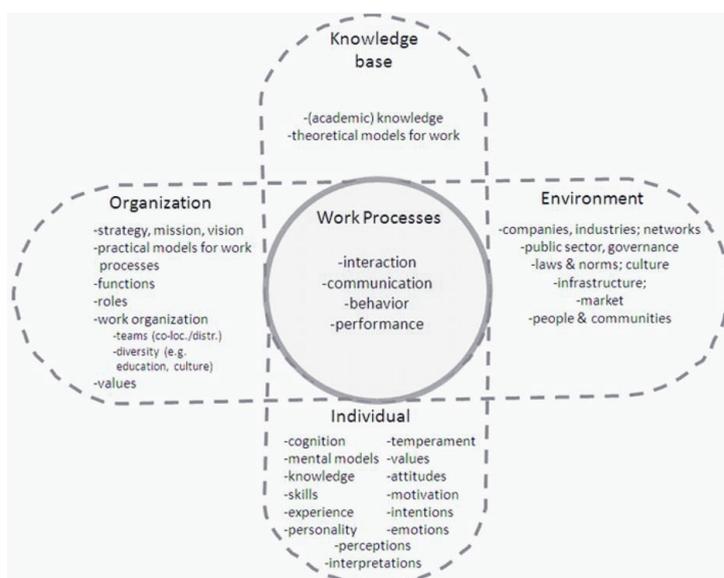


FIGURE 3.3 – Le modèle OKEI pour la description des compétences [Petersen and Heikura, 2010]

Les auteurs font une distinction nette entre le modèle de l'apprenant, le modèle de tâches et le modèle des observables. L'intérêt de ce découpage est de rendre générique la représentation des connaissances. En plus de faciliter le travail de conception, il est possible de porter l'environnement d'apprentissage d'un dispositif vers un autre offrant de nouvelles modalités en modifiant le modèle des observables.

Le modèle de l'apprenant proposé est créé à partir de l'analyse du modèle OKEI. Les compétences à acquérir forment les nœuds d'un graphe conceptuel reliés par les types d'arcs suivant :

- les relations de **composition** permettent de décrire une compétence comme un assemblage de sous-compétences ;
- les relations de **similarité** permettent de décrire des relations entre des compétences qui s'expriment pour un ensemble de tâches communes ;

1. <http://www.reachyourtarget.org/>

— les relations de **pré-requis** permettent de décrire les liens d'implication entre les compétences. L'intérêt du modèle OKEI par rapport à la façon dont est représenté le modèle de l'apprenant est que chaque compétence est évaluée par un indicateur de performance dépendant des autres composantes du modèle. Ainsi, les auteurs donnent l'exemple de la compétence *Réagir avec assurance* : l'évaluation de cette compétence est différente selon le contexte dans lequel les tâches liées à cette compétence ont été observées. Notamment, il est plus facile de montrer de l'assurance dans une situation de supériorité hiérarchique par rapport à son interlocuteur que dans la situation inverse.

L'utilisation des réseaux bayésiens

De nombreux travaux de l'état de l'art utilisent des réseaux bayésiens [Pearl, 1988] pour représenter et inférer l'état de connaissance de l'apprenant [Millán and Pérez-De-La-Cruz, 2002] [Vicari et al., 2008] [Goguadze et al., 2011]. Nous ne présenterons en exemple que les travaux réalisés dans le cadre du projet TELEOS [Vadcard et al., 2004, Luengo, 2009, Chieu et al., 2010]. Le domaine d'application, la chirurgie orthopédique, a fait l'objet d'une analyse très fine ayant permis d'établir des modèles de connaissances particulièrement élaborés. Par ailleurs, le cadre théorique de ces travaux est très proche du notre.

Les travaux de [Mufti-Alchawafa, 2008] sur le diagnostic et la prise de décision quant aux assistances, qui y sont appelées *rétroactions*, à apporter à l'apprenant reposent sur trois modèles distincts :

- le **modèle de connaissances** qui modélise le domaine d'apprentissage ;
- le **modèle de diagnostic** qui, à partir des traces d'activités de l'apprenant, évalue l'état de connaissance de celui-ci ;
- le **modèle de prise de décision** qui utilise les résultats du diagnostic pour déterminer les assistances adaptées à l'apprenant.

Le **modèle de connaissance** repose sur le modèle *ckç* [Balacheff, 1995]. Dans ce modèle, la connaissance, qui prend le nom de *conception*, est décrite par le quadruplet $\langle P, R, L, \Sigma \rangle$:

- P est un ensemble de problèmes ;
- R est un ensemble d'opérateurs pour résoudre les problèmes P ;
- Σ est un ensemble de contrôles pour valider la résolution des opérateurs de R ;
- L est un ensemble de représentations dans lesquels les éléments P , R et Σ sont exprimés.

Dans les travaux de [Luengo et al., 2006], les problèmes sont des instanciations particulières des *variables didactiques*. Les variables didactiques sont les caractéristiques du problèmes qui, si elles sont modifiées, changent la méthode de résolution du problème. Au final, toutes ces connaissances sont renseignées informatiquement au travers d'un réseau bayésien (figure 3.4).

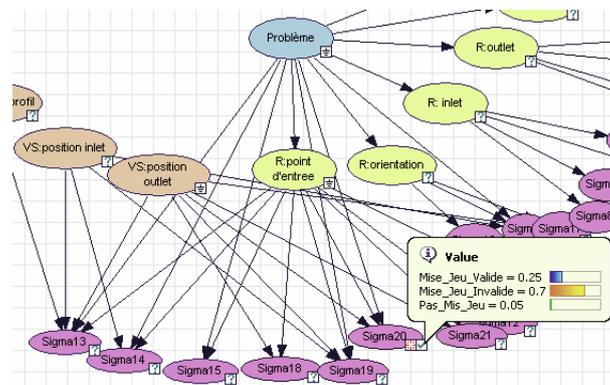


FIGURE 3.4 – Réseaux bayésiens pour le diagnostic [Mufti-Alchawafa, 2008]

Le **modèle de diagnostic** est une extension du réseau bayésien de référence. Le contexte de la simulation et les traces d'interaction de l'apprenant permettent de mettre à jour un vecteur de probabilité pour chaque élément de connaissance du réseau lié à un problème. Ce vecteur décrit trois cas :

- la probabilité de **mise en jeu valide** (MJV) : mise en jeu d'une connaissance nécessaire pour la résolution du problème considéré ;
- la probabilité de **mise en jeu invalide** (MJIV) : mise en jeu d'une connaissance qui n'était pas nécessaire à la résolution du problème considéré ;
- la probabilité de **pas mise en jeu** (PMJ) : une connaissance qui était nécessaire à la résolution du problème n'a pas été mise en jeu.

Les relations entre des variables de situations et les éléments de connaissances décrites dans le réseau bayésien permettent la mise à jour des vecteurs.

A partir de ces données, le **modèle de diagnostic** prend une décision quant à la rétroaction à mettre en œuvre. Pour cela, le processus se fait en quatre temps :

1. **Décision de la cible** : déterminer l'élément de connaissance sur lequel portera la rétroaction ;
2. **Détermination de l'objectif d'apprentissage** : déterminer l'objectif de la rétroaction parmi *vérifier*, *déstabiliser* ou *renforcer l'élément de connaissance* ;
3. **Choix de la forme** : déterminer la forme de la rétroaction (cours, simulation, base de cas, etc.) ;
4. **Choix du contenu** : selon la forme retenue dans l'étape 3, il s'agit de déterminer le cours vers lequel renvoyer l'apprenant, ou, dans le cas d'une forme "simulation", de proposer un nouveau problème favorisant l'objectif spécifié dans l'étape 2 pour la connaissance déterminée à l'étape 1. Ce nouveau problème est sélectionné grâce à un algorithme d'inférence dans le réseau bayésien.

En plus des rétroactions épistémiques à l'intérieur d'un problème, le système est capable de proposer un nouveau problème pour faire progresser l'état de connaissance de l'apprenant. Pour cela, une mesure de similarité entre problèmes est calculée sur la base du nombre de variables didactiques ayant des valeurs différentes entre les problèmes. Couplé à l'utilisation du réseau bayésien, le système peut proposer un nouveau problème adapté à l'apprenant.

Cette approche est très intéressante à plusieurs égards. Dans une perspective de système tutoriel intelligent, elle permet à la fois de fournir des assistances extra-diégétiques en réaction à l'activité de l'apprenant, mais également des éléments de scénarisation par la prescription de nouveaux problèmes. Cependant, la scénarisation en tant que tel n'est pas l'objectif de l'approche. D'ailleurs, les auteurs parlent plus généralement d'**orchestration**.

Nous considérons également que l'utilisateur d'un modèle d'incertitude est particulièrement appropriée. En effet, il est difficile d'évaluer les connaissances de l'apprenant à partir de traces d'interactions qui donnent une information incomplète aux moteurs décisionnels. L'utilisation d'un modèle d'incertitude permet de prendre en compte ce biais dans la prise de décision.

Cependant, les travaux sur les réseaux bayésiens de manière générale sont difficilement applicables dans notre contexte. Bien qu'optant pour un formalisme facilement implémentable, un énorme travail de conception est nécessaire. Notre intérêt se porte sur l'apprentissage dans des domaines complexes au travers de simulations ouvertes. Les domaines concernés intègrent fortement le facteur humain et les différentes formes de résolutions de problèmes font exploser les combinaisons de méthodes. A ce titre, la tâche d'extraction des connaissances, des problèmes, et des structures de contrôles qui s'y rapportent s'avère incommensurable. Cette extraction des connaissances faite par des experts didacticiens doit, de plus, être suivie d'une retranscription vers un réseau bayésien. Par ailleurs, malgré leur intérêt pour la modélisation et l'inférence des incertitudes, les réseaux bayésiens ont l'inconvénient majeur de devoir être paramétrés. Or, il est très difficile d'évaluer ce paramétrage à défaut de disposer d'une quantité de données suffisante. Le recueil de ces données est difficile [Villano, 1992], et constitue un effort supplémentaire à imputer à la phase de conception du dispositif.

La théorie des espaces de connaissances

La théorie des espaces de connaissances (que nous nommerons KST, abréviation de l'anglais pour Knowledge Space Theory) [Doignon and Falmagne, 1985] fournit un cadre théorique et formel pour organiser les connaissances d'un domaine selon un réseau de prérequis. A l'origine, la formalisation des KST repose uniquement sur les problèmes observables : les relations de prérequis s'établissent sur l'ensemble des problèmes du domaine (voir la figure 3.5). L'état de connaissance de l'apprenant est le sous-ensemble des problèmes que l'apprenant peut résoudre. Il est ainsi possible d'inférer la maîtrise d'un problème a par l'apprenant s'il sait résoudre un problème b et qu'il existe une relation de prérequis de a à b . La théorie des KST a été étendue dans de nombreux contextes [Doignon, 1994] [Albert and Held, 1999]. Notamment, l'approche *Competence Performance* étend le modèle de compétence (Competence-based Knowledge Space Theory - CbKST) [Heller et al., 2006]. Au lieu de formaliser la connaissance comme un réseau de problèmes, les auteurs formalisent le domaine selon des compétences. L'état de compétence d'un individu devient alors l'ensemble des compétences considérées comme acquises que ce soit par l'observation de celles-ci ou déduite par des inférences.

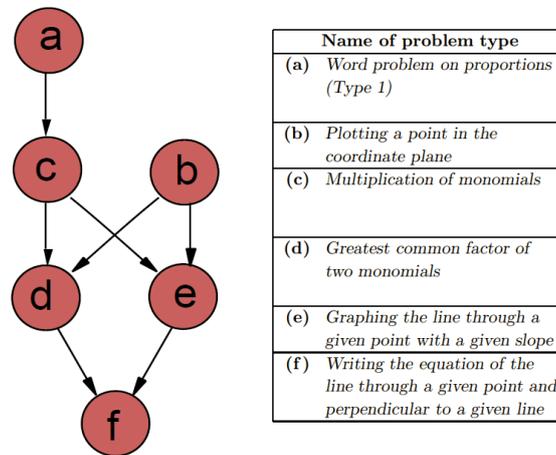


FIGURE 3.5 – Diagramme de prérequis pour un CbKST [Doignon and Falmagne, 1985]

Dans le cadre du projet ELEKTRA, les CbKST ont été utilisées afin de modéliser l'état de connaissances de l'apprenant et pour en établir un diagnostic [Augustin et al., 2011]. A partir de l'activité de l'apprenant, des règles d'inférences permettent de déduire des probabilités sur l'état de connaissances de l'apprenant. L'approche est intéressante lorsque l'on dispose effectivement d'un moyen d'établir le réseau de prérequis, cependant les auteurs soulignent le problème lié à la taille du réseau. En effet, si on considère un ensemble d'une cinquantaine de compétences, il existe 2^{50} possibilités d'états de connaissances. Ce grand nombre pose des problèmes en terme de calculabilité en temps interactif. Pour lever cette limitation, les auteurs proposent un système de partitionnement du réseau pour le mettre à jour partiellement sans perte d'informations. Bien que cette méthode permette de mettre à jour le réseau de compétences avec des temps de calculs raisonnables, elle n'est validée que pour des domaines de compétences dont la cardinalité avoisine les 50. Un passage à l'échelle ne semble pas possible.

3.3 Bilan et positionnement

De nombreux travaux s'attachent à la modélisation de l'apprenant dans des contextes d'apprentissage par environnement informatique. La diversité de ces travaux est grande du fait des diverses possibilités offertes par le médium informatique.

Le modèle de l'apprenant peut être vu comme un **modèle descriptif** pour évaluer l'apprenant mais il peut également être vu comme un **modèle prédictif** afin de comprendre et prévoir les raisonnements de l'apprenant. Dans les deux cas, ces modèles permettent de prendre des décisions pédagogiques quant aux assistances à pourvoir, ou pour la sélection des problèmes à proposer à l'apprenant.

Nous avons choisi de ne décrire en détail qu'une sélection limitée de travaux sur ces questions. Nous en retenons les points suivants.

En premier lieu, l'utilisation de **modèles incertains pour l'évaluation de l'apprenant** se révèle pertinente et appropriée. Elle permet de prendre en compte les limitations des systèmes informatiques quant à l'interprétation de l'activité de l'apprenant tout en assurant une bonne qualité de diagnostic.

En second lieu, il est indispensable de **prendre en compte que la connaissance n'est valide que dans un contexte** déterminé. Ce contexte, ou la situation en générale, doit être intégré pour assurer une modélisation fidèle de l'apprenant.

Cependant, tout comme [Self, 1998] [Luengo, 2009] [Woolf, 2010], nous nous interrogeons sur le bien-fondé de la modélisation des connaissances de l'apprenant dans une perspective constructiviste. En effet, si la connaissance est intégrée par l'apprenant au sein d'un référentiel qui lui est propre, les efforts de modélisation sur les connaissances de l'apprenant ne sont pas toujours nécessaires. Étant donné que la connaissance est internalisée à l'apprenant, mais relève d'un contexte particulier, nous jugeons plus pertinent de nous positionner sur la modélisation de ce contexte.

Ainsi, [Woolf, 2010] préconise de concentrer l'effort de modélisation sur les situations si on souhaite s'inscrire dans une perspective constructiviste. Pour [Self, 1998], le problème de modélisation ne doit pas être posé en tant que connaissances statiques à acquérir mais en considérant la temporalité de la succession d'événements qui mènent à un apprentissage.

Nous considérons ces deux positions comme valides et complémentaires. Dans le cadre de nos travaux, nous avons choisi de ne pas faire reposer fortement le modèle de l'apprenant sur une élicitation du domaine de connaissance ou sur une formalisation des parcours d'apprentissage. Cela entrerait en contradiction avec notre cadre théorique mais également avec notre objectif de facilitation de la production d'un environnement virtuel pour la formation. En effet, la modélisation des connaissances sur l'apprentissage dans un domaine donné demande un travail considérable à la fois d'analyse par des experts didacticiens puis de retranscriptions en modèles informatiques. Pour le cas de l'entraînement, cette élicitation peut même s'avérer impossible. En lieu de cela, nous proposons de **limiter l'utilisation d'une élicitation du domaine de connaissances sans pour autant se priver de celle-ci** si elle est accessible. Nous avons donc préféré centrer notre étude sur la modélisation de l'apprenant en modélisant les situations qu'il peut rencontrer et sa capacité à maîtriser ces situations. Nos contributions sur ces aspects sont décrites dans le chapitre 7.

La modélisation de l'apprenant est cruciale à des fins de personnalisation puisque celui-ci est au centre du système. Cependant, la scénarisation requiert de disposer de connaissances sur le *quoi* et le *comment* scénariser. Ces connaissances relèvent naturellement du domaine d'application considéré. Nous proposons donc dans le chapitre suivant d'étudier les travaux sur la représentation des connaissances sur le domaine.

Chapitre 4

Représentation des connaissances dans les Environnements Virtuels

“ All the secrets of the world are contained in books. Read at your own risk. ”
All the Wrong Questions , Lemony Snicket

Sommaire

4.1 Représentation des connaissances sur le monde	61
4.1.1 Les connaissances dans l'objet	62
Les Smart Objects [Kallmann and Thalmann, 1999b]	62
STARFISH [Badawi and Donikian, 2004]	63
STORM [Mollet, 2005]	63
Bilan	64
4.1.2 Les connaissances externalisées	64
Le métamodèle VEHA [Chevaillier et al., 2009]	64
SYSML	66
VR-WISE [Bille et al., 2004]	66
Cause-and-Effect [Lugrin and Cavazza, 2006]	67
COLOMBO [Edward et al., 2010, Edward, 2011]	68
4.1.3 Bilan et positionnement	69
4.2 Représentation des connaissances sur l'activité	70
4.2.1 Automates à états finis	70
4.2.2 LORA [Mollet and Arnaldi, 2006]	70
4.2.3 YALTA [Rouillé et al., 2008]	71
4.2.4 HAWAI-DL [Amokrane, 2010, Edward, 2011]	72
4.2.5 Bilan et positionnement	72
4.3 Bilan et positionnement	73

Afin d'adapter le contenu de la simulation à l'apprenant au travers de la scénarisation, il est nécessaire de disposer en plus du modèle de l'apprenant, d'un modèle du domaine représenté par l'environnement virtuel.

Nous rappelons que nous avons des objectifs contradictoires. Nous voulons à la fois rendre possible une scénarisation dynamique adaptée à l'apprenant couvrant un large spectre de situations tout en réduisant la part d'écriture de contenu nécessaire à la production de l'environnement. Afin de trouver un compromis entre ces deux objectifs, nous proposons de faire reposer la **scénarisation** et l'**exécution** de l'environnement virtuel sur des **représentations des connaissances communes**. L'exécution

de l'environnement virtuel consiste à faire la simulation du système considéré en prenant notamment en compte :

- les interactions de l'utilisateur ;
- les comportements des personnages virtuels autonomes (PVA) ;
- des événements provoqués par le formateur ou par un moteur de mise en œuvre du scénario prescrit ;
- des événements autonomes issus du fonctionnement du système.

Pour remplir à la fois les besoins de la scénarisation et de l'exécution de l'environnement, nous avons identifié un certain nombre de propriétés dont la représentation des connaissances sur le domaine doit disposer :

- **expressivité** : considérant les domaines d'application qui nous intéressent, il est nécessaire de disposer des moyens de représentation suffisants pour décrire la structure et le fonctionnement de systèmes complexes. L'expressivité est la quantité de choses qu'il est possible de décrire avec un formalisme [Felleisen, 1990], nous distinguerons deux sortes d'expressivité :
 - le **pouvoir descriptif** qui détermine les possibilités de représenter des relations complexes entre entités pouvant être de natures très différentes,
 - le **pouvoir d'abstraction** qui détermine la faculté de faire des descriptions, et donc des raisonnements, à des niveaux d'abstraction différents : des concepts généraux aux instances ;
- **modularité** : l'un de nos objectifs est de faciliter la production et l'utilisation des EVAH, cela passe notamment par la possibilité de pérenniser et de réutiliser des contenus déjà produits. La modularité permet d'ajouter ou de retirer des éléments facilement au modèle sans avoir à le reconsidérer totalement. Il est ainsi possible de maintenir et faire évoluer et reconfigurer les applications existantes pour en créer de nouvelles ;
- **interprétabilité** : par ce terme, nous décrivons la propriété d'un formalisme à intégrer suffisamment de connaissances pour rendre possible des **raisonnements informatiques** sur les modèles qui en découlent [Brachman and Levesque, 2004]. Pour cela, il doit inclure ou permettre de renseigner les règles rendant possible l'inférence des connaissances qui ne sont pas explicitement décrites ;
- **intelligibilité** : la facilitation de la production des EVAH passe notamment par la possibilité d'écriture et de lecture du contenu par les experts du domaine sans la participation des concepteurs du dispositif. Ainsi, le langage doit pouvoir être manipulé par des non-informaticiens.

Ces propriétés nous donnent des qualités que doit respecter de manière générale une représentation des connaissances sur le domaine. Cependant, comme le relève [Chevaillier et al., 2012], les connaissances sur le domaine sont de deux ordres. Il y a tout d'abord les **connaissances relatives à la structure** du système considéré : quelles sont les entités qui le composent ? Quelles relations entretiennent-elles ? Comment évoluent-elles ? Les réponses à ces questions sont formalisées dans un **modèle du monde**. Il permet notamment de décrire à tout instant l'état du monde.

Il y a ensuite les **connaissances liées aux activités humaines** dans le système considéré. Ces connaissances peuvent décrire des méthodes de résolution de problèmes, des procédures à suivre, de même que des comportements observés sans être pour autant des comportements attendus. Une représentation incluant ces connaissances est un **modèle d'activité**. En réalité, la modélisation réelle de l'activité supposerait que tous les comportements possibles observés seraient décrits de manière exhaustive. Nous n'avons pas cette prétention mais nous utiliserons tout de même ce terme de manière abusive afin de rendre compte que c'est ce vers quoi il faudrait tendre, car la modélisation des tâches uniquement (les procédures et méthodes prévues et prescrites) est trop limitante quant à la prise en compte des facteurs humains. Le modèle de l'activité constitue en quelque sorte un modèle d'utilisation pour le modèle du monde.

Nous commencerons par étudier des propositions de modèles pouvant soutenir une représentation des connaissances sur le monde pour les environnements virtuels, puis dans une seconde partie nous évoquerons différents travaux sur la représentation de la tâche et de l'activité.

4.1 Représentation des connaissances sur le monde

La scénarisation est un processus de prescription d'objectifs scénaristiques qui peuvent être explicites, et donc peuvent se décrire sous la forme d'un **état du monde partiel**. De fait, un objectif explicite est décrit, et généré dans notre cas, en utilisant le langage de représentation du monde. Celui-ci doit donc disposer d'un **pouvoir génératif**. Un langage doté d'un pouvoir génératif incorpore les **règles syntaxiques** pour assurer que le contenu généré soit valide, mais également des **règles sémantiques** afin d'assurer sa compréhension. Les objectifs scénaristiques générés, décrits dans le même formalisme que la représentation du monde, doivent être valides sur le plan syntaxique (respecter la syntaxe du formalisme) pour être interprétables par d'autres moteurs, et valides sur le plan sémantique (être en accord avec le contenu de la représentation du monde).

Par ailleurs, l'exécution de l'environnement nécessite la mise à jour et le maintien de l'état du monde. Le modèle du monde ne peut donc se limiter à un ensemble de propriétés descriptives, il doit également incorporer les règles d'évolution du système décrit. On parlera alors du caractère **opérationnel** de la représentation.

Les travaux de représentation des connaissances sur le monde pour les environnements virtuels sont relativement récents, ce qui expliquera que les pistes soient encore très exploratoires et que les termes ne soient pas encore figés. Ainsi, dans la littérature, les environnements virtuels à base de connaissances sont parfois appelés *environnements virtuels riches*, *environnements virtuels intelligents*, ou encore *environnements virtuels informés*.

Nous retiendrons la définition de [Thouvenin, 2009] d'un Environnement Virtuel Informé (EVI).

Environnement Virtuel Informé [Thouvenin, 2009]

Un EVI est un environnement virtuel doté de modèles à base de connaissances dans lequel il est possible à la fois d'interagir et de permettre des comportements par interprétation de représentations dynamiques ou statiques

Dans l'état de l'art, les connaissances usuellement intégrées à un EVI relèvent d'un continuum dont les deux extrêmes sont :

- les connaissances **sur l'environnement virtuel** en tant que tel qui décrivent la scène 3D, les possibilités d'interactions à bas niveaux, les animations et comportements des objets de la scène ;
- les connaissances **sur le domaine** qui décrivent les concepts et objets du domaine d'application, les relations qui les nouent et les comportements qui les régissent, indépendamment de leur représentation dans un système informatique ;

Selon les travaux, la modélisation porte plus sur les aspects de l'environnement virtuel que sur le domaine. Notre enjeu étant la scénarisation de contenu valide écologiquement (fidèle à un contexte donné), nous avons concentré notre étude sur les EVI à base de connaissances sur le domaine. Toutefois, parmi ces travaux, certains sont également capables de décrire des connaissances relatives à l'environnement virtuel.

Deux grandes approches permettent de représenter les connaissances sur le monde. On peut choisir d'ajouter la connaissance sur les objets, en faisant en sorte que chaque objet porte les informations rendant possible son utilisation. Mais on peut également choisir de décrire le monde de manière centralisée dans une représentation globale intégrant la connaissance de toutes les entités.

4.1.1 Les connaissances dans l'objet

Les Smart Objects [Kallmann and Thalmann, 1999b]

Les premiers travaux de représentation des connaissances dans les EVI sont les travaux de [Kallmann and Thalmann, 1999b, Kallmann and Thalmann, 1999a] sur les Smart Objects. Reposant sur la *théorie des affordances* de [Gibson, 1977], le principe est d'intégrer les connaissances sur le fonctionnement et l'utilisation des objets dans leurs représentations géométriques. Leurs capacités, leurs modes d'interactions et leurs propriétés sont ainsi accessibles par les utilisateurs ou par des personnages virtuels.

Les descriptions des Smart Objects se font dans un langage de script très bas niveau (voir figure 4.1), ce qui rend difficile la conception de comportements complexes et, *a fortiori*, leur prise en main par des non-informaticiens.

```

COMMANDS
# name      action      part   ini    end    inc
cmd_open_door translation1 part1  0.00  1.00  0.05
cmd_open_door translation2 part2  0.00  1.00  0.05
cmd_close_door translation1 part1  1.00  0.00  0.05
cmd_close_door translation2 part2  1.00  0.00  0.05
END # of commands

VARIABLES
  open      0.0
  passing   0.0
END # of variables
BEHAVIOR go_out1
  Subroutine
  addvar    passing  1.0
  gotopos   pos_out1
  addvar    passing -1.0
END # of behavior

BEHAVIOR go_out2
  Subroutine
  addvar    passing  1.0
  gotopos   pos_out2
  addvar    passing -1.0
END # of behavior

BEHAVIOR open_door
  Subroutine
  checkvar  open     0.0
  changevar open     1.0
  docmd     cmd_open_door
END

BEHAVIOR enter1
  Subroutine
  gotopos   pos_enter1
  dobh      open_door
  dobh      go_out1
  dobh      close_door
END # of behavior

BEHAVIOR enter
  Dobhifnear enter1 pos_enter1
  Dobhifnear enter2 pos_enter2
END # of behavior

BEHAVIOR close_door
  Subroutine
  checkvar  open     1.0
  checkvar  passing  0.0
  changevar open     0.0
  docmd     cmd_close_door
END

BEHAVIOR enter2
  Subroutine
  gotopos   pos_enter2
  dobh      open_door
  dobh      go_out2
  dobh      close_door
END # of behavior

```

FIGURE 4.1 – Description de comportements dans un Smart Object [Kallmann and Thalmann, 1999b]

L'atout majeur des Smart Objects est la **modularité**. En effet, par la description unitaire des objets il est possible de produire et de partager facilement des bibliothèques d'objets réutilisables. Par ailleurs, la possibilité de description locale de comportement devrait rendre possible l'émergence de comportements plus complexes, mais celle-ci est finalement limitée par le fait que seul un agent (utilisateur ou personnage virtuel) peut interagir avec un objet. En d'autres termes, il n'est pas possible de modéliser des interactions entre deux objets, ce qui nuit fortement à l'**expressivité** de l'approche. Le langage de script utilisé à l'origine pour la description des comportements n'est pas interprétable par des moteurs tiers. Cependant, les travaux de [Abaci et al., 2005] étendent les Smart Objects en ajoutant une description des préconditions et des effets des actions dans le langage STRIPS dédié à la planification [Fikes and Nilsson, 1972]. Ces descriptions sont notamment accessibles à des PVA pour planifier leurs actions.

STARFISH [Badawi and Donikian, 2004]

L'approche des Smart Objects est reprise par d'autres auteurs, chacun y apportant des améliorations. Ainsi, [Badawi and Donikian, 2004] proposent les **objets synoptiques** dans le modèle STARFISH. Grâce à une granularité plus fine dans la description, il est possible d'associer des comportements particuliers aux différentes **surfaces d'interactions** d'un même objet. Les comportements sont définis par des automates hiérarchiques (voir figure 4.2) . Pour décrire des comportements très simples, un tel formalisme graphique est accessible à des non-informaticiens. Cependant, il rend difficile la description de systèmes complexes où tous les cas doivent être envisagés dans un énorme automate inintelligible pour l'humain. La difficulté de lecture et d'écriture des comportements est visible sur l'exemple proposé dans la figure 4.2 qui décrit la manipulation d'une porte.

De plus, il est impossible de décrire des relations entre objets synoptiques, ce qui limite fortement les possibilités d'expression de cette approche.

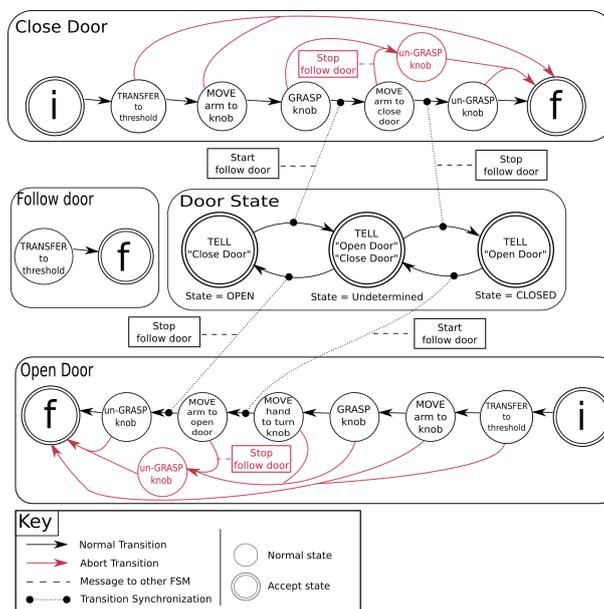


FIGURE 4.2 – Automate pour la représentation des comportements dans STARFISH [Badawi and Donikian, 2004]

STORM [Mollet, 2005]

La possibilité de mise en relation entre des objets est proposée dans le modèle STORM [Mollet, 2005]. Grâce à cette nouvelle modalité d'interaction entre objets, il est possible de mettre en place de nouveaux types de comportements tels que l'utilisation d'un outil sur un objet, mais également de décrire des systèmes plus complexes et fonctionnant de manière autonome.

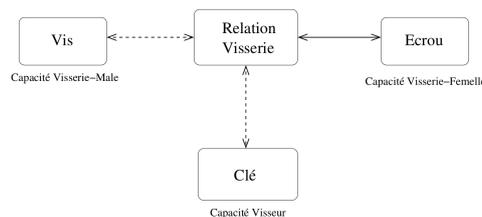


FIGURE 4.3 – Représentation de la visserie dans STORM [Mollet, 2005]

Cette avancée relative au **pouvoir descriptif** s'accompagne d'une avancée relative au **pouvoir d'abstraction** grâce à la notion de *capacité*. Chaque capacité donne à un objet un ensemble de propriétés et de mode d'interaction. Par exemple, l'objet *vis* est doté de la capacité *visserie-mâle*, il expose donc une propriété de *taille* ainsi que la possibilité de s'engager dans une relation de *visserie* avec un objet doté de la capacité *visserie-femelle* tel que l'*écrou* grâce à une *clé* (voir figure 4.3). Les comportements sont découplés des objets et sont représentés par des automates ce qui rend difficile leur accessibilité pour des moteurs décisionnels tiers.

Bilan

Les travaux sur la représentation des connaissances dans les objets démontrent des atouts importants sur un plan purement technique. Ces approches sont modulaires et peuvent assurer une grande partie de l'exécution de l'environnement virtuel. Cependant, elles manquent en général de moyens d'expressivité. STORM va plus loin que les autres travaux, mais la mise en relation des objets reste limitée à ceux qui interagissent les uns sur les autres. Ainsi, il n'est par exemple pas possible de décrire des relations de composition entre objets.

De par son caractère très opérationnel, ce type d'approche est maintenant utilisée dans l'industrie du jeu vidéo. Un exemple phare de leur application et de leur intérêt est notamment visible dans les jeux de la franchise *The Sims* [Simpson, 2005]. Dans ces jeux, chaque objet expose les actions que les *sims* peuvent opérer sur eux, les animations qu'elles provoquent ainsi que les effets produits (voir figure 4.4).



FIGURE 4.4 – Interaction avec un objet dans *The Sims 2*

4.1.2 Les connaissances externalisées

L'approche opposée à l'intégration des connaissances dans l'objet consiste à modéliser les connaissances sur le domaine de façon découplée de l'environnement, et à intégrer les liens avec la scène 3D dans la représentation. Ainsi, la connaissance n'est pas portée par la géométrie des objets, en revanche **la géométrie peut être référencée comme connaissance** dans la représentation du domaine.

Le métamodèle VEHA [Chevaillier et al., 2009]

L'approche de modélisation du domaine externe à la scène 3D est notamment mise en œuvre par [Chevaillier et al., 2009] avec le métamodèle VEHA (Virtual Environment for Humans Activities). L'ambition des auteurs est de proposer un métamodèle pour la modélisation du contenu d'un environnement virtuel. Ce modèle s'accompagne d'une architecture constituée de moteurs capables de raisonner directement sur le métamodèle de sorte que l'approche générale est complètement indépendante du domaine.

Dans VEHA, les connaissances sont distinguées en trois catégories :

1. **Les concepts du domaine** : la description sémantique des concepts et des relations du domaine considéré (voir figure 4.5).
2. **Les possibilités d'interaction et la structuration de l'environnement** : les connaissances liées aux possibilités et aux modalités d'interactions des entités en tant qu'objets géométriques dans la scène.
3. **Les comportements des entités** : la description de l'évolution des entités en fonction des interactions avec les utilisateurs ou avec les autres entités. Les comportements simples sont implémentés sous forme de machine à état (voir figure 4.6) alors que les comportements plus complexes sont encodés dans des langages de programmation classiques tels que le C# sous forme d'*opaque behaviors*.

Reposant sur le langage UML, VEHA bénéficie de tous les outils qui s'y rapportent : éditeurs graphiques, générations de code, transformation de modèles... Ainsi, l'approche est assez **modulaire** et bénéficie de nombreux outils d'édition, ce qui facilite la création de contenus.

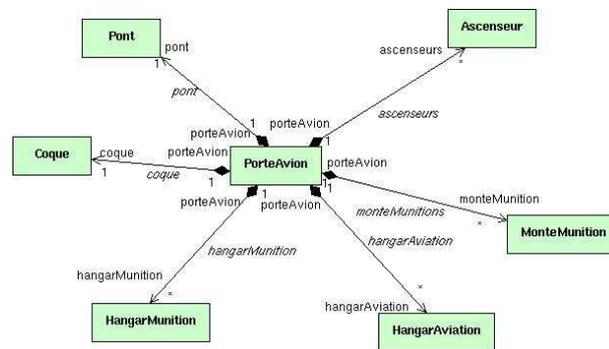


FIGURE 4.5 – Description d'un domaine dans le méta-modèle VEHA [Chevaillier et al., 2009]

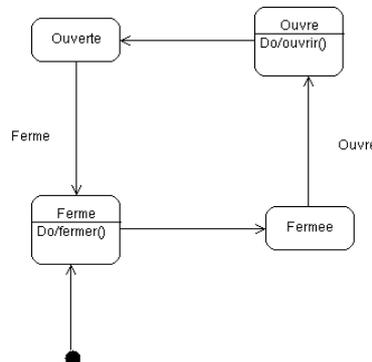


FIGURE 4.6 – Représentation d'un comportement dans VEHA grâce à une machine à état [Chevaillier et al., 2009]

Pour autant, bien qu'UML soit un langage de modélisation standard très répandu, il est destiné aux experts de l'architecture logicielle. Sa prise en main par des non-informaticiens reste difficile. En outre, UML permet de donner de la sémantique à la structure, mais celle-ci n'est pas accessible par des moteurs décisionnels, ce qui limite à la fois le **pouvoir génératif** et l'**interprétabilité** des modèles issus du métamodèle VEHA. Enfin, les règles d'évolution du système encodées sous forme d'*opaque behaviors* sont inaccessibles : cela constitue un frein à toutes formes d'**interprétabilité** et de raisonnement sur le monde par des moteurs décisionnels.

SysML

Le langage SysML (SYStem Modeling Language) [OMG, 2014] repose sur l'approche d'**Ingénierie Système Basée sur les Modèles** (ISBM). Celle-ci met les efforts de modélisation au cœur des processus de développement afin de faciliter la compréhension entre les différents acteurs dans la conception d'un système. SysML est beaucoup plus large que UML et vise à décrire tous types de systèmes (mécanique, organisationnelle, logistique, etc.). Pour cela, le formalisme se découpe en neuf types de diagrammes qui sont autant de moyens de représentation. Notamment, des diagrammes hiérarchiques permettent de décrire la structure générale, des machines à états permettent de modéliser le fonctionnement et des diagrammes d'activités permettent de décrire les modes d'utilisation du système.

Grâce à ces différents formalismes, l'**expressivité** offerte par SysML est considérable. Cependant la multiplicité des représentations à appréhender rend difficile leur compréhension globale par des concepteurs d'environnement virtuel pour l'apprentissage qui ne sont pas nécessairement des ingénieurs-systèmes. En outre, les formalismes proposés sont destinés à la modélisation pour l'intercompréhension entre différents acteurs humains et ne sont pas directement interprétables par des moteurs décisionnels.

Malgré ces limitations, nous attirons l'attention sur l'intérêt que peut avoir un langage de modélisation comme SysML. En effet, ces formalismes participent à l'approche d'**Ingénierie Dirigée par les Modèles** qui vise à décrire un système par des modèles abstraits qui sont ensuite dérivés via des outils de transformation de modèles pour répondre à différents besoins. Il est donc tout à fait envisageable qu'un modèle de système conçu dans SysML (le fonctionnement d'une machine-outil par exemple) soit dérivé pour enrichir un modèle du monde interprétable par des moteurs décisionnels au sein d'une simulation.

Avec l'essor du web sémantique, de nombreux travaux s'orientent vers l'utilisation de représentations ontologiques pour décrire le monde et disposer ainsi des atouts des raisonnements sémantiques. Un environnement virtuel doté d'une telle représentation est alors appelé **environnement virtuel sémantique** [Gutiérrez Alonso, 2005].

VR-WISE [Bille et al., 2004]

Dans cette architecture qui, malgré son nom, est destinée aux environnements virtuels peu interactifs, les connaissances sur le monde sont décrites en DAML+OIL [Horrocks, 2002], un langage hérité de RDFS [Klyne and Carroll, 2006]. La représentation repose sur trois éléments (voir figure 4.7) :

- **Pontologie du domaine** (*world ontology*) qui décrit les concepts du domaine d'application, leurs propriétés et les relations qu'ils peuvent nouer ;
- **Pontologie de la réalité virtuelle** (*VR ontology*) qui décrit les connaissances liées à la manipulation d'une scène 3D : primitives (sphères, boîtes, cylindre, etc.), positions, orientations, etc. ;
- **les associations** (*mapping*) qui établissent les liens entre l'ontologie du domaine et l'ontologie de la réalité virtuelle.

L'approche ne considère cependant pas du tout la problématique de l'exécution de l'environnement virtuel, celle-ci étant opérée de manière classique par le moteur de jeu.

Il s'agit toutefois d'un apport considérable sur la problématique de la description. En effet, l'utilisation d'ontologie rend possible un très haut niveau d'**expressivité**. En outre, la séparation nette entre la représentation du domaine et la représentation des connaissances liées aux environnements virtuels permet une plus grande **modularité**.

Les possibilités offertes par les représentations sémantiques montrent l'intérêt de leur **interprétabilité** dans la diversité des applications proposées telles que la génération de scène [De Troyer

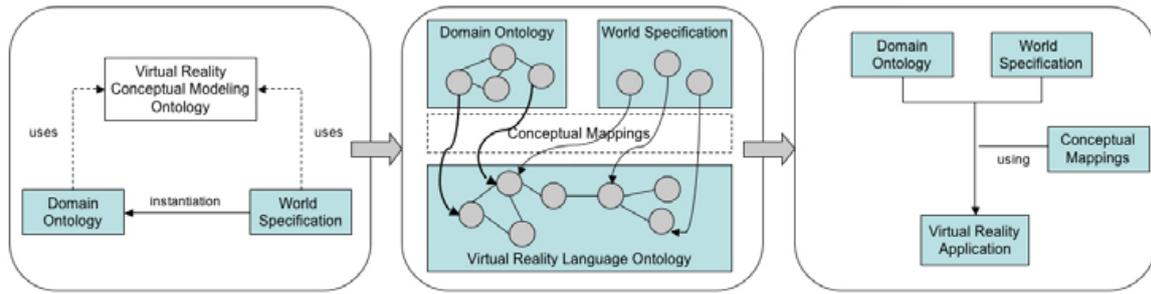


FIGURE 4.7 – Schéma de l'architecture générale de VR-Wise [Kleinermann et al., 2005]

et al., 2003] ou la recherche d'information pour l'exploration d'un magasin virtuel [Kleinermann et al., 2005, De Troyer et al., 2007].

Cause-and-Effect [Lugrin and Cavazza, 2006]

[Lugrin and Cavazza, 2006] proposent un moteur d'exécution de l'environnement virtuel dont l'ambition est de contrôler la simulation physique afin de mener le scénario vers des situations choisies.

Pour cela, les connaissances sur le monde sont représentées au travers du langage Cause-and-Effect. Il décrit les différentes *actions* qui sont les moyens d'intervention à disposition pour le moteur (voir la partie gauche de la figure 4.8). Pour décrire une action, trois éléments sont nécessaires :

- **un événement** qui permet de déclencher l'action. Il peut s'agir d'une interaction de l'utilisateur (prendre un objet, utiliser un objet), ou d'un événement physique (collision entre deux objets) ;
- **les préconditions** décrivent l'état du monde à la réception de l'événement pour que l'action soit possible ;
- **les effets** décrivent les changements à apporter à l'état du monde pour rendre l'action effective.

Les prédicats décrivant les conditions et les effets font référence aux propriétés des objets décrits dans une ontologie (voir la partie droite de la figure 4.8).

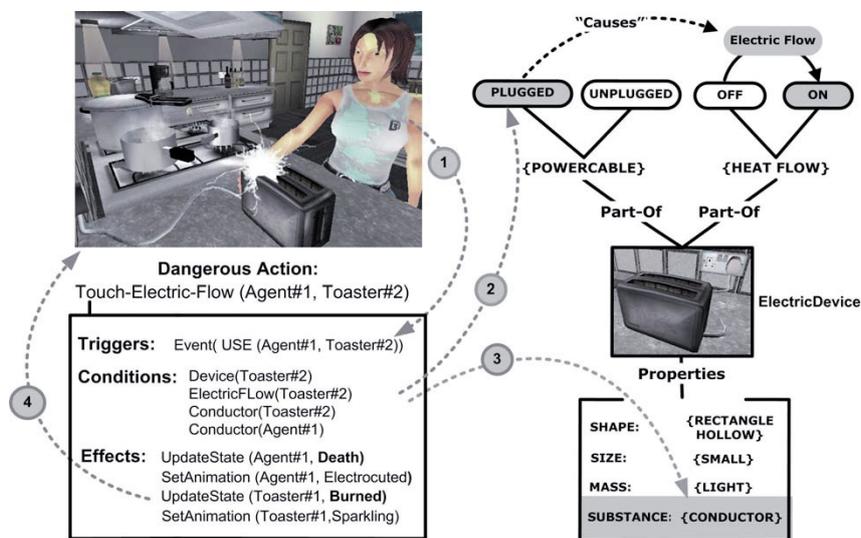


FIGURE 4.8 – Représentation d'une action et d'un objet dans [Lugrin and Cavazza, 2006]

La modélisation des connaissances dans l'ontologie repose sur le raisonnement fonctionnel [Bicci and Amant, 2003]. Chaque objet expose un certain nombre de fonctions auxquelles sont associées différentes propriétés. Par exemple, un grille-pain est un objet "branchable", qui a donc la propriété d'être branché ou non. En plus de faciliter l'effort d'élicitation dans la modélisation par l'expert, ce type de représentation permet d'assurer la **modularité** de l'approche puisqu'il est possible de constituer des bibliothèques de fonctions réutilisables.

En terme d'expressivité, il convient de distinguer les deux modes de représentations. La représentation ontologique des objets associée à du raisonnement fonctionnel offre une très grande expressivité. Cependant, les moyens de représentation des actions dans Cause-and-Effect sont beaucoup plus limités. D'une part, l'écriture des actions se fait en considérant les instances. Il faut donc dupliquer chaque action pour tous les objets concernés. D'autre part, les conditions et les effets constituent des blocs. Il n'est pas possible de décrire des conditions complexes ou des effets alternatifs dépendant des conditions.

COLOMBO [Edward et al., 2010, Edward, 2011]

Le modèle COLOMBO (Création Ontologique Liée à la MOdélisation des OBjets) [Edward et al., 2010] adopte une approche similaire à VEHA et à la représentation ontologique associée à CE. COLOMBO repose sur une représentation ontologique des connaissances pour décrire les objets, les propriétés et les actions réalisables sur les objets (voir figure 4.9). L'ontologie est décrite dans le langage MOSS développé pour la plateforme OMAS [Barthès, 2011]. À l'instar de [Southey and Linders, 2001], les comportements du monde sont modélisés au travers de règles décrites également en langage MOSS. L'avantage majeur de cette approche, par rapport à VEHA notamment, est de rendre les comportements directement **interprétables** par d'autres moteurs. Grâce à cela, des personnages virtuels autonomes raisonnent sur la représentation pour prendre des décisions et planifier leurs actions. Les règles définissent à la fois les conditions rendant possible la réalisation d'une action de même que les changements apportés au monde après la réalisation d'une action (voir figure 4.10). Cependant les travaux sur COLOMBO souffrent de plusieurs écueils. Le manque de formalisation et le choix des technologies rendent difficile une appropriation du langage par des non-informaticiens pour créer des contenus. De plus, une grande part des raisonnements s'opère sur les instances et non sur les concepts. L'approche ne bénéficie donc pas des possibilités en terme d'**expressivité** et de **générativité** offertes par les raisonnements sémantiques.

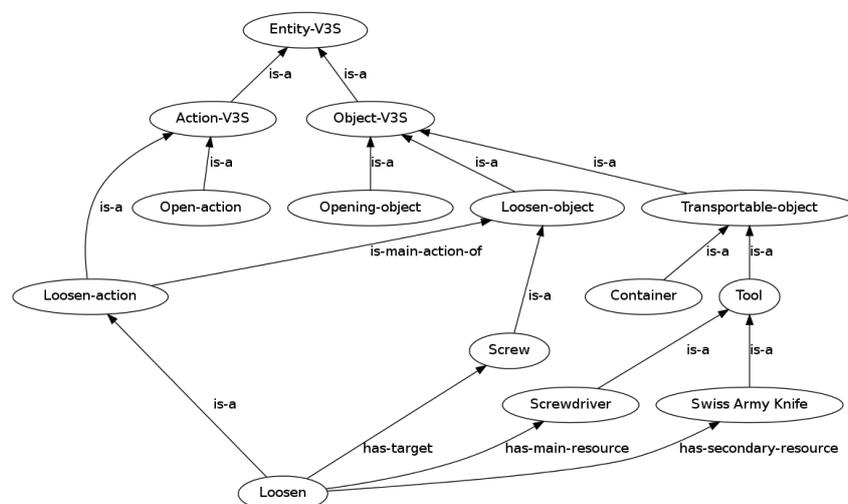


FIGURE 4.9 – Extrait d'une ontologie COLOMBO [Edward et al., 2010]

```
(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))
)
```

FIGURE 4.10 – Comportement décrit par des règles de production en langage MOSS [Edward, 2011]

4.1.3 Bilan et positionnement

Nous avons étudié différents travaux de représentation des connaissances à la lumière des propriétés nécessaires à la fois à la mise en œuvre d’une scénarisation dynamique adaptative et à la facilitation du processus de production d’un EVAH (voir tableau 4.1).

	Caractère opérationnel	Pouvoir génératif		Expressivité		Modularité	Interprétabilité	Intelligibilité
		Syntaxe	Sémantique	Description	Abstraction			
Smart Object [Kallmann et Thalmann, 1999a]	+	-	--	-	-	+++	-	--
Smart Object étendu [Abaci et al., 2005]	+	-	-	-	-	+++	++	--
Starfish [Badawi et Donikian, 2004]	+	-	--	+	-	+++	+	-
STORM [Mollet, 2005]	+	+	+	+	+	+	-	--
VEHA [Chevaillier et al., 2009]	+	++	+	++	+	+	-	--
VR-Wise [Bille et al., 2004]	--	++	+	++	++	+	+	+
Colombo [Edward, 2011]	++	++	--	++	-	++	+++	+
SYSML [OMG, 2014]	+	--	-	+++	+++	++	-	-
Cause & Effect - Actions [Lugrin & Cavazza, 2006]	++	-	-	+	--	-	++	--
Cause & Effect - Objet [Lugrin & Cavazza, 2006]	-	++	+	+	++	+	++	++

TABLE 4.1 – Récapitulatif de l’état de l’art sur la représentation des connaissances sur le monde

Parmi les travaux sur les formalismes de représentation des modèles du monde étudiés, aucun ne satisfait à tous les critères d’exigences. Les approches centrées sur l’objet offrent beaucoup de **modularité**, mais souffrent d’un manque cruel d’**expressivité**. L’utilisation de représentation globale permet en grande partie de pallier ce manque. Parmi celles-ci, seules les représentations sémantiques telles que VR-WISE et COLOMBO permettent de rendre les descriptions **intelligibles** et facilement **interprétables**. En ce qui concerne les représentations dans lesquelles les connaissances sont externalisées, seuls VEHA, COLOMBO et CE disposent de possibilités **opérationnelles**. Cependant, la difficile manipulation des automates dans VEHA rend nécessaire la description de comportements complexes dans des boîtes noires non inspectables. Bien que les comportements soient aisément accessibles pour les raisonnements dans COLOMBO, les possibilités d’abstraction limitées sont un frein à l’**expressivité** et au **pouvoir génératif** de l’approche.

La représentation ontologique pour la modélisation du domaine nous semble la plus pertinente. Elle permet à la fois la **modularité**, l’**expressivité** et l’**intelligibilité**. Décrite dans des langages sé-

mantiques, celle-ci peut, de plus, être facilement **interprétable** par des moteurs tiers. Comme nous l'avons vu dans COLOMBO, le caractère opérationnel peut être apporté par l'ajout de comportements sous forme de règles de fonctionnement sur l'ontologie. Cependant, un soin tout particulier doit être apporté sur le formalisme dans lequel elles sont renseignées afin que ceux-ci soient également interprétables sans limitations.

4.2 Représentation des connaissances sur l'activité

Outre les connaissances sur le monde, il convient de décrire les connaissances liées à l'activité supportée par le monde dans un contexte particulier.

Dans un environnement virtuel pour la formation, le modèle d'activité constitue un modèle de référence pour la génération des comportements des personnages virtuels autonomes (PVA). Ce modèle de référence constitue également une part du modèle de domaine indispensable à la réalisation du **suivi de l'apprenant**. Il permet de représenter les séquences d'actions attendues pour évaluer l'activité de l'apprenant.

Dans certains travaux de la littérature, l'activité en tant que telle n'est pas explicitement représentée car elle se déduit du fonctionnement du monde. En effet, il est possible de générer dynamiquement une séquence d'action optimale à partir des règles de fonctionnement du monde. Cette séquence est transformée en comportement pour des PVA ou en modèle de référence pour comparer l'activité de l'apprenant à l'activité "experte" à des fins de suivi. Cette approche qui vise à reproduire un raisonnement cognitiviste par la machine n'est pas pertinente dans notre contexte. En effet, elle fait abstraction de la présence du facteur humain qui introduit des déviations et des compromis par rapport au fonctionnement nominal du monde. L'activité de référence ne se résume pas à l'application mécanique des règles de fonctionnement du monde. En ce qui nous concerne, l'activité de référence est la vision *par l'humain* du déroulement des actions à effectuer. Selon les approches, cette activité peut considérer uniquement la procédure nominale ou considérer plus largement la procédure et ses écarts.

Cette représentation permet également d'informer sur les règles du domaine qui ne relèvent pas du fonctionnement du système telles que les règlements et les normes de sécurité. En outre, les connaissances sur les conditions de réalisation de certaines tâches sont indispensables pour permettre la scénarisation de situation mettant en œuvre ces tâches.

4.2.1 Automates à états finis

L'activité peut être modélisée en usant de formalismes dédiés à la représentation de séquences d'états-transitions tels que les automates à états finis ou les réseaux de Petri [Delmas, 2009]. Par ces représentations, il est possible de décrire les séquences d'actions pertinentes dans un domaine donné. Cependant, la description d'une activité complexe mettant en jeu de nombreuses alternatives peut s'avérer difficile : la représentation devient vite illisible et difficile à maintenir. L'utilisation de décomposition hiérarchique des automates telle que proposée dans HTPS [Donikian, 2001] permet effectivement de simplifier le travail d'écriture dans une certaine mesure, il n'en reste pas moins que la description de tous les possibles doit être faite de manière exhaustive.

4.2.2 LORA [Mollet and Arnaldi, 2006]

Ainsi, le langage LORA (Language for Object Relation Application) [Mollet and Arnaldi, 2006] associé à STORM(cf 4.1.1) permet de décrire les procédures dans un environnement virtuel informé. La représentation utilise des automates finis hiérarchiques dans lesquels chaque étape peut être un

sous-automates ou une action définie dans le modèle STORM. Le langage LORA vise à décrire les **procédures prescrites** sans considérer les écarts ou les erreurs. Un tel modèle ne permet pas **d'exprimer suffisamment de connaissances** pour scénariser des situations mettant l'apprenant en situation de réaliser une erreur. En pratique, le formalisme est utilisé pour réaliser l'exécution d'un scénario qui est donc contraint à suivre la procédure. Les connaissances sur les effets des actions ne sont pas informées dans un tel modèle. Ainsi, bien que le modèle puisse être exécuté par un moteur informatique, il n'est pas possible d'effectuer des raisonnements.

4.2.3 YALTA [Rouillé et al., 2008]

À l'encontre de ce positionnement, les travaux sur YALTA (Yet Another Language for Task Analysis) visent à définir un formalisme pour la description de l'**activité finalisée** [Burkhardt et al., 2009]. L'activité finalisée est l'activité telle qu'elle peut être **observée sur le terrain**. En général, elle découle de l'application d'une procédure prescrite. Elle incorpore ainsi les erreurs, les déviations et les arrangements que les opérateurs réalisent par rapport à la procédure prescrite.

YALTA repose sur un formalisme double. La description des tâches se fait dans un formalisme textuel. Leur agencement se fait grâce à un formalisme graphique. Au contraire des approches ergonomiques qui représentent usuellement l'activité sous forme d'un arbre de tâche hiérarchique, les tâches sont organisées dans un graphe orienté acyclique (voir figure 4.11). Le formalisme adopte un ensemble de symboles permettant de représenter des flux pour décrire l'ordonnancement temporel et causal, ainsi que des noeuds pour représenter les alternatives ou les points de synchronisation entre plusieurs tâches.

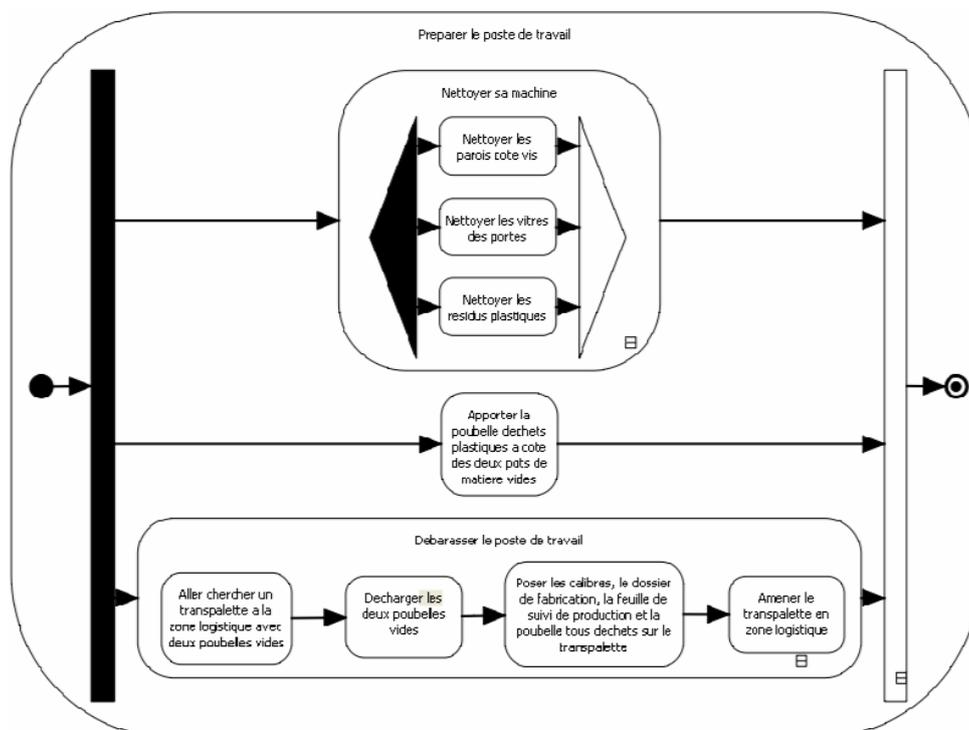


FIGURE 4.11 – Représentation d'une tâche complexe [Burkhardt et al., 2009]

Les possibilités d'**expressivité** de YALTA sont très riches. Il est notamment possible de décrire des liens de temporalité et de causalité entre les tâches. Par ailleurs, la décomposition de l'activité en tâches complexes et tâches élémentaires permet d'offrir différents niveaux d'abstraction. Le positionnement de l'approche est d'offrir un formalisme simple qui puisse être renseigné par des ergonomes

grâce à un éditeur dédié. Son **intelligibilité** est donc assurée dans une certaine mesure. En effet, étant donné la richesse du modèle, on imagine que de très gros modèles décrivant des activités complexes peuvent s'avérer difficile à appréhender.

Le formalisme YALTA n'est pas destiné à être interprété directement par la machine. Dans le cadre du projet PERFRV2, les modèles YALTA sont transformés en bibliothèques de comportements HTPS++ [Lamarche and Donikian, 2002].

4.2.4 HAWAI-DL [Amokrane, 2010, Edward, 2011]

Avec la même ambition de décrire l'activité finalisée, les travaux sur HAWAI-DL (Human Activity and Work Analysis for simulation - Description Language) [Amokrane, 2010, Edward, 2011] reposent sur des langages ergonomiques tels que MAD* [Sebillotte and Scapin, 1994] et GTA [Van Der Veer et al., 1996]. HAWAI-DL reprend notamment la structuration hiérarchique des tâches qui est couramment utilisée par les ergonomes (voir figure 4.12). En plus de permettre la description de l'activité de manière plus ou moins abstraite, un tel formalisme aide les analystes dans leur démarche d'observation.

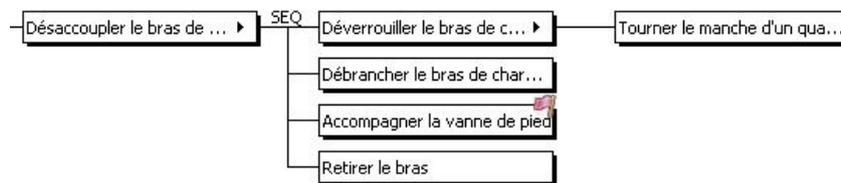


FIGURE 4.12 – Exemple d'arbre d'activité dans HAWAI-DL [Amokrane, 2010]

HAWAI-DL permet également de représenter des comportements non-nominaux sous la forme d'erreurs, de violations et de déviations. Il est même possible pour l'auteur de préciser dans quelles conditions ces déviations peuvent être tolérées. Cette approche est particulièrement pertinente pour notre cadre théorique puisqu'il permet de modéliser les comportements liées à l'expérimentation du domaine considéré en vue de la construction de la connaissance. Le langage HAWAI-DL a été conçu en lien avec le modèle COLOMBO que nous avons présenté dans la section 4.1.2. Il souffre des mêmes limites sur la formalisation. Par exemple, il est difficile de distinguer les règles logiques par rapport au règles d'ordonnancement dans la description des tâches. De fait, il peut difficilement être pris en main par des non-initiés. En outre, les liens avec la représentation ontologique dans COLOMBO se font uniquement au niveau des instances. Or, afin de bénéficier d'un certain **pouvoir génératif**, il est indispensable de pouvoir raisonner au niveau des concepts.

4.2.5 Bilan et positionnement

A minima, les modèles d'activités permettent de représenter la procédure à appliquer dans un domaine. Les modèles issus de formalismes informatiques, comme les machines à état ou les diagrammes d'activités, sont **difficiles à prendre en main** pour des non-informaticiens. De plus, ils pèchent par leur **manque d'expressivité**. Au contraire, les modèles qui s'inspirent des modèles de tâches utilisés en analyse ergonomique tels que YALTA et HAWAI-DL disposent de plus d'expressivité et permettent notamment de décrire les déviations à la procédure. Cependant, un langage comme YALTA doit être transformé avant d'être interprété par un moteur.

Le formalisme HAWAI-DL est au plus proche de nos objectifs, mais la faiblesse de sa formalisation et son manque de conceptualisation ne rendent pas possible son utilisation directement. Afin de combler ces lacunes, des travaux ont été menés en parallèle de cette thèse sur le formalisme

ACTIVITY-DL. Bien que les travaux sur ce modèle d'activité aient été réalisés en complémentarité avec les travaux présentés dans ce mémoire, ils ne font pas partie de nos contributions. Nous décrivons sommairement ce modèle dans la section 8.2.1. La définition du formalisme ACTIVITY-DL est une des contributions de Camille Barot [Barot, 2014].

Le tableau 4.2 récapitule comment nous évaluons les travaux présentés par rapport à nos critères.

	Expressivité		Modularité	Interprétabilité	Intelligibilité
	Description	Abstraction			
Lora [Mollet et Arnaldi, 2006]	-	+	+	--	--
Automates à états finis	+	-	+	-	-
Yalta [Burkhardt et al., 2009]	++	++	+	-	++
Hawai-DL [Amokrane, 2010]	++	-	++	+	++

TABLE 4.2 – Récapitulatif de l'état de l'art sur les modèles d'activité

4.3 Bilan et positionnement

Dans ce chapitre nous avons présenté nos besoins sur la représentation des connaissances sur le domaine. Pour permettre la modularité des EVAH, il est nécessaire de séparer les connaissances sur le monde des connaissances sur l'activité. Ainsi, une même description du monde, associée à un même environnement virtuel, peut être utilisée pour des applications différentes. Par exemple, un environnement virtuel représentant un site de chargement de matières dangereuses peut servir à la fois d'outil de formation pour les opérateurs du site, mais également d'outil d'entraînement pour des équipes d'intervention en cas d'accident.

Par ailleurs, les méthodes et les expertises impliquées dans l'extraction de ces deux types de connaissances sont radicalement différentes. La réunion de ces connaissances dans un même modèle n'est possible qu'après un effort de synthèse entre les informations reçues de différents experts. Cette synthèse peut s'avérer extrêmement difficile car chaque domaine d'expertise dispose d'un vocabulaire et de pratiques qui lui sont propres. Elle nécessite, de plus, l'intervention d'un informaticien qui, pour rendre possible la modélisation, devra uniformiser les différentes vues au risque d'affecter la fidélité du modèle par rapport à la réalité. En séparant les modèles, on offre à chaque domaine d'expertise des vues différentes qui se complètent mutuellement.

Le modèle du monde décrit les connaissances sur le système. Celui-ci est entendu au sens large, puisqu'il ne s'agit pas de décrire uniquement le système technique. On pourra par exemple y inclure en plus de la description des systèmes techniques, la structure organisationnelle des ressources humaines ou même un modèle des coûts financiers. Ces connaissances doivent être **remplies par des experts du domaine** : des concepteurs de machines-outils, des ingénieurs de production, des ingénieurs en sûreté de fonctionnement, des responsables de ressources humaines, etc. En terme de mode de représentation, le modèle du monde doit être **opérationnel** pour permettre l'exécution et le maintien de la simulation, mais il doit également être sous-tendu par un formalisme permettant la description d'état du monde fictif pour la scénarisation. L'adoption de langages **intelligibles** et **expressifs** permet d'attribuer le travail d'écriture du contenu à des experts du domaine non-informaticiens. L'approche adoptée par COLOMBO qui consiste à utiliser des représentations ontologiques associées

à des règles nous semble tout à fait pertinente. Une telle approche doit cependant être perfectionnée pour inclure des raisonnements sémantiques de haut niveau.

Le modèle de l'activité décrit les connaissances sur le déroulement des actions dans le système. Il peut décrire la procédure prescrite, les erreurs courantes, les violations à la procédures de même que les compromis. Les connaissances sur l'activité découlent d'une analyse réalisée par des ergonomes en collaboration avec les opérateurs de terrain. La représentation de l'activité doit être expressive pour permettre un suivi fin de l'apprenant, la génération de comportements autonomes pour d'éventuels personnages virtuels et la scénarisation. Le modèle HAWAI-DL est le plus proche de nos besoins, mais n'est pas suffisant. Nous nous sommes donc appuyés sur les travaux en cours sur le formalisme ACTIVITY-DL que nous présenterons en section 8.2.1.

Deuxième partie

Contributions

Chapitre 5

Approche de scénarisation personnalisée dans les Environnements Virtuels pour l'Apprentissage Humain

“ Sooner or later, everyone’s story has an unfortunate event or two...The solution, of course, is to stay as far away from the world as possible and lead a safe, simple life.
The End , Lemony Snicket ”

Sommaire

5.1 Approche générale	79
5.2 Modèles pour la scénarisation personnalisée	81
5.2.1 Modèle du domaine	82
Modèle du monde	82
Modèle de l’activité	83
Modèle de causalité	84
5.2.2 Profil de l’apprenant	85
5.2.3 Modèle pédagogique	86
5.2.4 Modèle diégétique	86
5.3 Processus décisionnels pour la scénarisation	86
5.3.1 Diagnostic	86
5.3.2 Fonction de transformation	88
5.3.3 La diégétisation	88
5.3.4 Contrôle local pour l’émergence d’une organisation globale	89
Niveau microscénaristique - la situation	90
Niveau mésoscénaristique - l’épisode	90
Niveau macroscénaristique - le parcours	90
5.4 La place du formateur	91
5.5 Intégration dans HUMANS	91
5.6 Bilan	93

Notre problématique porte sur la scénarisation personnalisée, en tant qu’étape de spécification du déroulement du scénario, des environnements virtuels pour la formation. Nous cherchons à permettre à la fois la mise en place d’une scénarisation personnalisée dynamique et également à faciliter la

production des environnements virtuels pour l'apprentissage. Nous nous intéressons plus particulièrement aux domaines complexes dans lesquelles la grande variabilité des situations rend difficile le travail d'écriture des contenus.

L'étude de la littérature a permis de mettre en exergue différentes propriétés des systèmes de scénarisation. En plus de guider notre réflexion, cette étude a permis d'évaluer les atouts et les limites de ces différents systèmes par rapport à nos objectifs. Aucun des travaux étudiés ne permet de répondre à notre problème de scénarisation en prenant en compte les mêmes contraintes.

En particulier, nous avons pu observer que la bonne qualité de la scénarisation (qu'elle soit pédagogique ou narrative) est atteinte au prix d'un effort de conception considérable. Les approches émergentes permettent de contourner le problème dans une certaine mesure. Il ne s'agit plus de décrire exhaustivement un ensemble de possibles, mais de concevoir des entités autonomes faisant émerger le scénario par leurs interactions entre elles et avec les utilisateurs. Cependant, **l'absence de coordination globale nuit à la pertinence du scénario**. Des approches hybrides tentent de **concilier contrôle et émergence**. Ce compromis se fait cependant **au prix de la cohérence des comportements** des entités peuplant la simulation. En effet, le contrôle global s'opère en suspendant temporairement l'autonomie de la simulation, ce qui provoque des discontinuités dans les comportements et donc, crée un sentiment d'incohérence pour l'utilisateur. Ces incohérences sont rédhibitoires à deux égards. Tout d'abord, elles entraînent des ruptures de l'immersion : l'apprenant reprend conscience qu'il est dans une simulation et, dès lors, n'est plus aussi engagé dans la tâche. Ensuite, les comportements incohérents sont difficilement explicables. Or, **l'explicabilité** est primordiale pour permettre aux apprenants de construire la connaissance. Les approches hybrides telles que proposées par la littérature ne sont donc pas adaptées à cet égard.

Un verrou majeur naît de la tension entre les objectifs liés à la scénarisation et les contraintes liées au processus de production de l'environnement virtuel. D'une part, nous visons une scénarisation riche, dynamique, personnalisée et pédagogique qui nécessite de mettre en place une grande variabilité de contenu en prenant en compte une stratégie d'apprentissage. D'autre part, nous avons pour contrainte la limitation de l'effort de création des contenus pour permettre l'essor des environnements informatiques pour l'apprentissage humain. Or, nous nous situons dans des contextes pour lesquels la complexité et la prépondérance des facteurs humains constituent un véritable frein à la description manuelle de scénarios.

Les travaux de la littérature ne considèrent en général que deux niveaux d'agrégation. Il s'agit d'une part, du **niveau microscénaristique** qui consiste à adapter le contenu relevant de la tâche qu'est en train d'effectuer l'utilisateur, et d'autre part du **niveau macrosénaristique** qui relève du parcours global d'apprentissage. Ainsi, souvent, le niveau mésoscénaristique est délaissé dans les travaux sur la scénarisation dynamique. Or, **le niveau mésoscénaristique** est un levier essentiel : il permet de mettre en œuvre de manière cohérente un ensemble de connaissances au travers d'une histoire qui soit à la fois complète (un début et une fin) et raisonnablement limitée dans le temps.

Selon les communautés, l'intérêt n'est pas porté sur les mêmes objectifs. La communauté du récit interactif s'intéresse essentiellement à la **qualité narrative** des scénarios créés. Les EIAH s'attachent plus particulièrement au **contrôle pédagogique**. Enfin, en réalité virtuelle, l'ambition est de faire ressentir une impression de réalité à l'utilisateur. Ainsi, l'accent est porté sur **la fidélité de la simulation**. Celle-ci s'exprime en terme d'interaction pour offrir à l'utilisateur une grande liberté d'action similaire à la réalité, mais également en terme de contenu pour offrir des modèles de simulation conformes à la réalité (réalisme graphique, systèmes techniques, personnages virtuels autonomes, simulation physique, etc.). Notre ambition se situe à la croisée de ces enjeux. S'agissant d'environnements virtuels pour la formation, l'enjeu est d'abord pédagogique pour assurer la qualité de l'apprentissage. Ceci implique à la fois la mise en œuvre d'une stratégie d'apprentissage particulière mais, également, en ce qui nous concerne, la prise en compte de l'apprenant pour personnaliser cette stra-

tégie. L'enjeu de la fidélité du contenu rejoint notre objectif de **validité écologique** afin d'être en accord avec le paradigme d'apprentissage situé que nous avons choisi. En effet, nous souhaitons que la scénarisation puisse mettre en œuvre le large panel de situations représentatives de la réalité du terrain tout en restant justement le plus fidèle possible à cette réalité. Enfin, nous souhaitons utiliser le levier narratif (1) pour susciter et maintenir l'**intérêt** de l'apprenant et (2) pour produire des situations émotionnellement chargées qui sont une difficulté supplémentaire que les apprenants doivent maîtriser. Cet étirement en trois pôles constitue une nouvelle tension sur les enjeux de la scénarisation. Cette tension peut également se ramener à un problème de création de contenus. En effet, ces différents enjeux relèvent de domaines d'expertise différents : la pédagogie, le domaine considéré, et le *storytelling*. Ces différentes expertises doivent pourtant être réunies afin de décrire des scénarios incorporant toutes ces dimensions.

Pour répondre à ces tensions, nous proposons une approche originale de spécification automatique et personnalisée d'un scénario s'appuyant sur une démarche de conception autour de modèles de connaissances. Chaque expert élicite les connaissances de son domaine d'expertise indépendamment des autres modèles. Il dispose pour cela d'une vue sur les modèles reprenant des formalismes et un vocabulaire qui lui est familier.

Les différents modèles issus de cette élicitation sont ensuite utilisés par des moteurs décisionnels indépendants du domaine pour générer, à la volée, un scénario en prenant en compte des modes d'adaptation sur différents niveaux d'agrégation.

Dans la première partie de ce chapitre, nous décrivons l'approche générale que nous proposons. Cette approche repose sur des modèles de connaissances et des processus décisionnels qui seront présentés respectivement en section 5.2 et 5.3. Dans la section 5.4 de ce chapitre, nous précisons le rôle primordial du formateur au cours de l'exploitation de l'environnement virtuel. La section 5.5 clarifiera l'apport de cette approche et son intégration dans la démarche globale de la plateforme HUMANS. Ce chapitre sera conclu en faisant un retour sur nos objectifs.

5.1 Approche générale

L'approche que nous proposons consiste à faire reposer la scénarisation dynamique et personnalisée sur des **modèles experts** sous-tendus par des métamodèles indépendants du contexte. Des **processus décisionnels** opérationnalisant des théories issues de sciences humaines utilisent ces modèles pour **générer des objectifs scénaristiques**.

Nous avons identifié les modèles suivants :

- **le profil de l'apprenant** dresse l'état de connaissance de l'apprenant à tout instant ;
- **le modèle pédagogique** informe des règles d'évaluation de l'apprenant et des moyens d'adaptation pédagogiques ;
- **le modèle de domaine** informe des connaissances relatives au domaine considéré pour la formation ;
- **le modèle diégétique** informe des connaissances liées à la construction d'une fiction.

Pour atteindre notre objectif de **réutilisabilité**, les modèles doivent, dans la mesure du possible, être les plus affranchis du contexte possible. Ainsi, nous proposons que les seuls modèles réellement dépendants du domaine d'apprentissage soient le modèle de l'apprenant et, naturellement, le modèle du domaine.

Ce positionnement se fait par rapport à l'effort de conception. Toutefois, la qualité des scénarios proposés dans l'environnement virtuel entre en ligne de compte. Ainsi, les modèles indépendants du domaine que nous proposons (modèle pédagogique et modèle diégétique) constituent des modèles *a minima* : il est tout à fait possible de les étendre pour qu'ils intègrent plus de connaissances. Par exemple, un formateur aura la possibilité d'adapter le modèle pédagogique à ses propres besoins. Il est également possible pour un auteur d'élargir le champ des possibles diégétiques par rapport à ce qui est prévu par les primitives du modèle diégétique de base.

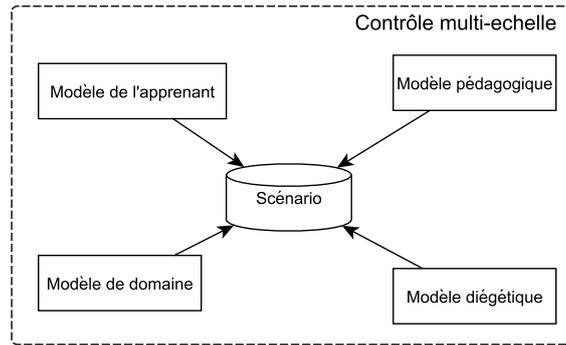


FIGURE 5.1 – Modèles experts pour la scénarisation

La spécification du scénario est réalisée grâce à des processus décisionnels indépendants du contexte. Ils raisonnent sur les modèles décrits ci-dessus à partir des métamodèles qui les sous-tendent.

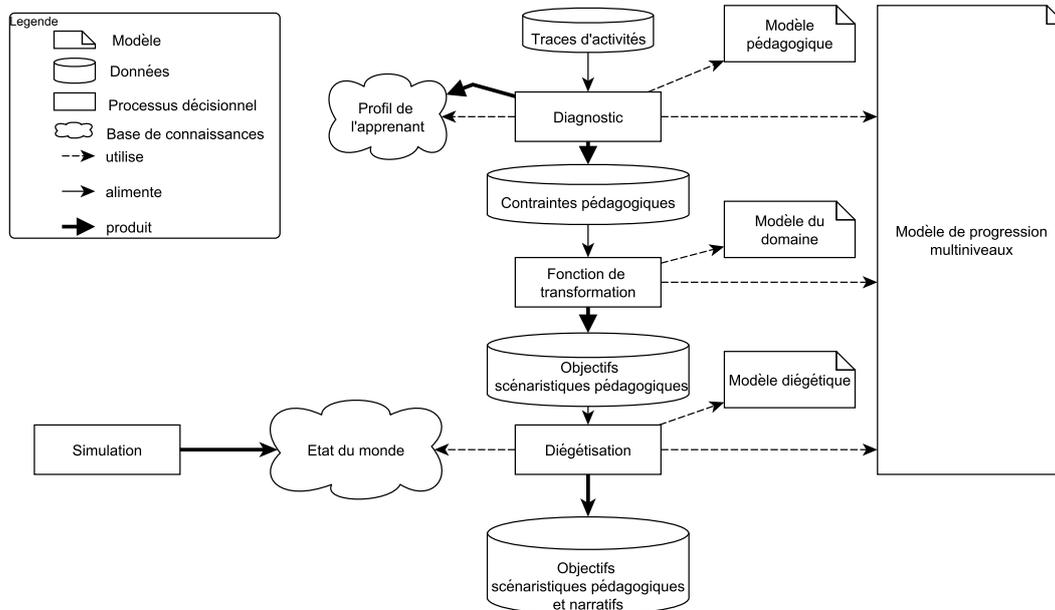


FIGURE 5.2 – Approche générale de scénarisation

Nous proposons une approche de scénarisation personnalisée reposant sur trois processus décisionnels (voir figure 5.2) :

1. **Le diagnostic de l'apprenant** maintient le profil de l'apprenant en accord avec le modèle qui le sous-tend et prend les décisions quant aux actions pédagogiques pouvant relever de la scénarisation à mettre en œuvre ;
2. **Une fonction de transformation** utilise le modèle du domaine pour générer des objectifs scénaristiques en accord avec le diagnostic de l'apprenant ;
3. **La diégétisation** utilise le modèle diégétique pour intégrer les éléments pédagogiques issus de l'étape 2 dans une diégèse. Ainsi, un objectif scénaristique qui était purement pédagogique se transforme objectif scénaristique pédagogique *et* narratif. En référence à l'approche pour laquelle nous avons optée (décrite dans le chapitre 9, on préférera le terme plus précis d'**objectif scénaristique pédagogique et diégétique**.

Ces processus prennent en considération le contrôle multiniveau pour assurer une adaptation à différents niveaux de granularité tel que nous le décrivons dans la section 5.3.4 de ce chapitre. Les modèles et processus décisionnels décrits dans cette approche générale ont fait l'objet de propositions regroupées au sein de l'architecture TAILOR (voir figure 5.3). La suite de ce chapitre décrit chacun de ces éléments et leur mise en œuvre particulière dans TAILOR.

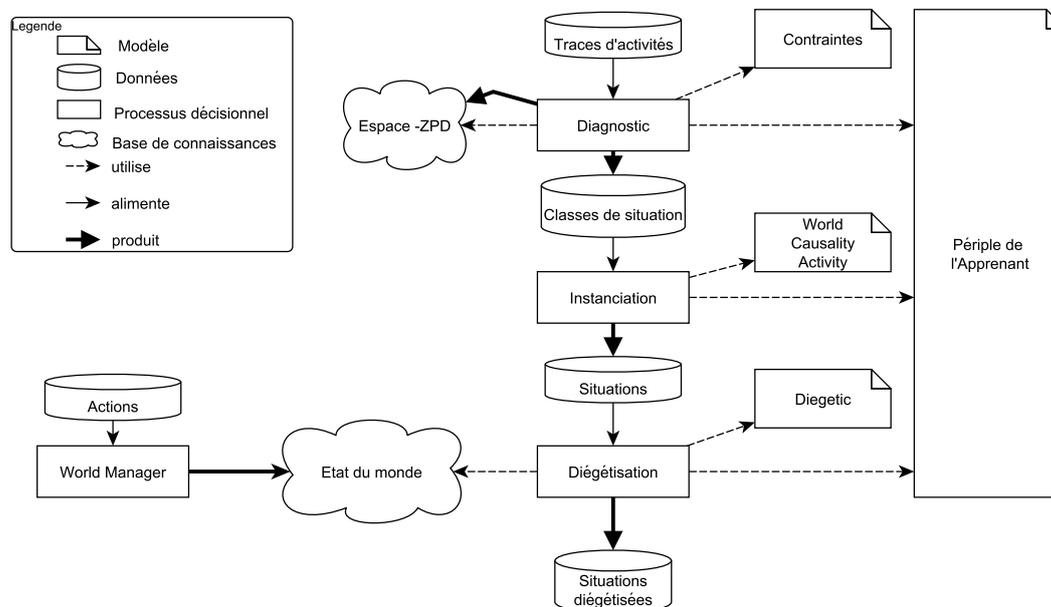


FIGURE 5.3 – TAILOR une mise en œuvre particulière de l'approche au sein de la plate HUMANS

5.2 Modèles pour la scénarisation personnalisée

Bien que de nombreux travaux tentent de s'affranchir de cette limite, il reste courant dans les dispositifs informatiques pour l'apprentissage que la tâche de modélisation des contenus soit faite par l'informaticien. En général, celui-ci dispose d'un corpus de documents ou il collabore avec un expert pour transcrire les connaissances élicitées en des termes informatiques.

Une telle méthodologie pose de nombreux problèmes. En premier lieu, l'expert et l'informaticien usent de référentiels et de vocabulaire différents. Ceci entraîne des défauts dans la compréhension par l'informaticien qui nuisent à la fidélité du modèle par rapport aux descriptions de l'expert. Notamment l'informaticien pourra faire des contresens, des raccourcis ou des approximations. En outre, les modèles que les informaticiens utilisent sont des modèles informatiques dans lesquels il est difficile de renseigner certains types de connaissances. Notamment, ce type de modèle est mal adapté à la prise en compte des facteurs humains (description de l'activité humaine par exemple). En plus des problèmes liés à la conception du système, il en résulte également des problèmes liés à son exploitation. Si l'intervention (coûteuse) d'un concepteur est indispensable pour maintenir ou faire évoluer le dispositif, celui-ci sera rapidement rendu obsolète et inutilisé.

Afin d'éviter cet écueil, nous proposons de faire décrire les modèles par les experts compétents dans les disciplines concernées. En plus d'assurer la **maintenabilité**, cette méthode rend possible le partage des ressources et donc la **réutilisabilité** des contenus au sein d'une communauté de pratique.

5.2.1 Modèle du domaine

Les connaissances sur le domaine sont de plusieurs ordres. Dans les environnements virtuels pour la formation, la littérature distingue généralement les connaissances liées à la description du monde et les connaissances liées à l'activité. Nous reprenons cette distinction, mais nous pensons qu'il est également utile d'adjoindre un modèle de la causalité. En effet, on pourrait déduire les chaînes causales du fonctionnement du monde mais celles-ci ne contiendraient aucune connaissance sur leur impact par rapport à l'apprentissage. Dès lors, il serait impossible de distinguer quels événements de la chaîne de causalité sont réellement pertinents pour une application donnée. Or, en distinguant le modèle de causalité du modèle du monde, on rend possible la mise à disposition d'une vue supplémentaire sur le déroulement des situations. Notamment, il devient possible de proposer des modèles de causalité différents liés à un seul modèle du monde. On pourra par exemple, pour un même modèle du monde lié à un site à haut-risque, avoir un modèle de causalité portant sur les cascades d'accidents pour former des opérateurs à la maîtrise des risques mais également un modèle de causalité portant sur la santé physique et psychologique des opérateurs pour former la médecine du travail sur ces sites.

Modèle du monde

Le modèle du monde vise à modéliser les connaissances sur le contexte au centre des apprentissages. Il s'agit de décrire à la fois les entités qui composent le monde, les relations qu'elles entretiennent, mais également les comportements qui régissent l'évolution de ces entités. Le modèle du monde doit permettre d'informer des différentes possibilités d'action de l'utilisateur ou d'entités autonomes sur les objets, les conditions dans lesquelles elles sont possibles, de même que les effets qu'elles provoquent.

Exemple.

Un modèle du monde doit notamment permettre de décrire les connaissances suivantes.

Une barque d'avion peut être constituée d'un matériau composite ou d'un alliage. L'action "percer" permet de créer un trou sur la barque si la perceuse est reliée à l'arrivée d'air. Un trou est une entité qui dispose d'une taille et d'une qualité.

Les propositions de l'état de l'art ne correspondent pas à nos exigences (pas suffisamment expressives ou pas suffisamment intelligibles et interprétables à la fois). Afin de combler le manque d'un modèle du monde répondant à nos objectifs, nous avons proposé le métamodèle WORLD-DL. Celui-ci repose sur une représentation des connaissances sur le monde couplée à des règles de fonctionnement.

Les modèles issus du langage WORLD-DL permettent de décrire des objectifs scénaristiques explicites sous la forme de situations qui peut donc se représenter sous la forme d'un graphe (voir figure 5.4). Le modèle est opérationnalisé pour maintenir la base de faits de l'état du monde. Les règles de fonctionnement permettent de mettre à jour l'état du monde en fonction de comportements autonomes ou des actions réalisées par les utilisateurs.

La conception de la scène dans un environnement virtuel est un travail de *level designer*. Les outils d'édition de contenu pour les moteurs de jeu, aussi accessibles soient-ils, requièrent un minimum de notions sur la manipulation et le fonctionnement d'un moteur de rendu. Afin d'affranchir le formateur de cette difficulté qui l'empêche de reconcevoir des scénarios à partir d'applications existantes, nous proposons de faire en sorte que l'environnement virtuel puisse être initialisé à partir d'une instance particulière de modèle du monde.

Pour rendre cela possible, nous proposons de faire reposer la simulation sur la base de faits sous-tendue par le modèle du monde. En modifiant cette base grâce à des outils d'édition, le formateur peut facilement initialiser des environnements à des fins pédagogiques particulières. En outre, en temps réel cette base est maintenue et synchronisée avec le moteur de rendu pour permettre l'exécu-

tion de l'environnement. Le formateur peut donc, en plus, influencer sur le déroulement de la simulation en interagissant avec cette base de faits.

Le métamodèle WORLD-DL et le moteur d'exécution, WORLDMANAGER, constituent une contribution majeure décrite en détail dans le chapitre 6.

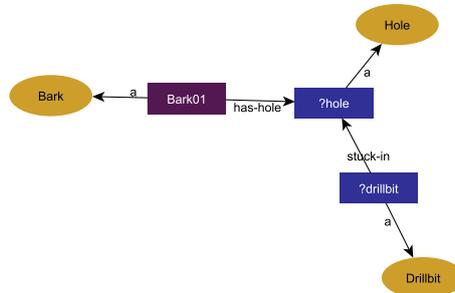


FIGURE 5.4 – Graphe de situation

Modèle de l'activité

L'activité est la mise en œuvre d'une procédure ou d'un ensemble d'actions en contexte réel. La modélisation de l'activité vise à décrire l'observation de cette activité et est réalisée, en général, par des ergonomes experts des sciences du travail.

À partir d'observations sur le terrain, d'entretiens avec les opérateurs et d'analyses de documents, les analystes décrivent les tâches, leur enchaînement, les conditions dans lesquelles elles doivent être réalisées ainsi que leurs conditions d'échec ou de réussite.

L'activité se distingue de la procédure prescrite en ce qu'elle intègre également les comportements non nominaux mais qui sont malgré tout observables en contexte réel. Ainsi, l'activité permet également de décrire les écarts à la procédure s'illustrant par des arrangements ou des violations. Ces écarts nécessitent d'être caractérisés pour préciser dans quelles conditions ces comportements sont tolérables.

Exemple.

Un modèle d'activité doit notamment permettre de représenter les connaissances suivantes :

Pour percer un trou de 3.2mm dans un alliage, il faut assembler un foret de la taille adéquate sur le bloc moteur. Ensuite, il faut ajouter une équerre sur le foret pour assurer la bonne perpendicularité du trou dans la matière. Le port des gants est préférable. Le port des lunettes est obligatoire.

Dans le contexte des domaines d'apprentissage que nous abordons, toutes ces informations sont indispensables pour scénariser des situations d'apprentissage pertinentes et valides écologiquement. Or, aucun des formalismes étudiés ne permet d'atteindre ce niveau d'expressivité tout en étant utilisable directement par des moteurs décisionnels à des fins de scénarisation. Nous avons donc fait le choix de nous appuyer sur le formalisme ACTIVITY-DL qui a été développé en parallèle des travaux de cette thèse.

Ce formalisme est fortement inspiré des langages de modélisation ergonomiques. Il repose sur une représentation des tâches sous la forme d'arbre. Les tâches abstraites sont des compositions de sous-tâches sur plusieurs niveaux. Au niveau le plus bas, les feuilles de l'arbre correspondent aux actions effectives réalisées par les opérateurs, et donc réalisables dans l'environnement. Celles-ci sont directement liées aux actions décrites dans le modèle du monde décrit en WORLD-DL. Des constructeurs permettent de préciser les relations entre plusieurs tâches. Il peut s'agir de structurer les tâches de façon **logique** grâce à des **portes logiques**, ou **temporelle** grâce à des **relations d'Allen** [Allen, 1983].

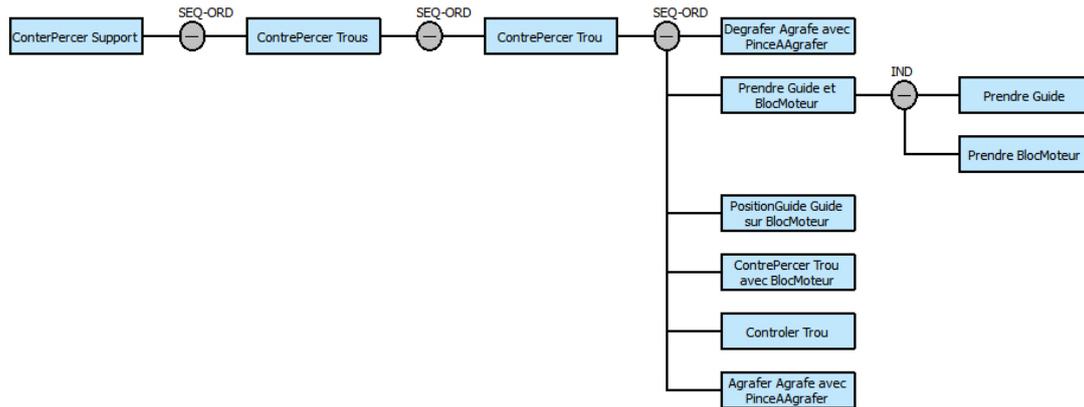


FIGURE 5.5 – Fragment d'un modèle d'activité

Ce formalisme rend possible la représentation graphique de modèles de tâches. De fait, il est plus aisé pour des ergonomes de s'approprier ce modèle et de décrire des **arbres d'activités**. Bien que nos travaux aient contribué à la définition de ce formalisme, celui-ci ne constitue pas l'une de nos contributions. Les propositions sur le métamodèle ACTIVITY-DL sont décrites dans les mémoires de Margaux Lhomme [Lhomme, 2012] et Camille Barot [Barot, 2014]. Une description plus détaillée du langage est proposée dans la section 8.2.1.

Modèle de causalité

Un modèle de causalité informe des **chaines d'événements signifiants** dans le domaine considéré par l'environnement virtuel. Un tel modèle nécessite d'informer les liens de cause à effet entre événements, que ceux-ci soient positifs — un événement engendre la réalisation d'un autre événement — ou négatifs — un événement inhibe l'occurrence d'un autre événement. Pour une plus grande expressivité indispensable à l'effort de scénarisation, un modèle de causalité doit également représenter les liens de subsomption entre des événements.

Exemple.

Le modèle de causalité doit notamment permettre de représenter les éléments suivants : *une fuite de matière par le dôme et une fuite de valve sont toutes deux des sortes de fuite. Lorsqu'une fuite survient en même temps qu'une source d'ignition (étincelle électrique, mégot de cigarette incandescent), il peut survenir un feu.*

Pour permettre la représentation de ces connaissances, nous avons opté pour le formalisme CAUSALITY-DL. Celui-ci est fortement inspiré des représentations utilisées en analyse de risques. Il constitue une évolution logique des travaux de l'équipe [Camus, 2010, Amokrane et al., 2008].

La représentation repose sur un graphe dans lequel les nœuds sont des événements faisant référence au modèle du monde décrit dans WORLD-DL. Ils sont reliés entre eux par des liens de subsomptions ou de causalité.

Les relations de causalité sont riches. Elles peuvent se faire via des portes logiques pour indiquer des conjonctions ou des disjonctions d'événements. La causalité peut être conditionnée par la **levée d'une barrière**, c'est-à-dire la terminaison d'un événement particulier.

Bien que nous ayons participé à l'élaboration de ce formalisme, il ne constitue pas une contribution dans le cadre de ce mémoire. Nous décrivons ce modèle dans la section 8.2.2. La spécification complète du formalisme a été réalisée par Camille Barot [Barot, 2014].

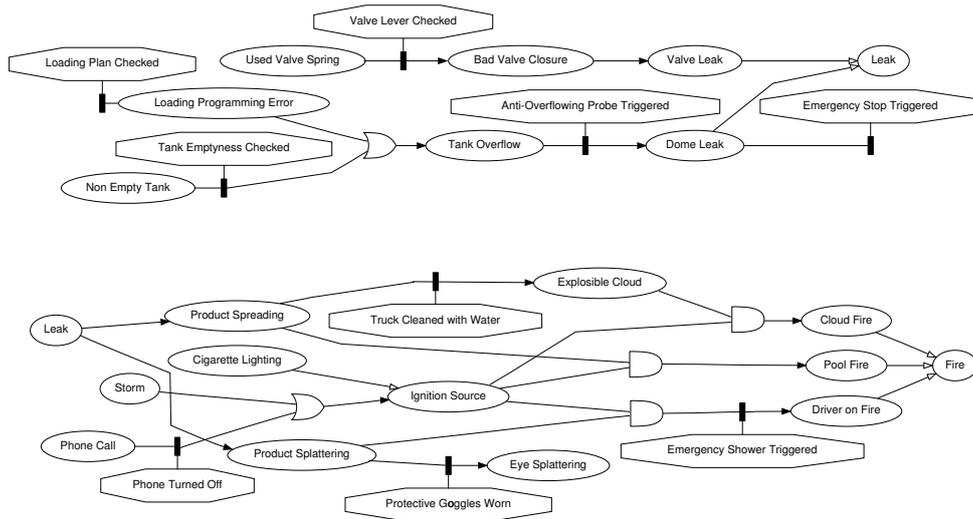


FIGURE 5.6 – Graphe de causalité [Barot, 2014]

5.2.2 Profil de l'apprenant

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, il y a une contradiction entre la modélisation de l'état de connaissance de l'apprenant et le cadre constructiviste. Certains auteurs proposent de concentrer l'effort de modélisation sur les situations. En outre, les modèles cherchant à rendre compte de la connaissance de l'apprenant nécessitent un travail considérable d'analyse et d'élicitation incompatible avec notre objectif de facilitation de la production d'un environnement informatique pour l'apprentissage humain.

Ainsi, afin de contourner ce problème, nous proposons de modéliser la zone proximale de développement non pas par les connaissances qu'elle incorpore, mais par les situations qui mettent en jeu ces connaissances sans pour autant reposer sur une élicitation de celles-ci. Il est impossible d'évaluer informatiquement avec certitude la capacité d'un apprenant à gérer une situation donnée, qui plus est si celle-ci n'a pas été rencontrée. Pour résoudre ce problème, un modèle d'incertitude permet d'évaluer la capacité de l'apprenant quant à la gestion de situations qu'il n'a pas rencontrées à partir de sources d'informations sur sa capacité à gérer des situations qu'il a rencontrées antérieurement. La figure 5.7 illustre la représentation de la Zone Proximale de Développement (ZPD), la Zone de Développement Actuel (ZDA) ainsi que les conceptions erronées au travers d'un espace de classes de situations dans le domaine de la formation des assistantes de vie. Les différentes situations que l'apprenant peut rencontrer peuvent être caractérisées par l'importance relative de la prise en compte des *caractéristiques de l'enfant* et de la connaissance des *pratiques sécuritaires*.

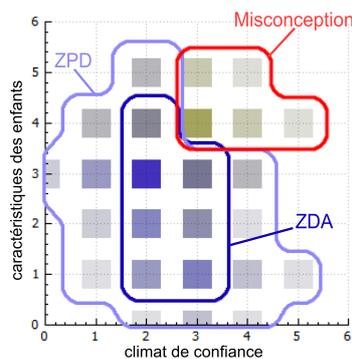


FIGURE 5.7 – Exemple de profil de l'apprenant

Nos travaux sur la définition d'un profil de l'apprenant et sur les processus de prise de décision sur ce profil font l'objet d'une contribution décrite dans le chapitre 7.

5.2.3 Modèle pédagogique

Tout comme dans un STI, le modèle pédagogique contient les éléments nécessaires à la prise d'une décision au regard du profil de l'apprenant. Dans notre contexte de scénarisation personnalisée, ce modèle contient les règles de sélection pour les prochaines situations à mettre en œuvre, ou au contraire à éviter, ce qui permet de borner l'espace de scénarios pertinent du point de vue de l'apprentissage. Ces règles sont dissociées du modèle de domaine mais elles sont en revanche intimement liées au modèle de l'apprenant. Elles peuvent être décrites et fixées par des experts pédagogues puis adaptées par les formateurs au cours de l'exploitation du dispositif.

5.2.4 Modèle diégétique

Le modèle diégétique vise à offrir des modèles de création d'histoire. Il se constitue d'une grammaire permettant de générer des enchaînements de situations particuliers porteurs de sens et/ou d'effet dramatique. Le modèle diégétique est lui aussi indépendant du contexte et doit être informé par des experts en storytelling tels que des auteurs ou des scénaristes.

Exemple.

Un modèle diégétique doit notamment permettre la modélisation des connaissances suivantes : *une trahison est une situation survenant lorsqu'un personnage qui était jusqu'alors un allié du personnage principal réalise une action allant contre celui-ci.*

Nous avons proposé le métamodèle ontologique DIEGETIC pour décrire des enchaînements de motifs narratifs à partir d'entités de la diégèse. Celui-ci est fortement inspiré par la structure proposée par Brémond [Brémond, 1973]. Nos contributions sur le métamodèle DIEGETIC seront décrites en détail dans le chapitre 9.

Les différents modèles présentés ici servent de bases de connaissances à des processus décisionnels pour réaliser la scénarisation. Ces processus seront décrits dans la section suivante de ce chapitre.

5.3 Processus décisionnels pour la scénarisation

Nous proposons un processus décisionnel découpé en trois étapes clés. Tout d'abord, la prise en compte des caractéristiques de l'apprenant pour personnaliser le scénario se fait par un **diagnostic** de celui-ci. Ce processus vise à produire des contraintes sur la situation à générer. Ensuite, une **fonction de transformation** permet d'instancier les contraintes pédagogiques sur une situation à mettre en œuvre. Enfin, le processus de **diégétisation** applique des transformations aux situations générés pour qu'elles correspondent à des critères narratifs. Cette dernière transformation est nécessairement conservatrice des propriétés pédagogiques.

5.3.1 Diagnostic

La mise en place d'une scénarisation personnalisée nécessite de prendre en compte le profil de l'apprenant pour établir des prescriptions pédagogiques. Cependant, ces prescriptions doivent également prendre en compte une certaine stratégie d'apprentissage qui est supposée favoriser l'acqui-

tion des connaissances. Une stratégie d'apprentissage va par exemple déterminer l'ordre dans lequel les types de situations doivent être rencontrés mais également comment la difficulté doit être modulée pour maintenir la motivation de l'apprenant. Ainsi, un ensemble de règles pédagogiques permet d'analyser le profil de l'apprenant pour en établir un diagnostic : une prise de décision quant aux actions pédagogiques à entreprendre. Celui-ci peut se faire par rapport à la situation en cours pour déterminer si la situation doit être adaptée ou non. Le diagnostic a également une visée prescriptive, c'est-à-dire qu'il permet la définition de contraintes pédagogiques à appliquer pour étendre l'état de connaissance de l'apprenant. Ces contraintes sont de deux ordres : viser à la production d'un type de situation particulière ou, au contraire, inhiber l'occurrence d'un type de situation.

Nous avons proposé un modèle de diagnostic en lien avec le modèle de l'apprenant. Celui-ci repose sur des règles permettant d'étendre l'état de connaissance de l'apprenant en se référant à sa zone proximale de développement. Il vise à produire des classes de situations dont les instanciations seraient pertinentes pour l'apprentissage. Le profil de l'apprenant constitue donc un grand espace de recherche dans lequel il s'agit de déterminer la meilleure classe de situations au regard des règles pédagogiques. La définition des règles pédagogiques peut constituer elle-même un problème car elle n'est pas toujours possible. Nous proposons donc dans l'architecture TAILOR un modèle de sélection *a minima* visant à étendre la zone proximale de développement de l'apprenant. Cependant, si des règles pédagogiques sont disponibles (dans le cas de la formation initiale par exemple), il est plus pertinent de les utiliser. Celles-ci pourraient notamment être extraites à partir d'une description globale des unités d'apprentissage au travers d'un langage de modélisation pédagogique [Koper and Olivier, 2003].

Afin de permettre une prise de décision qui reste pertinente dans les délais adéquats, nous avons proposé de modéliser le problème de décision comme un problème de satisfaction de contraintes dont une solution satisfaisante est déterminée par une métaheuristique. Ces propositions sont également décrites dans le chapitre 7.

Dans notre exemple de formation des assistantes de vie, le diagnostic a établi que la classe de situation S_1 était à favoriser alors qu'au contraire, la classe de situation S_2 était à éviter (voir figure 5.8). La situation à mettre en œuvre par la scénarisation requiert donc de faire dérouler à l'apprenant une activité évaluée à 4 et 3 respectivement sur les échelles de *climat de confiance* et de *caractéristiques des enfants*. Ici, le raisonnement sur des descripteurs relativement généraux permet d'obtenir des classes de situations qui seront instanciées selon les possibilités offertes par l'état du monde, tout en étant pertinent du point de vue pédagogique.

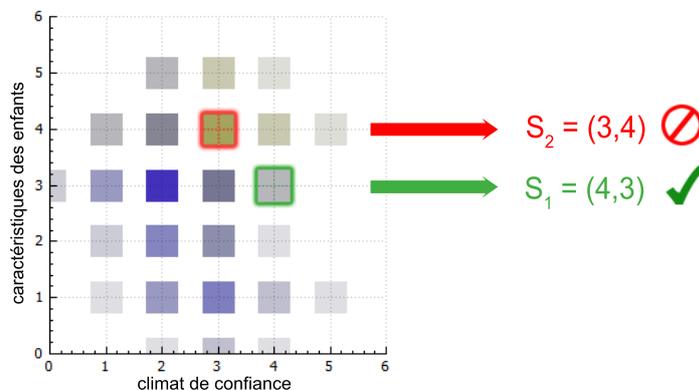


FIGURE 5.8 – Exemple de diagnostic pour la sélection de classes de situations

5.3.2 Fonction de transformation

Le diagnostic établit des préconisations pédagogiques qui ne sont pas directement utilisables par un moteur de contrôle du scénario. Elles requièrent d'être transformées en **objectifs scénaristiques**, c'est-à-dire, en un état du monde vers lequel la situation doit tendre.

Pour cela, une **fonction de transformation** est requise. Elle définit l'opération permettant d'obtenir les objectifs scénaristiques, c'est-à-dire les éléments minimaux constitutifs de la situation d'apprentissage, à partir des contraintes déterminées dans l'étape de diagnostic.

Une fonction de transformation simple faisant une association entre des contraintes pédagogiques issues du diagnostic et des objectifs scénaristiques permettrait effectivement une scénarisation personnalisée. Cependant, l'écriture des associations concentre un effort de création incompatible avec nos objectifs, il est donc nécessaire de disposer en plus d'un moyen de générer des situations sans qu'elles aient été élicitées. Nous proposons donc que la fonction de transformation s'appuie sur les modèles de connaissances sur le domaine pour générer procéduralement les objectifs scénaristiques. Dans le cadre de l'architecture TAILOR, les préconisations pédagogiques sont des classes de situations, la fonction de transformation est donc, ici, une **fonction d'instanciation**. Celle-ci crée des **instances de classes de situations**. Nos propositions à ce sujet seront détaillées dans le chapitre 8.

Dans notre exemple, la classe de situation $S_1(4, 3)$ pourra être instanciée de différentes manières grâce aux modèles de domaine à disposition. Deux propositions d'instanciation sont illustrées dans la figure 5.9. Il s'agit de deux situations demandant à l'apprenant de prendre en considérations les problèmes des enfants, dans la situation s_A , un enfant a perdu son "doudou", et dans la situation s_B l'un des enfants a fait un cauchemar.

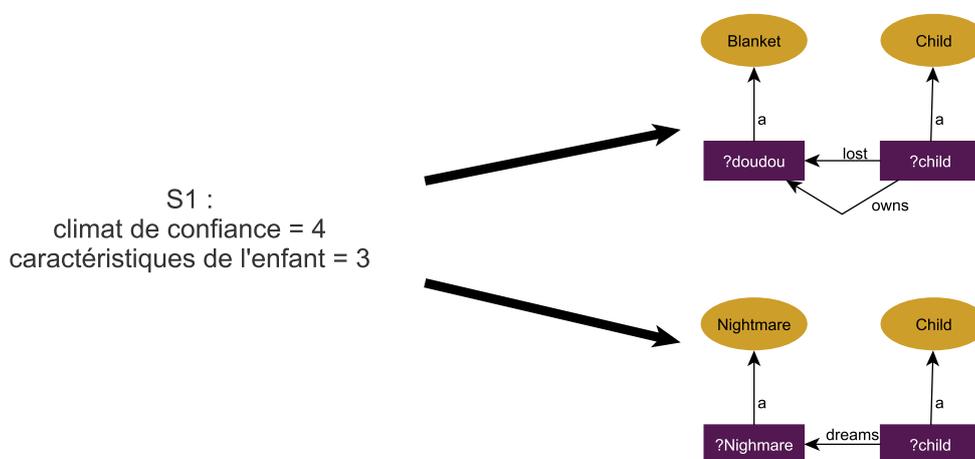


FIGURE 5.9 – Instanciation d'une classe de situation

5.3.3 La diégétisation

La transformation des contraintes pédagogiques se fait sans considération de l'intérêt narratif afin d'assurer la qualité pédagogique. Cependant, pour que l'enchaînement des situations d'apprentissage constitue un tout sur le plan du récit, il convient de s'assurer que les différents éléments intervenant dans ces situations s'insèrent en cohérence avec une **diégèse**. A cette fin, nous proposons un processus de **diégétisation automatique**. D'après [Odin, 2000], la diégétisation est le processus par lequel un auteur, au fur et à mesure de son processus créatif, fabrique un univers auquel se rattache l'histoire.

Etant donné que le contexte de la simulation autonome ne permet pas la pré-construction d'une histoire de bout en bout, nous proposons un processus d'enrichissement graduel de l'univers de la fiction en conformité avec un modèle diégétique. Pour cela, le processus réalise une reconnaissance des histoires se déroulant de manière autonome dans la simulation et enrichit les situations pédagogiques d'éléments qui permettent de conforter ces histoires.

Dans notre exemple, la situation s_A décrite dans la section précédente peut être diégétisée tel qu'illustré dans la figure 5.10. Tout d'abord, les éléments restés indéfinis dans l'étape précédente ont été précisés : c'est *Violet* qui a perdu son *Doudou*. Afin d'ajouter de la tension dramatique, la situation a été enrichie pour correspondre à une situation d'*enlèvement* : le *doudou* a été kidnappé par *Klaus*, le frère de *Violet*!

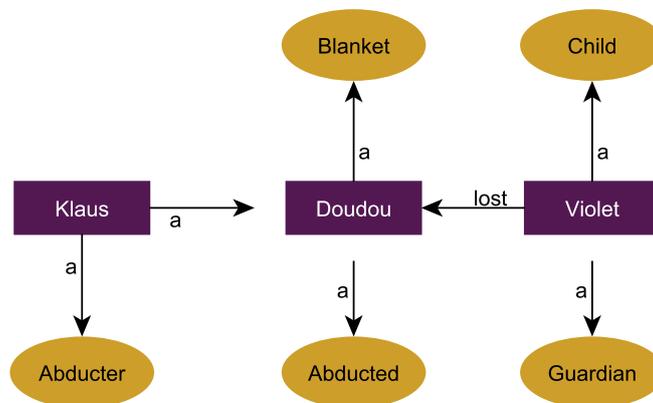


FIGURE 5.10 – Diégétisation d'une situation

Dans l'approche que nous privilégions, nous avons choisi de distinguer les considérations pédagogiques et les considérations narratives. Ainsi, ces éléments sont informés dans des modèles différents, mais ils sont également mis en œuvre par des processus distincts. Nous expliquons ce choix par les raisons suivantes. D'une part, nous avons opté pour la pré-éminence des aspects pédagogiques par rapport aux aspects narratifs. Dès lors, les aspects narratifs ne peuvent être mis en jeu qu'à partir du moment où la situation pédagogique est définie. D'autre part, cette séparation participe à la **modularité** de l'approche. La génération de situations pédagogiques peut être utilisée sans étape de diégétisation, et le processus de diégétisation peut s'opérer sur des situations pédagogiques générées autrement que par le processus que nous avons décrit.

La génération d'un scénario personnalisé repose sur deux processus complémentaires :

- la prescription d'objectifs scénaristiques vers lesquels la simulation doit tendre à moyen terme ;
- l'adaptation des conditions de la simulation à court terme.

Ces deux processus relèvent en fait d'un même processus global de scénarisation qui ne diffère que par l'échelle à laquelle il s'applique. Ce méta-processus supervise les étapes que nous venons de décrire.

5.3.4 Contrôle local pour l'émergence d'une organisation globale

Pour disposer d'un contrôle fin, que ce soit sur le plan de l'apprentissage, et aussi sur le plan narratif, il est important d'offrir des moyens de contrôle sur différentes strates de personnalisation. L'objectif principal est de fournir du contenu adapté à l'apprenant à tout moment, mais également de

gérer quand ce contenu doit être présenté et sous quelles formes pour maintenir le *flow*. Dans notre état de l'art, nous avons identifié trois niveaux que nous reprenons ici.

Niveau microscénaristique - la situation

Le niveau microscénaristique est celui de la situation en cours. L'adaptation à ce niveau peut se faire par une **modulation des effets** des actions de l'apprenant (exemple : *déclenchement d'une fuite de matière systématique*) ou par une amélioration/dégradation de la situation globale (co-activité, distraction, pression temporelle).

Dans notre approche, nous avons défini une situation comme étant **un état du monde défini partiellement**. Celui-ci se décrit donc sous la forme d'**assertions** sur le monde que l'on peut représenter en utilisant le modèle du monde. Ayant adopté une posture ontologique, un état du monde peut être représenté par un graphe respectant le formalisme du modèle du monde.

L'adaptation des situations consiste à assurer que le niveau de difficulté prévue pour la situation en cours est équivalent au niveau de difficulté perçue par l'apprenant. Les niveaux de difficultés prévues sont fixés au niveau scénaristique supérieur.

Niveau mésoscénaristique - l'épisode

Le niveau mésoscénaristique correspond à une session d'utilisation de l'environnement virtuel. Au cours de cette session, l'utilisateur sera amené à rencontrer différentes situations d'apprentissage. La prescription de ces situations constitue le **canevas**, alors que le scénario effectif qui en découle, composé à la fois des situations rencontrées prescrites ou non, et des événements autonomes de la simulation est **l'épisode**.

L'adaptation au niveau mésoscénaristique consiste à déterminer des contraintes sur la prise de décision quant aux types de situations à faire rencontrer et à leur enchaînement. En outre, le niveau mésoscénaristique pilote le contexte de la session par des **objectifs implicites** qui bornent l'intensité relative des événements annexes.

Niveau macrosécénaristique - le parcours

Au niveau le plus global, la modélisation macrosécénaristique vise à produire un **parcours** particulier de l'apprenant au travers de son utilisation de l'environnement virtuel. Un parcours définit des contraintes pour le niveau inférieur, le niveau mésoscénaristique. Il détermine notamment des niveaux de difficulté ainsi que des contraintes tant sur le plan de l'apprentissage (ordre dans lequel les classes de situations doivent être rencontrées), que sur le plan diégétique (conservation du rôle d'un personnage sur toute la durée d'utilisation du dispositif). Par ailleurs, le contrôle opéré au niveau macrosécénaristique permet d'initialiser automatiquement le contenu des sessions de formation en accord avec les objectifs d'apprentissage.

Les différents processus décisionnels que nous avons présenté sont des processus dynamiques qui prennent place au cours du déroulement de la simulation. Leur action est locale : ils permettent l'adaptation de la situation en cours ou la génération de la situation suivante. Nous proposons de rendre effective une structure mesoscénaristique et une structure macrosécénaristique en contrôlant uniquement les contraintes liées à la prise de décision au niveau microscénaristique. Notre proposition est d'utiliser un modèle adapté du **Périple du Héros** [Campbell, 2008], pour définir un **modèle de progression multiniveaux** pilotant les différents niveaux scénaristiques. Le périple du héros est un modèle de scénario qui se retrouve aussi bien dans la littérature, le cinéma que dans le jeu vidéo. Il définit un parcours initiatique pour le héros d'une œuvre au travers d'un certain nombre d'étapes clairement définies. De par son emphase sur la quête initiatique du héros, ce modèle s'adapte très

bien à l'apprentissage. La description du modèle du Périple du Héros et son adaptation sous la forme du **Périple de l'Apprenant** ne seront pas présentés dans le cadre de cette thèse. Par ailleurs, il est tout à fait possible d'envisager d'autres modèles de progression adaptés à des stratégies d'apprentissages différentes.

5.4 La place du formateur

Nous proposons ici une approche de scénarisation personnalisée reposant sur la génération itérative de situations d'apprentissage à partir de modèles de connaissances. Pour autant, nous pensons que le formateur doit être pleinement intégré au dispositif. Il peut pour cela intervenir à différentes phases dans le cycle de vie de l'environnement.

Tout d'abord, concernant la phase de conception, il est tout à fait envisageable d'inclure le formateur dans le processus de recueil de données sur le domaine. En effet, celui-ci a un regard particulier sur l'activité qui peut être enrichissant. Son expérience lui permet de faire comprendre aux analystes les origines des adaptations que les opérateurs font par rapport au plan nominal.

Lors de la phase d'adaptation du dispositif à un contexte particulier, le formateur peut concevoir des parcours pédagogiques de manière plus ou moins précise. Il peut en premier lieu agir sur **le modèle pédagogique**. Il peut agir plus précisément en concevant **des situations d'apprentissages particulières** qui pourraient être intégrées automatiquement dans les objectifs scénaristiques. Il peut également décrire des scénarios complets pour une session. Le processus décisionnel sera alors limité à la diégétisation du contenu.

Le formateur peut également intervenir pendant l'utilisation du dispositif par un apprenant. Grâce à un outil de suivi de l'apprenant [Amokrane, 2010], le formateur peut observer le déroulement des sessions, mais il peut également intervenir, soit en envoyant une prescription, qui sera prise en compte par le moteur de scénarisation, soit en déclenchant directement des événements. En outre, dans une démarche d'apprentissage expérientielle, il est souhaitable que les formateurs participent activement à un bilan de session avec les apprenants.

Le formateur peut également intervenir sur le diagnostic des apprenants en donnant des informations sur la capacité des apprenants à réaliser certaines tâches. Ces informations peuvent être issues d'observations personnelles, de résultats d'évaluation, ou de statistiques.

5.5 Intégration dans HUMANS

Les travaux que nous présentons ici participent à l'élaboration et à l'évolution de la plateforme logicielle HUMANS. Celle-ci vise à fournir des outils pour la création et l'exploitation d'environnement virtuel de formation encourageant l'apprentissage par la pratique.

Les langages que nous avons décrits dans la section 5.2.1 regroupés sous le formalisme HUMANS-DL constituent la clé de voute de la plateforme. Ils sont renseignés par des experts suite à des analyses sur le terrain (analyses ergonomiques, analyses de risques). Ils intègrent à la fois les connaissances liées au fonctionnement nominal du système sociotechnique considéré, mais également les connaissances liées au fonctionnement observé en contexte réel.

Des moteurs s'articulent autour des modèles du domaine pour réaliser l'exécution et l'adaptation de l'environnement virtuel à des fins de formation.

Le WORLDMANAGER opérationnalise le modèle du monde décrit en WORLD-DL pour maintenir la

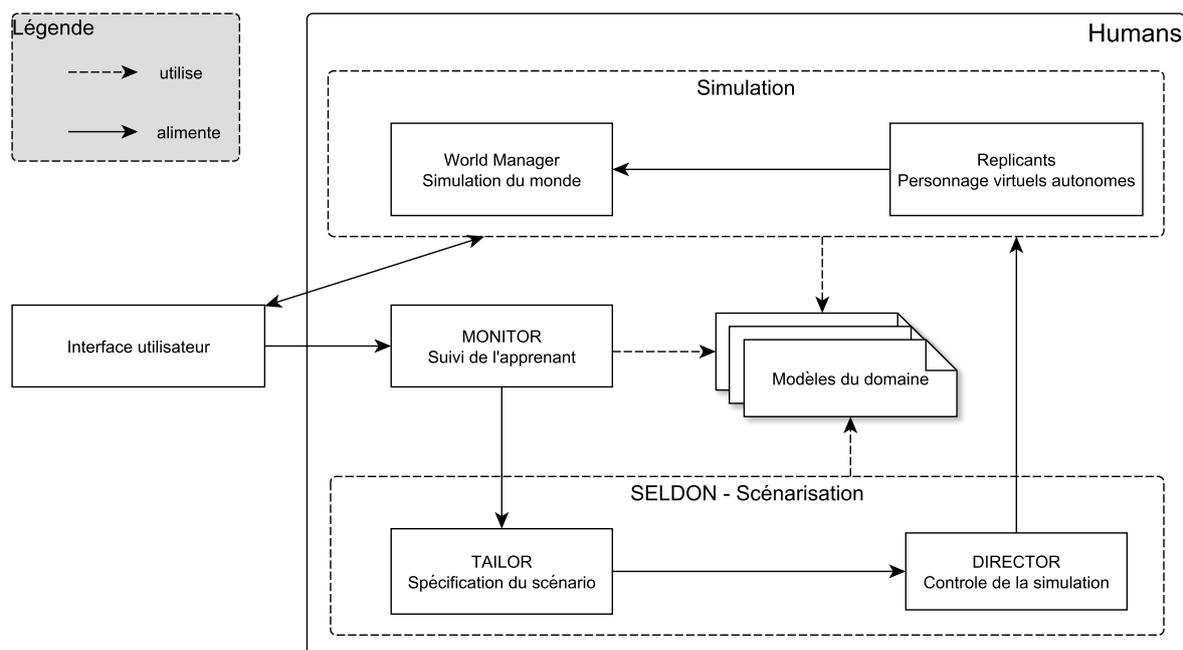


FIGURE 5.11 – Architecture de la plateforme HUMANS

base de faits sur le monde. En outre, il prend en compte les demandes d'action, ou les événements physiques, pour mettre à jour l'état du monde en fonction des règles de fonctionnement. Ce module offre également une interface pour permettre aux autres moteurs décisionnels d'obtenir des informations sur le modèle du monde ou sur son état courant.

Le module des REPLICANTS [Lhomme, 2012] utilise un modèle de personnalité pour générer des comportements pour des personnages virtuels autonomes à partir d'un arbre d'activité décrit dans le formalisme ACTIVITY-DL. Les personnages agissent sur le monde par l'intermédiaire du WORLDMANAGER. Les comportements générés sont représentatifs des comportements observés en situations réelles : en plus d'exécuter les procédures, les PVA expriment des émotions et entretiennent des relations sociales. Ils peuvent faire des erreurs, des compromis et réagir aux émotions des autres PVA.

Les interactions de l'utilisateur avec l'environnement sont transcrites en action pour être traitées par le WORLDMANAGER et mettre à jour l'état du monde en conséquence. Celles-ci sont également enregistrées par le moteur de suivi de l'apprenant, MONITOR [Amokrane, 2010], en utilisant le modèle d'activité comme modèle de référence. Il en résulte des **traces d'activité** qui informent de l'avancement de l'apprenant dans la tâche, mais également de ses déviations par rapport à celle-ci.

Le moteur SELDON (pour ScEnario and Learning situations adaptation through Dynamic Orchestration) réalise la scénarisation de l'environnement. A partir des traces d'activités issues du suivi de l'apprenant, il produit des opérateurs d'ajustement pour adapter le scénario à l'apprenant. Pour réaliser les deux étapes nécessaires à la scénarisation (la spécification et le contrôle), le module SELDON repose sur deux sous-modules :

- TAILOR, qui est l'application des travaux présentés dans ce mémoire, utilise les traces d'activités de l'apprenant et les modèles du domaine pour produire des objectifs scénaristiques ;
- DIRECTOR, qui est l'application des travaux de thèse de Camille Barot [Barot, 2014], utilise les objectifs scénaristiques et les modèles du domaine pour déterminer les opérateurs d'ajustement permettant la réalisation d'un plan entre l'état du monde courant et l'objectif scénaristique.

L'intérêt de l'approche HUMANS est d'assurer la **validité écologique** des scénarios créés, puisque ceux-ci reposent sur des modèles du domaine décrits par les experts, tout en assurant à la fois la liberté d'action de l'utilisateur, la cohérence des comportements et l'intérêt pédagogique.

5.6 Bilan

Nous avons proposé ici une approche de spécification de scénario pour la formation en environnement virtuel s'intégrant au sein de la plateforme HUMANS.

Celle-ci repose sur un ensemble de modèles de connaissances destinés à être informés par les experts appropriés. Les connaissances spécifiques au domaine d'application sont concentrées dans trois modèles : le modèle du monde décrit en WORLD-DL, le modèle de l'activité décrit en ACTIVITY-DL et le modèle de causalité décrit en CAUSALITY-DL. Des processus décisionnels **indépendants du domaine** utilisent les différents modèles pour spécifier un scénario pédagogique enrichi de considérations narratives. L'utilisation de modèles de connaissances propres à chaque type d'expert permet d'assurer la **maintenabilité** du système. En effet, il n'est plus nécessaire de faire appel au concepteur pour modifier des éléments de contenu.

Par ailleurs, les modèles de connaissances pour lesquels nous avons opté sont **modulaires**, il est possible de les combiner, ou de les utiliser en tout ou partie pour d'autres applications. En outre, ils utilisent des modes de représentation qui peuvent être appréhendés par des êtres humains pour décrire des organisations complexes. La combinaison de ces propriétés permet d'atteindre nos objectifs de **réutilisabilité**, de **maintenabilité** et de **passage à l'échelle**.

Le **contrôle pédagogique** est assuré par la spécification des situations en regard d'un modèle de l'apprenant et d'un modèle pédagogique. Cette spécification se faisant en raisonnant sur des modèles du domaine issus d'analyses réelles des contextes de travail, on rend possible la réalisation de scénario **valide écologiquement**. En outre, les modèles que nous utilisons sont explicites, et donc les enchaînements d'action et d'événements sont **interprétables**.

La scénarisation et l'exécution de la simulation sont complètement distincts. L'exécution de la simulation repose sur un modèle du monde qui indique l'ensemble des actions possibles sur un objet. On garantit à l'apprenant d'avoir toujours une large **liberté d'action**. Ses actions seront toujours prises en compte en respectant tout de même à la fois le **contrôle pédagogique** et la **validité écologique**.

La construction d'une histoire en superposition du scénario pédagogique reposant sur des modèles de fiction permet de susciter l'**intérêt** de l'utilisateur mais également d'augmenter la **variabilité** des scénarios. L'intérêt de l'utilisateur est également maintenu par le contrôle pédagogique et narratif sur plusieurs niveaux d'agrégation conçus pour favoriser l'état de *flow*.

Enfin les processus décisionnels en jeu sont dynamiques et opèrent pendant le temps de la simulation. On assure ainsi de pouvoir réorienter la simulation à tout moment en cas d'action allant à l'encontre des prescriptions ou en cas d'erreur de diagnostic des connaissances de l'apprenant.

Chapitre 6

Modèle du monde pour la simulation et la scénarisation d'un environnement virtuel

“ *Certain people have said that the world is like a calm pond, and that anytime a person does even the smallest thing, it is as if a stone has dropped into the pond, spreading circles of ripples further and further out, until the entire world has been changed by one tiny action.* ”
The Penultimate Perile, A Serie Of Unfortunate Events XIII, Lemony Snicket

Sommaire

6.1	Approche	96
6.1.1	Besoins	96
6.1.2	Propositions	97
6.2	WORLD-DL : un métamodèle de représentation des connaissances	98
6.2.1	Eléments de description fondamentaux	99
	Les Entités - Entity	99
	Les états - State	99
	Les composants - Component	100
6.2.2	Description statique	103
	Les objets - Object	103
	Les règles d'initialisation	103
6.2.3	Interactions	104
6.2.4	Description dynamique	105
	Les comportements - Behaviour	105
	Les événements - Event	106
6.2.5	Un mécanisme de résilience : le late commitment	108
6.3	WORLDMANAGER : moteur d'exécution du scénario	109
6.3.1	Saturation de la base de faits	110
	Exemple.	110
6.3.2	Exécution des actions	110
6.3.3	Exécution des comportements actifs	111
6.3.4	Exécution des événements	112
6.3.5	Application des règles d'intégrité	112
6.4	Bilan	112

L'approche que nous proposons repose sur des modèles de connaissances sur le domaine. L'un de ces modèles, le modèle du monde, a vocation à renseigner sur la structure et le fonctionnement du monde mais également à permettre l'exécution et le suivi de la simulation. Pour rendre possible cette modélisation, nous proposons le métamodèle WORLD-DL et le moteur d'exécution WORLDMANAGER. Ce métamodèle constitue en outre un formalisme de représentation d'objectifs scénaristiques explicites sous la forme d'assertions sur l'état du monde à atteindre.

6.1 Approche

6.1.1 Besoins

Nous avons identifié un certain nombre d'objectifs liés à la scénarisation ou à la production d'un environnement virtuel pour la formation. De ces objectifs généraux, nous avons déduit un ensemble de propriétés dont devrait disposer un modèle de domaine.

Étant donné que nous souhaitons faciliter la conception et l'évolutivité de l'EVAH en faisant participer activement les experts du domaine, les langages de modélisation doivent être **intelligibles** par l'humain. Cependant, étant donné qu'ils sont destinés à être utilisés par des moteurs décisionnels, ils doivent également être **interprétables**.

La réutilisabilité et la maintenabilité de l'environnement virtuel passent par la **modularité** de ses composants et notamment de ses modèles.

Cependant, ces objectifs sont d'autant plus difficiles à atteindre que nous nous situons dans le contexte de domaines complexes. Pour ces domaines, les représentations informatiques usuelles sont inopérantes : l'espace des états est tellement grand qu'il est quasiment impossible de le décrire et encore plus de l'opérationnaliser pour l'exécution d'un environnement virtuel. Il est donc nécessaire de fournir des modes de représentation spécifiquement adaptés à ce genre d'utilisation.

L'un de nos objectifs est également la **résilience** de la scénarisation, c'est-à-dire la capacité à produire du contenu personnalisé pertinent en dépit des actions des entités autonomes, ou de l'apprenant, allant à l'encontre du scénario.

Pour rendre compte de la complexité de certains domaines, un langage de modélisation du domaine doit offrir une large **expressivité** que ce soit sur le plan du **pouvoir descriptif** que sur le plan du **pouvoir d'abstraction**.

A partir des différents travaux menés par l'équipe en collaboration avec des ergonomes réalisant des analyses sur le terrain, nous avons identifié des besoins de représentation liés à l'organisation du monde, et des besoins de représentation liés à la dynamique du monde. Ces retours d'expériences concernaient des domaines très variés tels que la construction aéronautique, la prévention des risques sur les sites à Seveso, la gestion des situations de crise NRBC¹, les opérations de maintenance sur les sous-marins ou la formation des assistantes de vie.

En particulier, les besoins de représentation organisationnelle demandent de pouvoir décrire :

- **des objets en relations**, par exemple, *le forêt est attaché au bloc-moteur* ;
- **des fonctions sur des objets**, par exemple, *un forêt peut être attaché à un bloc-moteur* ;
- **des états sur les objets** qui peuvent être :
 - **fixes**, lorsque leur valeur n'évolue pas au cours du temps, par exemple *la taille du forêt est de 3,2mm*,
 - **évolutifs**, lorsque leur valeur est susceptible d'être modifiée au cours du temps, par exemple, *la porte est ouverte* ;
- **des liens sémantiques entre plusieurs états**, par exemple *une porte ayant un angle d'ouverture supérieur à 45° est considérée comme ouverte* ;

1. Nucléaire, Radiologique, Biologique et chimique

- **des entités intangibles**, par exemple un *retard de livraison*.

La dynamique du système permet de décrire comment évolue le système, elle doit notamment permettre de retranscrire :

- **des actions paramétrées** permettant de décrire un moyen d'intervention par un agent prenant en considération un ou plusieurs objets ou même des valeurs numériques. Exemple : les actions *insérer une clé dans une serrure* et *tourner un robinet d'un certain nombre de tours* ;
- **des conditions de faisabilité sur les actions** permettant de décrire dans quels cas une action a un sens. Exemple : l'action *ouvrir* sur une porte *fermée* est faisable alors que l'action *fermer* ne l'est pas, car le mouvement consistant à refermer la porte n'est pas physiquement faisable ;
- **des conditions de réalisation sur les actions** permettant de décrire dans quels cas une action produit un effet. Exemple : l'action *ouvrir* n'est réalisée que si la porte est *déverrouillée*, l'action d'ouvrir peut être faite, mais si la porte est verrouillée alors elle n'aura pas l'effet escompté ;
- **des effets des actions** permettant de décrire les modifications à apporter à l'état du monde après réalisation de l'action. Les effets peuvent porter sur des objets distincts des paramètres de l'action. Exemple : l'action *allumer* prend un *interrupteur* en paramètre, mais son effet porte sur *l'ampoule qui est reliée à l'interrupteur* ;
- **des comportements faisant évoluer un état en continu** comme le fait qu'une fuite fait perdre une certaine quantité de matière à chaque pas de temps ;
- **des comportements se déclenchant aléatoirement**, par exemple, un feu a une certaine probabilité de se propager à chaque pas de temps ;
- **des comportements s'activant automatiquement dans certaines conditions** : par exemple, le débordement d'une cuve lorsque la quantité de matière est supérieure à la capacité.

6.1.2 Propositions

A l'instar de [Chevaillier et al., 2009], nous distinguons trois types de connaissances nécessaires à la description d'un modèle de monde :

- les **connaissances statiques décrivant le monde**, c'est-à-dire les objets signifiants du monde, leurs états et leurs relations, que ceux-ci soient concrets ou abstraits ;
- les **possibilités d'interactions**, c'est-à-dire les actions réalisables par les agents, qu'il s'agisse d'utilisateurs ou de personnages virtuels autonomes. Les possibilités d'interactions sont à distinguer des **modalités d'interactions** qui concernent la manière dont agit l'utilisateur réel pour réaliser une action dans l'environnement virtuel (quel bouton appuyer, quel geste faire). La question des modalités d'interaction relève purement du domaine de la réalité virtuelle ou des Interactions Homme-Machine et n'est pas traitée en tant que telle dans nos recherches ;
- les **comportements**, qui définissent les changements d'états ou de relations entre les objets causés par le fonctionnement interne du monde ou par des actions.

Afin de représenter ces connaissances, nous proposons d'utiliser un modèle ontologique. [Gruber, 1993] définit une ontologie comme étant **la spécification explicite d'une conceptualisation**. Nous nous référerons à la définition plus complète et plus précise de [Uschold et al., 1996], traduit par [Charlet, 2002] :

“ Une ontologie implique ou comprend une certaine vue du monde par rapport à un domaine donné. Cette vue est souvent conçue comme un ensemble de concepts — e.g. entités, attributs, processus —, leurs définitions et leurs interrelations. On appelle cela une conceptualisation. [...] Une ontologie peut prendre différentes formes mais elle inclura nécessairement un vocabulaire de termes et une spécification de leur signification. [...] Une ontologie est une spécification rendant partiellement compte d'une conceptualisation. ”

[Noy and McGuinness, 2001] justifient l'emploi d'ontologie pour les raisons suivantes. En premier lieu, une ontologie permet de fédérer des vues issues d'experts différents dans un modèle commun

directement **interprétable** par la machine. Ensuite, un autre intérêt de l'utilisation des ontologies est de permettre la **réutilisabilité** des connaissances qu'elle incorpore à différents effets. Il est également possible d'utiliser des ontologies existantes comme des **bibliothèques** pour créer des modèles de plus en plus complexes.

En outre, une ontologie permet de faire la distinction entre les **connaissances structurelles** et les **connaissances opérationnelles**. Les connaissances structurelles sont générales et conceptuelles. Il s'agit notamment de décrire quelles propriétés les objets peuvent avoir, avec quels autres types d'objets ils peuvent être mis en relation, ou encore quelles actions peuvent être faites sur un type d'objet. Les connaissances opérationnellesinstancient les connaissances structurelles. Elles permettent donc de décrire des **objets particuliers** dotés de propriétés ayant des valeurs particulières, l'existence d'une relation effective entre deux objets, ou encore quelle action est en cours sur un objet particulier. Dans une ontologie, les connaissances structurelles sont à la fois **syntaxiques** et **sémantiques** : elles suffisent à la génération de contenus valides.

Cependant, l'inconvénient majeurs des représentations ontologiques est de n'être pas adaptées à la mise en œuvre des processus dynamiques. En effet, bien que disposant d'un grand pouvoir expressif, les ontologies décrivent un domaine et ne sont pas destinées à être *auto-modifiables*. Nous proposons d'associer à une ontologie un ensemble de règles de fonctionnement chargées de décrire les aspects dynamiques du système (temporalité, probabilité, causalité, etc.).

Les travaux de [Lugrin and Cavazza, 2006] ont montré l'intérêt de modéliser les fonctions des objets. Étayée par les propositions sur le *raisonnement fonctionnel* de [Bicici and Amant, 2003], cette approche vise à modéliser un objet en lui attribuant un certain nombre de fonctions. Par exemple, les clés sont des objets qui sont *transportables* et qui sont utilisés pour *ouvrir* des portes. Cette méthode permet de rendre l'approche très modulaire étant donné qu'il devient aisé de produire des bibliothèques de fonctions qui peuvent être réutilisées. La notion de raisonnement fonctionnel est similaire à la notion de **composant** en programmation informatique. Un composant est une entité qui encapsule un ensemble de fonctions et de données. L'approche par composant rend le travail d'élicitation des experts plus aisé puisqu'elle incite à une certaine analyse du monde centrée sur les fonctions et capacités des objets.

Pour satisfaire à notre objectif de résilience, il est nécessaire de maintenir l'espace des scénarios le plus ouvert possible. En d'autres termes, il faut faciliter le passage d'un état du monde vers un autre qui aura été déterminé tout en veillant à la cohérence du fonctionnement du monde. Cependant, si l'état du monde est explicitement et exhaustivement déterminé, il limite fortement les possibilités scénaristiques. Par exemple, si la *qualité d'un perçage* est déterminée à *bonne*, il est impossible de mettre en place des situations de contrôle qualité mettant en œuvre des perçages de mauvaise qualité. Nous proposons donc de mettre en place, au sein de la représentation du monde, un mécanisme de *late commitment* tel que proposé par [Barot, 2014]. Par ce mécanisme, l'état du monde n'est pas nécessairement complètement déterminé à l'initialisation. Celui-ci se détermine en fonction des besoins et des interactions de l'utilisateur avec le système. Ce mécanisme de résilience permet de maximiser la taille de l'espace des scénarios possibles tout en maintenant la cohérence du système.

6.2 WORLD-DL : un métamodèle de représentation des connaissances

Notre objectif est de permettre la conception, l'exécution et l'adaptation d'environnements virtuels pour la formation. Pour permettre une approche générique, il convient d'opter pour un langage de description permettant :

- l'écriture de contenu scénaristique ;
- l'exécution de ce contenu au sein d'une simulation ;
- la génération de contenu.

Nous proposons WORLD-DL, un métamodèle reposant sur une représentation ontologique. Sa syntaxe et sa sémantique s'appuient sur OWL-DL [Bechhofer et al., 2004] qui est un standard w3c pour la définition d'ontologies et facilite donc la réutilisation et le partage d'ontologies existantes. En outre, OWL-DL s'écrit grâce au langage RDF [Guha and Brickley, 2014], ce qui offre la possibilité d'interroger les modèles via le langage de requête SPARQL [Prud'hommeaux and Seaborne, 2008]. L'intérêt de OWL-DL est d'offrir un grand pouvoir d'expressivité avec des relations complexes entre les différents concepts et instances (cardinalité, disjonction, équivalence, etc.), tout en assurant la calculabilité des inférences.

La description de la dynamique du système est faite au travers de règles utilisant la syntaxe JENA [McBride, 2002] associée à l'ontologie.

Le modèle du monde a une composante structurelle, qui est le modèle créé lors de la conception de l'environnement virtuel, et une composante opérationnelle, qui est la base de faits correspondant à l'état de la simulation mise à jour grâce aux règles de fonctionnement. L'annexe C résume les différentes couches de modélisation mises en jeu dans l'utilisation du métamodèle WORLD-DL.

La manipulation d'une ontologie avec OWL nécessite d'identifier chaque ressource décrite par un nom unique. Pour cela, les classes du métamodèle WORLD-DL sont toutes définies dans l'espace de nom `http://www.utc.fr/hds/ici/humans/world`. L'espace de nom sera implicite dans la suite de ce chapitre.

Nous utiliserons les notations présentées dans la figure 6.1 dans les schémas de ce chapitre.

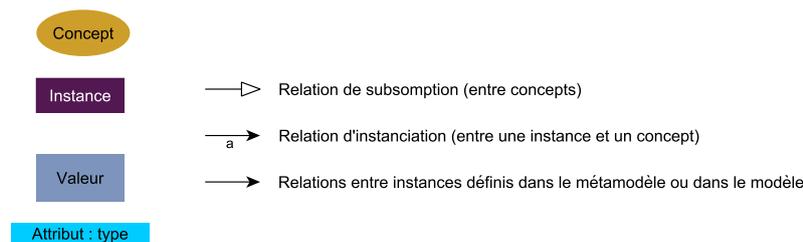


FIGURE 6.1 – Légende pour la visualisation des modèles décrits dans WORLD-DL

6.2.1 Éléments de description fondamentaux

Nous avons défini un ensemble de primitives de représentation qui sont ensuite utilisées pour décrire les différents types de connaissances que nous avons évoqués.

Les Entités - Entity

<http://www.utc.fr/hds/ici/humans/world#Entity>

Un modèle du monde est constitué d'un ensemble d'entités liées entre elles. Une entité est l'unité élémentaire de représentation des connaissances manipulables au regard du fonctionnement du monde (objets, actions, comportements...). Il n'y a aucune restriction sur la nature des relations que peuvent nouer les entités entre elles. Le modèle conceptuel d'une entité et un exemple d'utilisation sont présentés respectivement dans les figures 6.2 et 6.3.

Les états - State

<http://www.utc.fr/hds/ici/humans/world#State>

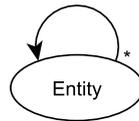


FIGURE 6.2 – Modèle conceptuel d’une entité dans WORLD-DL

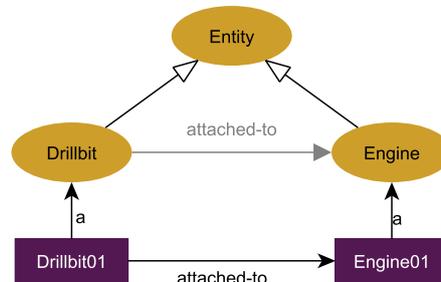


FIGURE 6.3 – Exemple d’entité au niveau opérationnel

État - State

Condition instantanée dans laquelle se trouve un objet ou un système.

Au niveau du modèle, un état se décrit comme un ensemble de couples attribut-valeur liés par une relation sémantique. Par exemple, on peut décrire l’état d’ouverture (ou de fermeture) d’une porte avec un angle d’ouverture et une valeur booléenne. Ces deux attributs sont liés sémantiquement, l’un évoluant avec l’autre. Pour assurer la cohérence de la base de faits — qu’elle ne contiennent pas d’assertions contradictoires — malgré les modifications qui y sont apportées, des **règles d’intégrité** permettent de renseigner la sémantique sur les couples attributs-valeurs et d’assurer la cohérence entre des couples d’un même état. Un exemple de règle d’intégrité est proposé dans le tableau 6.1.

Les états peuvent être liés à des **contraintes** (StateConstraint) qui permettent de déterminer les valeurs acceptables pour différents attributs. On pourra notamment définir un intervalle de validité pour la valeur d’un attribut, tel que [0-90] (voir figure 6.5). L’application de ces contraintes est réalisée par des **règles de contrainte** similaire aux règles d’intégrité.

Le modèle conceptuel des états est illustré dans la figure 6.4.

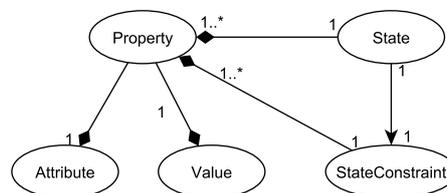


FIGURE 6.4 – Modèle conceptuel de l’état dans WORLD-DL

Les composants - Component

<http://www.utc.fr/hds/ici/humans/world#Component>

La méthode la plus directe pour décrire les différents types d’objets aurait été de décrire le monde par des héritages simples et donc produire une taxonomie des objets. Cependant, cette méthode atteint rapidement ses limites dans certains cas où il est impossible d’établir une hiérarchie stricte des

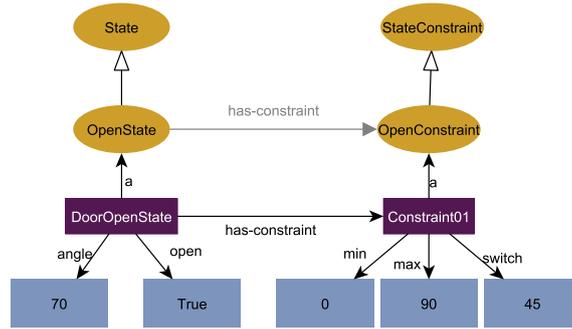


FIGURE 6.5 – Exemple d'états au niveau opérationnel

```

Règle d'intégrité
[ (?x :angle ?y)
  GreaterThan(?y, 45)
  ->
  Set(?x :open :True) ]
    
```

TABLE 6.1 – Exemple de règle d'intégrité liant les valeurs des attributs d'un même état

objets. Considérons un exemple où les objets peuvent être *portables* ou non et *électriques* ou non. Il existe des objets que l'on peut porter et d'autres que l'on ne peut pas. Parmi ces deux catégories certains sont électriques et d'autres ne le sont pas. Si on veut utiliser une taxonomie, en considérant qu'il y a d'une part les objet *portables* et les objet *non-portables*, il faudrait créer une nouvelle distinction entre objets *électriques* et *non-électriques* pour ces deux catégories. On dupliquerait ainsi des notions ce qui entraîne de la redondance. Or, les redondances sont à éviter puisqu'elles sont sujettes à l'ajout d'incohérences lors du processus de modélisation. En lieu est place de cela, nous proposons un mécanisme de multi-héritage : les **composants**.

Un composant permet de décrire une facette d'une entité. Les composants permettent de regrouper des entités ayant des propriétés ou des comportements communs. Il est alors possible d'adresser une entité par l'une ou l'autre de ces spécificités. Ceci est décrit dans notre représentation ontologique par des **liens de subsomption**. Une entité peut être subsumée par plusieurs composants, elle *hérite d'autant de facettes*.

Un composant, et donc les entités qui en héritent, peut définir des relations avec :

- un ou plusieurs composants ;
- une ou plusieurs entités ;
- un ou plusieurs états.

Le modèle conceptuel des composants dans le formalisme WORLD-DL est illustré par la figure 6.6.

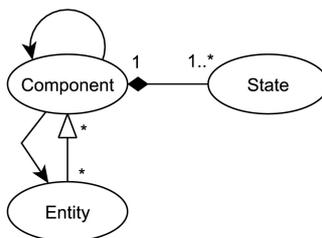


FIGURE 6.6 – Modèle conceptuel des composants dans WORLD-DL

Exemples. *Un foret (entité Drillbit) est une entité qui est transportable (composant Carriable) et de forme circulaire (composant Circle). Un foret peut donc être porté par un agent (relation carry)*

et dispose des attributs *diametre-mm* et *rayon-mm*. Un trou (entité *Hole*) est également de forme circulaire, mais n'est pas transportable. Cependant, il est issu d'un perçage, il a donc une capacité d'équerage (composant *Squareness*) qui définit sa perpendicularité par rapport à la surface (composant *Surface*) dans laquelle il s'insère (relation *on*). Bob est une instance d'agent (entité *Agent*) qui porte le foret *Drillbit01* (une instance de *Drillbit*) de taille 3,2mm. Il y a un trou *Hole01* (instance de *Hole*) dans la barque *Bark* (instance de *Surface*). La figure 6.7 visualise sous forme de graphe les connaissances structurelles et opérationnelles de cet exemple.

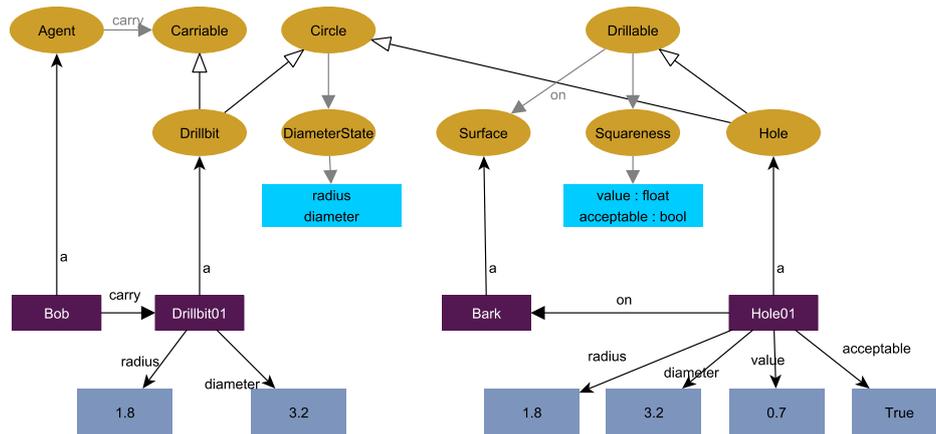


FIGURE 6.7 – Exemple de composants au niveau opérationnel

WORLD-DL définit un certain nombre de **composants primitifs** utilisés pour représenter les interactions et les comportements mais qui peuvent être également utilisés pour la modélisation du domaine (voir figure 6.8) :

- *Activable* (lié à un état de type *ActiveState*) : définit les entités qui peuvent être actives à un moment donné ;
- *Randomizable* (lié à un état de type *RandomState*) : définit les entités auxquelles sont associées une valeur aléatoire ;
- *Durable* (lié à un état de type *Duration*) : Une entité qui peut avoir une durée ;
- *Timestampable* (lié à un état de type *Timestamp*) : définit une entité qui peut se voir associer un marqueur de temps ;
- *Delayable* (lié à un état de type *Delay*) : définit une entité qui peut avoir un délai (avant exécution, existence etc...) ;
- *Commitable* : définit une entité dont les propriétés peuvent être décidées en cours de simulation (voir la partie 6.2.5 de ce chapitre).

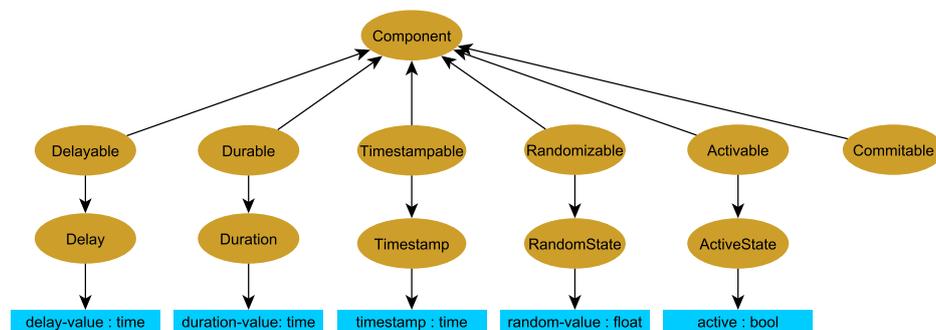


FIGURE 6.8 – Composant primitifs intégrés au métamodèle WORLD-DL

Les éléments que nous venons de décrire, (*Entity*, *State*, *StateConstraint*, *Component* et composants primitifs) définissent un cadre formel pour spécifier les concepts nécessaires aux trois types de connaissances que nous cherchons à décrire : statiques, dynamiques et interactionnelles.

6.2.2 Description statique

Les objets - *Object*

<http://www.utc.fr/hds/ici/humans/world#Object>

Objet - *Object*

Entité, concrète ou abstraite, ayant une existence propre, c'est-à-dire pouvant être décrite ou manipulée sans qu'il soit nécessaire de connaître d'autres objets.

Les objets sont des entités qui ont une existence propre dans le domaine indépendamment de la manière dont celui-ci est considéré. Les objets sont les entités essentielles de l'environnement simulé. Chaque objet peut avoir des propriétés différentes qui induisent des états et des changements d'état différents. Nous définissons trois types d'objet :

- **Les objets abstraits** – *AbstractObject* : objet qui n'a pas de représentation visuelle dans l'environnement virtuel ;
- **Les objets concrets** – *ConcreteObject* : objet possédant une représentation visuelle dans l'environnement virtuel ;
- **Les agents** – *Agent* : objet capable d'interagir de manière autonome avec son environnement, c'est à dire à la fois de le percevoir et d'effectuer des actions dessus.

Les objets peuvent être liés entre eux par tout type de relation. Un type d'objet peut définir ses propriétés ou bénéficier des propriétés des composants dont il hérite. En tant qu'entité, les objets peuvent hériter de plusieurs composants, mais il est également possible de définir des relations **d'héritages simples** entre objets pour former des taxonomies.

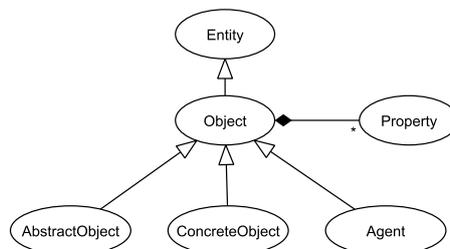


FIGURE 6.9 – Hiérarchie des objets dans WORLD-DL

Les règles d'initialisation

Les règles d'initialisation permettent de définir l'état du monde en inférant de nouvelles connaissances à partir des relations existantes à l'initialisation de la simulation.

Au contraire des autres types de règles que nous présentons dans ce chapitre qui sont générales et s'appliquent toujours dans le domaine, les règles d'initialisations permettent de faciliter **l'exploitation quotidienne** de l'environnement pour créer des situations particulières. La règle présentée dans le tableau 6.2 permet de faire en sorte que toutes les portes de l'environnement soient ouvertes à l'initialisation. Il est bien sûr possible de faire des règles plus complexes. On pourra par exemple faire en sorte que toutes les portes soient fermées à l'exception de toutes celles qui sont sur le chemin pour accéder à une salle particulière.

```

Règle d'initialisation
[AllYourDoorsAreOpenToUs :
( ?door rdf:type :Door)
( ?door :has-open-state ?open_state)
->
set( ?open_state :open :True)

```

TABLE 6.2 – Exemple de règle initialisant l'état d'ouverture de toutes les portes de la scène

6.2.3 Interactions

<http://www.utc.fr/hdslicil/humans/world#Action>

Notre modèle du monde a vocation à représenter les connaissances sur le monde et donc ce qu'il est possible de faire pour un agent, qu'il soit un utilisateur ou un personnage autonome, sur les objets du monde. La **représentation ne prend pas en compte la modalité de l'interaction** dans l'environnement virtuel, ainsi, nous ne considérons pas, ici, par quel moyen l'utilisateur interagit avec la simulation. Nous présentons dans la section 10.3.1, un exemple d'application du modèle du monde et de son moteur d'exécution au sein d'un environnement manipulé au clavier et à la souris ainsi qu'au sein d'un environnement utilisant des interactions naturelles.

Quelque soit le mode d'interaction, toute intervention d'un agent se fait au travers d'une action.

Action - Action

Processus physique ou cognitif, pouvant être mis en œuvre par un agent à l'issue d'une décision. Une action peut être ponctuelle ou continue dans le temps.

Les actions sont des entités héritant des composants `Timestampable` et `Activable`. Les actions peuvent être réalisées par un `Agent` spécifié via la relation `agent`.

Une action dispose de **paramètres** qui peuvent être de deux types :

- des **instances** de `Object` ;
- des **données** décrites dans un type de base (float, booléen, chaîne de caractère).

Ces paramètres sont renseignés par des sous-relations de la relation `action-target`. Bien qu'un paramètre soit toujours **typé**, conceptuellement, une action peut aussi bien prendre des composants que des objets en paramètre. Seules les instances héritant des composants ou des types d'objets adressés par le paramètre sont valides pour l'action. L'approche par composant permet, ici encore, de faciliter grandement la modélisation du domaine en ne spécifiant des actions qu'au regard des composants auxquels elles s'appliquent. Les paramètres peuvent être spécifiés en tant que composant particulier (par exemple, l'action *Prendre* est possible sur tous les objets *portables*) mais, ils peuvent également être spécifiés en tant que types d'objets (par exemple, l'action *Ouvrir* est possible sur les *Porte*). Dans ce dernier cas, il est tout à fait possible de raisonner sur le modèle du monde pour déterminer tous les objets qui ont des composants communs avec le type d'objet cible. Ce mécanisme pourrait être utilisé par des personnages virtuels autonomes pour remplacer des ressources non accessibles, ce qui s'apparenterait à recherche des objets qui sont des *sorte de* tel que proposé dans la gestion des ressources par [Edward, 2011].

Le modèle conceptuel des actions est présenté en figure 6.10.

Une action n'est que le résultat d'une prise de décision et **n'opère aucun changement sur le monde**. Par contre, elle génère un ou plusieurs comportements qui sont susceptibles d'apporter des modifications à l'état du monde. Une action est **réalisable** si ses conditions de mises en œuvre sont réunies :

- les valeurs de paramètres proposées pour l'action sont valides, c'est-à-dire qu'ils sont d'un type (type de composant ou type d'objet) qui a été défini comme une valeur potentielle pour le paramètre en question ;

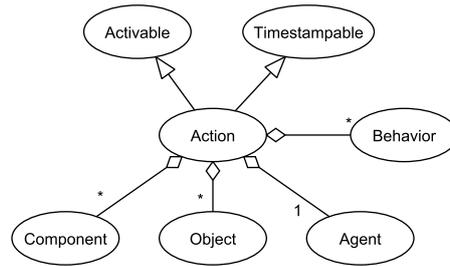


FIGURE 6.10 – Les actions dans WORLD-DL

— l'état du monde requis pour la réalisation, décrit dans les prémisses des règles d'actions, dont un exemple est proposé dans le tableau 6.3, est atteint.

Lorsque l'action est réalisable, elle génère un ou plusieurs comportements.

Une action **effectrice** est une action qui aura un effet, désiré ou non, sur l'état du monde. Les conditions d'effectivité ne sont pas décrites dans les règles de l'action mais dans les règles des comportements.

Action
<pre> [UnlockAction: (?action rdf:type :Unlock) (?action domain:has-active-state ?state) (?state domain:active domain:True) (?action :agent ?agent) (?action :with-key ?key) (?action :with-lock ?lock) (?agent :carry ?key) -> CreateBehavior(?beh,Unlocking) SetValue(?beh, :with-key, ?key) SetValue(?beh, :with-lock, ?lock)] </pre>

TABLE 6.3 – Exemple de règle pour gérer la dynamique de l'action `Unlock`

6.2.4 Description dynamique

Les comportements - Behaviour

<http://www.utc.fr/hdslici/humans/world#Behaviour>

Comportement - Behavior

Un comportement correspond à une manière d'évoluer de l'objet ou du système qui en est doté.

Les comportements sont des entités, ils héritent des composants `Timestampable`, `Activable` et `Randomizable`.

A chaque type de comportement correspond un ensemble de règles de fonctionnement. Celles-ci précisent les conditions d'exécution des comportements ainsi que les effets qu'ils opèrent sur les objets qu'ils ciblent. Dans le cas d'un comportement déclenché par une action, il peut s'agir des paramètres de l'action ou d'objets liés à ces paramètres. En outre, les règles ne s'appliquent que lorsque le comportement est considéré comme actif (attribut `active` du composant `Activable`) et déterminent l'inactivation du comportement (par une condition d'arrêt par exemple).

Par exemple, lorsqu'un utilisateur réalise l'action `Appuyer` sur un interrupteur, un comportement de `Allumage` permet de passer l'état de l'ampoule reliée à l'interrupteur de l'état `Eteinte` à `Allumee`.

Un comportement peut être **ponctuel** (`PunctualBehavior`) ou **continu** dans le temps, on parle alors de **comportement duratif** (`DurativeBehavior`).

Un comportement peut être déclenché par :

- une action réalisable ;
- un état du monde particulier décrit par un agrégat d'assertion sur le monde au travers de règles, ou réifié sous la forme d'un événement (voir section suivante 6.2.4) ;

Dans tous les cas, l'instanciation et l'activation du comportement sont faites au travers des règles JENA. Le tableau 6.4 présente un exemple de règle de fonctionnement.

Comportement
<pre>[LockBehaviour: (?beh rdf:type :LockBehaviour) (?beh domain:has-active-state ?state) (?state domain:active domain:True) (?beh domain:target-handle ?handle) (?handle rdf:type :Handle) (?handle :is-on ?arm) (?arm :is-connected-to ?valve) (?valve :has-lock-state ?lockstateV) (?lockstateV :locked domain:False) (?arm :has-lock-state ?lockstateA) -> SetValue(?state, domain:active, sys:False) SetValue(?lockstateV, :locked, domain:True) SetValue(?lockstateA, :locked, domain:True)]</pre>

TABLE 6.4 – Exemple de règle pour gérer la dynamique du comportement `LockBehavior`

Les événements - Event

<http://www.utc.fr/hds/ici/humans/world#Event>

Événement - Event

Fait marquant, qui survient à un moment donné. Un événement correspond à une agrégation de changements d'états liés de manière causale ou au maintien des valeurs d'un ensemble d'états sur une certaine durée dès lors qu'ils sont signifiants du point de vue de l'observateur.

Les événements ponctuels - `PunctualEvent` (changement d'état signifiant) sont des concepts spécialisés pour chaque événement possible. Ils héritent des composants `Timestampable` et `Activable`. Ils peuvent créer et activer des comportements. Les événements duratifs - `DurativeEvent` (changement continu d'un état ou maintien d'un état signifiant) sont délimités par deux `PunctualEvent` et sont associés à un comportement continu (`DurativeBehaviour`). En plus des composants `Timestampable` et `Activable`, ils héritent également de `Durable`.

L'occurrence d'un événement, qu'il soit ponctuel ou duratif, est donc le passage d'une **situation** à une autre dès lors que ce passage est signifiant du point de vue des experts.

Par exemple, les événements ponctuels *DebutFuite* et *FinFuite* délimitent l'activation d'un événement duratif *Fuite* de même qu'un comportement *VidageReservoir*.

Les événements sont de deux types selon leurs origines :

- **les événements endogènes** (`EndogenousEvent`) surviennent du fait de l'observation d'un état, au travers d'une règle (voir tableau 6.5) ou déclenchés par un comportement. Il s'agit des événements qui sont internes au fonctionnement du monde ;
- **les événements exogènes** (`ExogenousEvent`) ne découlent pas de l'état du monde, ils ne peuvent pas survenir du fait de la simulation du monde (règle de fonctionnement, personnages virtuels autonomes, moteurs physiques, etc.) et sont nécessairement déclenchés extérieurement à la simulation (par le formateur ou par le moteur de scénarisation).

La distinction entre ces deux types d'événements est à considérer en fonction de l'étendue de ce qui est modélisé dans chaque domaine. Par exemple, si la simulation ne reproduit qu'une partie d'une usine, tous les événements pouvant survenir dans les parties non-modélisées mais ayant une influence sur le contenu de la simulation, comme le déclenchement d'une alarme incendie, peuvent être considérés comme des événements exogènes. Leur survenue ne brise pas la cohérence du fonctionnement du monde puisque l'utilisateur ne peut pas percevoir ce qui se passe dans la partie non-modélisée. Par contre, si la simulation reproduit toute l'usine, alors le déclenchement de l'alarme est un événement endogène et ne saurait survenir sans aucune cause. Il est toutefois indispensable de les distinguer car les événements exogènes constituent un levier important pour assurer **la résilience** de la scénarisation. En effet, étant donné qu'ils peuvent survenir de manière indépendante à la simulation sans briser la cohérence, ils peuvent être utilisés pour orienter la simulation vers des états du monde souhaités ou au contraire pour la dévier d'état du monde indésirables.

Lorsqu'un événement survient (une instance de cet événement est créée) et si les conditions définies par les règles associées à ce type d'événement sont réunies alors un comportement est créé et activé.

— Detection d'un début d'événement —

```
[TankOverflowActivation:
(?tank :has-fillable-state ?fillstate)
(?fillstate :capacity ?capacity)
(?fillstate :filling ?quantity)
Greater(?quantity, ?capacity)
->
CreateEvent(:TankOverflowStart, ?startev)
SetValue(?startev, :concern-tank, ?tank)
CreateEvent(:TankOverflow, ?ev)
(?ev domain:has-active-state ?evstate)
SetValue(?evstate, domain:active, domain:True)
SetValue(?ev, :concern-tank, ?tank)
CreateBehaviour(:DomeLeakBehaviour, ?beh)
(?beh domain:has-active-state ?behstate)
SetValue(?behstate, domain:active, domain:True)
SetValue(?beh, :target-tank, ?tank)]
```

TABLE 6.5 – Exemple de règle pour la détection du début de l'événement TankOverflow

— Detection de la fin d'événement —

```
[TankOverflowDeactivation:
(?beh rdf:type :DomeLeakBehaviour)
(?beh :targets-tank ?tank)
(?beh domain:has-active-state ?behstate)
(?behstate domain:active domain:True)
(?ev rdf:type :TankOverflow)
(?ev :concerns-tank ?tank)
(?ev domain:has-active-state ?evstate)
(?evstate domain:active core:True)
(?tank :has-fillable-state ?fillstate)
(?fillstate :capacity ?capacity)
(?fillstate :filling ?quantity)
Greater(?capacity, ?quantity)
->
SetValue(?evstate, domain:active, domain:False)
(?behstate domain:active domain:False)
CreateEvent(:TankOverflowEnd, ?endev)
SetValue(?endev, :concern-tank, ?tank)]
```

TABLE 6.6 – Exemple de règle pour la détection de la fin de l'événement TankOverflow

Le modèle conceptuel pour la description de la partie dynamique du formalisme WORLD-DL est illustré dans la figure 6.11.

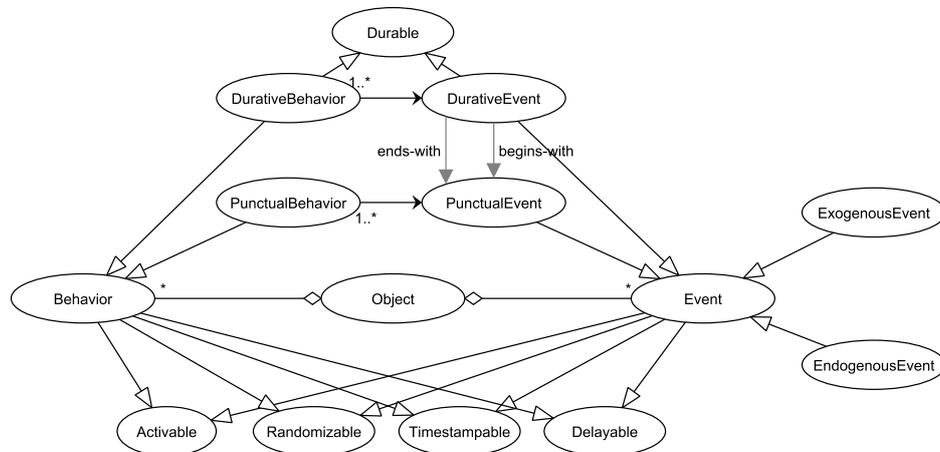


FIGURE 6.11 – La dynamique dans WORLD-DL

6.2.5 Un mécanisme de résilience : le late commitment

Pour satisfaire notre objectif de résilience, nous avons opté pour la mise en place d'un mécanisme de **late commitment** proposé par [Barot, 2014] en s'inspirant de [Swartjes et al., 2008].

Un moyen d'offrir de la résilience est de maximiser **l'ouverture des scénarios**, c'est-à-dire la quantité de scénarios possibles à partir de l'état du monde courant. L'ouverture des scénarios est dépendante de l'état du monde : plus celui-ci est contraint, plus les possibilités d'évolutions sont restreintes. Cependant, cela ne doit pas se faire au prix de la cohérence de l'environnement virtuel.

Le principe du late commitment est de laisser certaines propriétés sur le monde **indéterminées** afin que celles-ci ne soient précisées qu'au moment où cela est nécessaire.

Par exemple, la quantité de matière dans une cuve peut être indéterminée. Lorsqu'un conducteur de camion lance un chargement de carburant, la quantité de matière dans la cuve pourra être décidée en fonction des besoins de la scénarisation : si la scénarisation nécessite la mise en place d'une situation d'urgence, alors un débordement pourra être généré en fixant la quantité de matière dans la cuve à la capacité maximale.

Ce mécanisme original permet d'assurer la résilience tout en maintenant la cohérence du fonctionnement du monde, car il n'y a pas de changement arbitraire dans les propriétés du monde, mais des affinements successifs qui restent consistants d'un instant à l'autre.

Dans la représentation du monde les attributs peuvent être :

- **indécis**, si leur valeur appartient à un ensemble fini de valeurs. Par exemple, la propriété d'ouverture de la porte appartient à l'ensemble $\{ouvert, fermé\}$;
- **imprécises**, si leur valeur est un ensemble infini de valeurs représenté par des intervalles. Par exemple, l'angle d'ouverture de la porte appartient à l'intervalle $[0, 90]$.

Un *late commitment* permet d'affiner la valeur d'un attribut d'un état *commitable* (héritant du composant *Commitable*), c'est-à-dire de réduire la taille de l'ensemble de ces valeurs possibles.

L'affinement d'une valeur relève de l'étape du **contrôle du scénario** puisqu'il s'agit de mener la simulation vers un état désiré. Il peut se produire dans les cas suivants :

- **perceptibilité de la valeur** : la notion de late commitment est intimement liée à la notion de perception dans l'environnement virtuel. En effet, le fait d'avoir des valeurs indécises ou imprécises n'a de sens que si cette valeur n'est pas directement perceptible par l'utilisateur.

Ainsi, on peut considérer qu'une valeur est indécise ou imprécise tant que l'utilisateur ne l'a pas directement observée. Dès l'instant où celle-ci est susceptible d'être perçue, elle doit être décidée, précisée ou restreinte. Par exemple, la quantité de matière dans une cuve peut être imprécise jusqu'à ce qu'un utilisateur regarde effectivement à l'intérieur de celle-ci ;

- **condition sur l'exécution d'un comportement ou d'un événement** : les règles associées aux comportements et aux événements définissent des conditions qui peuvent parfois mettre en jeu des propriétés indéterminées. Ces propriétés doivent être décidées pour rendre possible l'évaluation de ces règles ;
- **effet de l'exécution d'un comportement** : les comportements agissent sur les attributs des objets pour les modifier. Si le comportement a un effet fixe, c'est-à-dire que la nouvelle valeur de l'état n'est pas dépendante de son ancienne valeur, alors cette valeur sera décidée du fait de l'application des règles du monde (Exemple : l'action "Vider la cuve" réduit la quantité de matière à 0 quelle que soit sa quantité initiale). Au contraire, un comportement apportant une modification relative à une valeur permet de conserver l'indétermination. Par exemple, l'action "Charger 500 litres" dans une cuve ayant une quantité de matière comprise entre 0 et 500 litres conserve l'imprécision puisque le résultat sera une quantité de matière entre 500 et 1000 litres ;
- **orientation du scénario** : le contrôle du scénario nécessite de refermer l'espace des scénarios possibles pour favoriser un chemin particulier.

A l'issue d'un *commitment*, les **règles d'intégrité** assurent la cohérence entre les valeurs de plusieurs attributs liés entre eux (voir figure 6.12).

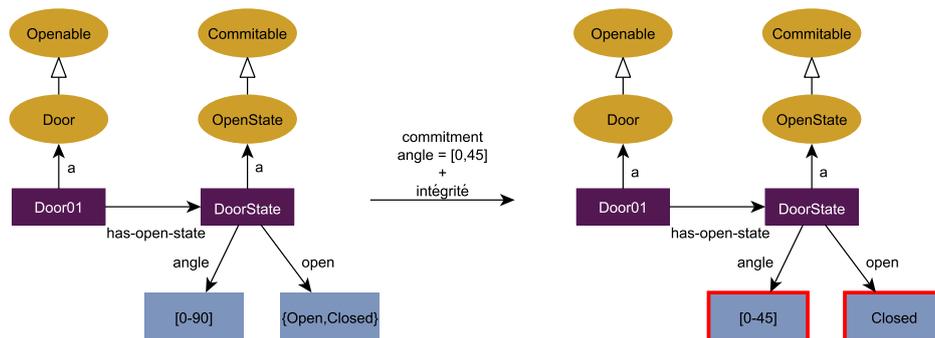


FIGURE 6.12 – Mécanisme de *late commitment*

Il est nécessaire de prendre en compte l'imprécision pesant sur les valeurs de l'état du monde dans l'application des règles. Notamment, nous verrons dans le chapitre 10 que les opérateurs de comparaison de base ont été *surchargés* afin de s'appliquer sur des ensembles plutôt que sur des valeurs.

6.3 WORLDMANAGER : moteur d'exécution du scénario

Le moteur d'exécution est chargé de maintenir la base de connaissances opérationnelles du modèle du monde. Pour cela, il assure son intégrité en appliquant les règles d'intégrité et il met à jour la base en fonction de l'application des comportements. Des moteurs tiers peuvent accéder à cette base pour connaître l'état du monde (niveau opérationnel) ou pour raisonner sur le modèle du monde (niveau structurel).

La simulation est discrétisée, à chaque pas de temps, le moteur analyse la base de faits et les règles. L'algorithme est le suivant :

1. Saturation de la base de fait
2. Exécution des actions
3. Exécution des comportements :
4. Exécution des événements
5. Application des règles d'intégrités

6.3.1 Saturation de la base de faits

Toutes les règles permettant d'inférer de nouvelles connaissances (des triplets) dans la base sont appliquées. Les triplets inférés sont ajoutés à la base de connaissance.

Exemple.

Une règle permet d'inférer qu'un objet rangé dans un contenant posé sur une surface est également posé sur cette surface. Cette règle est présentée dans la table 6.7 et illustrée dans la figure 6.13.

Règle sémantique pour l'inférence de nouvelles connaissances
<pre> [(?object :is-in ?box) (?box :is-on ?surface) (?box rdf:type :Container) (?surface rdf:type :Surface) (?object rdf:type :Tool) -> (?object :is-on ?surface)] </pre>

TABLE 6.7 – Exemple de règles sémantiques utilisées pour la saturation de la base de connaissances

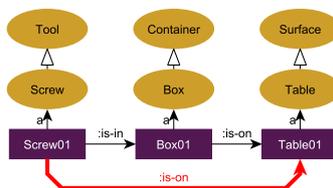


FIGURE 6.13 – Inférence pour la saturation de la base de faits

Grâce aux composants, il n'est pas nécessaire de dupliquer les règles pour tous les types d'objets, il suffit d'associer la règle au composant adéquat pour que celle-ci soit applicable à tous les objets qui en héritent.

6.3.2 Exécution des actions

Lorsqu'une demande d'action est réalisée, que ce soit par un utilisateur ou par un personnage virtuel autonome, celle-ci est instanciée : les faits liés à cette action (son type, ses paramètres) sont ajoutés à la base (voir figure 6.14). Les règles liées à cette action sont alors appliquées. Les **conditions de faisabilité** sont vérifiées pour déterminer si les comportements liés à cette action doivent être instanciés. Dans l'exemple proposé dans la figure 6.14, le personnage Bob a déclenché une action de chargement de 1000 litres sur le réservoir Tank01. Celui-ci déclenchera un comportement de chargement Loading.

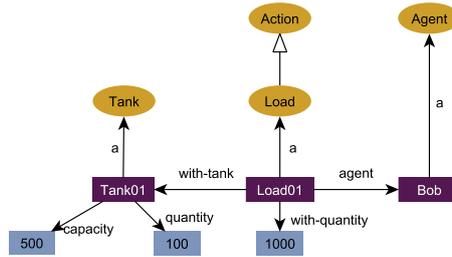


FIGURE 6.14 – Instanciation d’une action

6.3.3 Exécution des comportements actifs

Pour rappel, les comportements sont responsables des changements effectifs sur l’état du monde. Les règles associées aux comportements actifs de la base sont exécutées. Si le comportement actif est un comportement ponctuel, alors le comportement est désactivé. Un comportement duratif sera désactivé lorsque la condition d’arrêt, décrite dans les règles du comportement, sera atteinte. La figure 6.15 montre les modifications apportées à l’état du monde (changement de la valeur *quantity*) en présence du comportement *Loading01* après deux minutes.

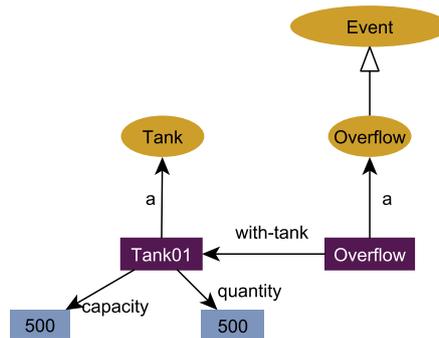


FIGURE 6.15 – Instanciation et vie d’un comportement

Un comportement peut générer un événement. Dans la figure 6.16, le comportement de remplissage de la cuve a déclenché un débordement lorsque la quantité de matière dans la cuve a dépassé la capacité maximale.

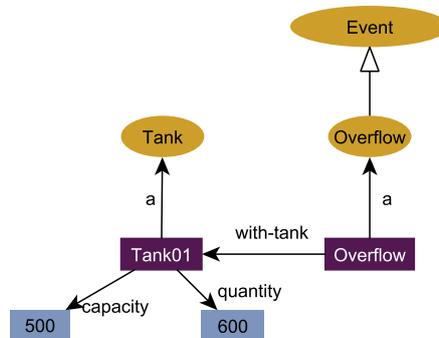


FIGURE 6.16 – Déroulement du comportement

6.3.4 Exécution des événements

Pour rappel, les événements ne modifient pas l'état du monde mais ils contrôlent la mise en place de comportements qui pourront, eux, influencer sur l'état du monde. Lorsqu'un événement a été généré, par un comportement (événement endogène) ou par demande extérieure (événement exogène), celui-ci est actif et les faits liés à cet événement sont inscrits dans la base (il se crée une instance de cette événement ainsi que les relations qu'ils nouent avec ses paramètres). Les règles liées à cet événement sont alors vérifiées. Si les conditions sont réunies pour déclencher un nouveau comportement, celui-ci est créé et ajouté à la base. Les règles qui y sont associées seront exécutées au cours du prochain pas de simulation. Les événements ponctuels sont désactivés automatiquement. Les événements duratifs sont désactivés lorsque leur condition d'arrêt est atteinte.

6.3.5 Application des règles d'intégrité

À la fin du pas de simulation, l'application des règles d'intégrité permet d'assurer la cohérence de la base de fait après les diverses modifications apportées à l'état du monde. Dans notre exemple, la quantité de matière (600 litres) avait dépassé la capacité maximale (500 litres). L'intégrité de la base de connaissance est donc mise en péril. L'application des règles d'intégrité permet de ramener la quantité de matière à une valeur qui est sémantiquement valide (voir la figure 6.17).

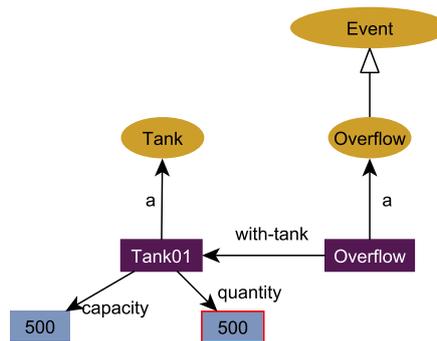


FIGURE 6.17 – Application d'une règle d'intégrité

6.4 Bilan

Nous avons proposé un métamodèle pour la création d'un modèle du monde s'appuyant sur une posture ontologique. Cette posture nous permet de répondre en grande partie à nos objectifs. Les représentations ontologiques permettent d'assurer la **modularité** des modèles par la réutilisation de modèles existants. L'approche par composant que nous privilégions permet de concevoir et enrichir facilement et rapidement des objets riches en comportements sans craindre d'ajouter de la redondance dans la représentation.

La représentation du fonctionnement du système sous forme de comportements locaux permet de faire émerger le fonctionnement global. Il n'est plus nécessaire aux créateurs de contenu de connaître le fonctionnement holistique du système. Chaque acteur peut enrichir le modèle en ne considérant que la partie qui l'intéresse.

Les acteurs du domaine peuvent disposer de vues locales en ne considérant que les entités qui les intéressent, mais il peuvent également accéder à une vue globale et commune représentée de manière graphique. Ces différents niveaux d'observation du modèle assurent son **intelligibilité**.

En s'appuyant sur des standards de représentation tels que OWL et RDF qui sont des formalismes informatiques, on permet à la représentation d'être **interprétable**. En outre, la description des comportements du système dans une syntaxe telle que celle des règles JENA les rend **explicités** et donc **accessibles** et **inspectables** par des moteurs décisionnels tiers. Notamment, des entités autonomes peuvent effectuer des requêtes et opérer des inférences sur le modèle pour générer leurs propres comportements.

La posture ontologique, mise en œuvre au travers de OWL, permet de bénéficier d'une large **expressivité**. En outre, les primitives que nous avons définies pour la gestion de la partie dynamique du système offrent la possibilité de concevoir des comportements très complexes.

De surcroît, au contraire de nombreuses représentations, WORLD-DL sépare nettement les connaissances sur l'interaction avec le système (comment l'utilisateur ou les personnages virtuels autonomes peuvent agir sur l'environnement) des connaissances sur la dynamique du système (comment le système réagit aux interventions). Ceci rend possible la description d'un fonctionnement autonome du monde.

Grâce à cette représentation, les concepteurs s'attachent à décrire de manière locale le comportement du système. Le comportement du système global émerge du fonctionnement autonome du système grâce aux règles de fonctionnement, mais également des interactions de l'utilisateur ou d'autres entités autonomes en lien avec la base de faits (personnages autonomes, moteur de scénarisation, moteur physique).

La notion d'événement permet de définir précisément, ou généralement, des états du monde signifiant du point de vue du concepteur.

La sémantique associée au métamodèle permet en outre de créer automatiquement des faits qui sont valides avec l'état du monde courant. On dispose ainsi d'un **pouvoir génératif** suffisant pour générer procéduralement du contenu riche *à la volée*.

Enfin, l'ouverture des scénarios permise par l'indécision portée par les valeurs des états dits *committables* permet d'offrir un mécanisme de **résilience** face aux actions de l'utilisateur, ou des entités autonomes, allant à l'encontre du scénario prescrit.

L'opérationnalisation des connaissances sur le monde au sein du moteur WORLDMANAGER permet de réaliser l'exécution et le suivi d'une simulation tout en bénéficiant des avantages cités. En plus d'assurer la mise à jour et le maintien de l'état du monde, ce moteur, que nous décrirons en détail dans la partie 10.1.1 constitue une interface entre la base de connaissances sémantisée et des moteurs décisionnels tiers.

Chapitre 7

Diagnostic de l'apprenant : du modèle de profil à la prise de décision

“ Of course, it is quite possible to be in the dark in the dark, as well as to be not in the dark not in the dark, but there are so many secrets in the world that it is likely that you are always in the dark about one thing or another. ”
The End, A Serie Of Unfortunate Events XIII , Lemony Snicket

Sommaire

7.1 Approche	116
7.2 Profil de l'apprenant	116
7.2.1 Modélisation du domaine d'apprentissage	117
Descripteurs	117
Espace de classe de situations	118
Exemple	119
7.2.2 Représentation des connaissances sur l'apprenant	120
Besoins de représentation	120
Choix d'un cadre formel	120
Formalisation de la théorie des fonctions de croyance	121
Définitions des sources d'informations	123
7.2.3 Mise à jour de l'état de connaissance	123
Fusion sans conflit de sources d'informations simultanées	123
Révision des informations par de nouvelles sources d'information	125
7.2.4 Mécanisme d'inférence dans l'espace-zpd	126
Propagation des croyances	128
Fusion avec conflit	128
Inférences	130
7.3 Modèle décisionnel	131
7.3.1 Les enjeux de la prise de décision dans l'espace-zpd	131
Modèle pédagogique	131
Prise de décision au niveau microscénaristique	133
Prise de décision au niveau mésoscénaristique	133
7.3.2 Résolution du problème de satisfaction de contraintes	134
Algorithme de recherche glouton	134
Métaheuristique pour la prise de décision dans l'espace-zpd	135
7.4 Étendre la Zone Proximale de Développement	137

Le mode de scénarisation que nous proposons se veut personnalisé, c'est-à-dire adapté à l'apprenant. Pour cela, il convient de disposer d'un moyen de diagnostiquer ce qu'il est nécessaire de mettre en place au cours du scénario sur le plan de l'apprentissage. Un diagnostic requiert de disposer d'une base de connaissances, et d'un modèle de décision qui précise comment ces connaissances doivent être considérées pour en tirer des conclusions. Ici, la base de connaissances est un ensemble de connaissances sur l'apprenant. Elle se constitue à la fois des connaissances issues de l'observation directe de l'utilisateur mais également de connaissances inférées à partir de ces observations. Le modèle de décision est ici un modèle pédagogique puisque l'objectif de la décision est de promouvoir l'apprentissage. Enfin, le contenu d'une décision consiste en un jeu de contraintes que devra respecter un objectif scénaristique. Nous décrirons ces différents éléments, profil de l'apprenant, mécanisme d'inférence, et modèle de décision, dans ce chapitre après avoir présenté l'approche générale pour laquelle nous avons opté.

7.1 Approche

Nous nous sommes inspirés de la formalisation de Brousseau que nous avons évoqué dans l'état de l'art (voir la section 3.1.5) pour représenter la structure d'un profil de l'apprenant pour un domaine donné. Cette structure demande à être renseignée avec des informations propres à un apprenant pour créer un *modèle de l'apprenant*. Pour cela, nous proposons d'utiliser des sources d'informations sur l'apprenant (évaluation, historiques, traces d'activités) pour inférer les capacités de l'apprenant quant à la résolution de situations-problèmes, qu'elles aient été rencontrées ou non. Une telle démarche suggère d'être approximatif dans ces inférences et demande donc de modéliser le profil de l'apprenant en prenant en compte l'incertitude issue des données d'entrées. La modélisation du domaine d'apprentissage considéré, couplée à une représentation de l'incertitude sur les connaissances de l'apprenant que nous proposons, permet de représenter le niveau de développement présent, le niveau de développement potentiel et, ainsi, la **zone proximale de développement**. Par facilité de langage, nous appellerons cette représentation **l'espace-zpd**.

Le problème de représentation étant posé, il reste encore à déterminer le modèle décisionnel pouvant être mis en œuvre à partir du profil de l'apprenant. Notre objectif principal est de déterminer la meilleure adaptation à proposer en fonction d'un modèle pédagogique constitué de contraintes prenant en compte divers éléments : le diagnostic sur l'état de connaissance de l'apprenant, l'état de la simulation et la progression de l'apprenant. La détermination d'une adaptation peut donc être considérée comme la résolution d'un problème de satisfaction de contraintes.

7.2 Profil de l'apprenant

L'établissement d'un diagnostic de l'apprenant nécessite de modéliser celui-ci. L'ambition de notre diagnostic est **uniquement de servir à la scénarisation des situations d'apprentissage** de façon personnalisée. A ce titre, nous ne nous sommes pas intéressés à la prise en compte des informations sur l'identité de l'apprenant. Cependant, nous pensons que le profil que nous proposons, qui est ici uniquement destiné à des fins de scénarisation automatique dans un environnement virtuel, doit être intégré dans un modèle plus complet qui contiendrait également des informations sur l'identité. Cela pourrait servir ainsi dans le cadre plus large de la formation continue des opérateurs en dehors de l'environnement virtuel.

Par ailleurs, s'agissant d'entraînement à des domaines complexes, nous ne pouvons nous appuyer sur une élicitation des connaissances mises en jeu au cours des situations. Pour cette raison, et en accord avec le paradigme constructiviste, nous proposons de contourner ce problème en représentant le

domaine d'apprentissage par les situations qui le caractérisent. L'évaluation que le système fera sur la capacité de l'apprenant à gérer une situation, c'est-à-dire à réaliser les tâches qui s'y rapportent sans erreurs, rendra compte de **l'état de connaissance** de l'apprenant. Cette évaluation est réalisée à partir de sources d'informations incertaines et elle est enrichie grâce à un mécanisme d'inférence.

7.2.1 Modélisation du domaine d'apprentissage

Nous cherchons à représenter le domaine d'apprentissage par les situations qu'il met en œuvre. Nous avons défini une situation comme étant une description partielle de l'état du monde. Il s'agit donc d'un jeu de variables particulières associées à des valeurs particulières. Pour autant nous ne souhaitons pas modéliser nécessairement le domaine d'apprentissage par une description exhaustive des situations qu'il intègre car, toujours dans le cadre des domaines complexes, une telle modélisation mènerait à la manipulation de modèles très grands. Par ailleurs, il peut être plus pertinent de s'intéresser à une modélisation abstraite des situations afin d'offrir différentes possibilités d'instanciation de ces situations et ainsi, élargir la variabilité des contenus proposés.

Nous avons pour cela défini la notion de **descripteurs** qui permet de définir **des classes de situation**.

Classe de situation

Une classe de situation est la représentation abstraite d'un ensemble de situations présentant des propriétés communes.

Les différents descripteurs permettent de décrire un espace de classes de situations comme un espace topologique dans lequel il est possible d'établir des distances entre des classes de situation.

Descripteurs

Dans un cadre constructiviste, il est parfois difficile d'établir une formalisation des connaissances qui puisse correspondre à un apprenant [Bednar et al., 1992]. En outre, nous avons pour objectif de faciliter la production des environnements virtuels pour l'apprentissage. Or, le travail d'élicitation des connaissances peut s'avérer extrêmement difficile. Dans certains cas, si on considère notamment l'apprentissage, cette élicitation est même impossible. Afin de rendre possible une scénarisation automatique pédagogique pertinente ne requérant pas de travail d'élicitation des connaissances, nous proposons de modéliser le profil de l'apprenant au travers des situations qu'il peut rencontrer. Pour cela, nous proposons de décrire les situations par un certain nombre de propriétés appelées **descripteurs**.

La notion de descripteurs est une notion abstraite généralisant tous les variants qui permettent de distinguer une classe de situation d'une autre, il peut notamment s'agir de :

- **variables cognitives**, qui sont des variables de l'état du monde qui sont déterminantes dans le déroulement d'une tâche. Elles sont dites *cognitives* car elles influent sur le processus décisionnel du sujet. Par exemple :
 - une tâche de perçage diffère selon le matériau à usiner (geste technique, procédures de sécurité, contrôle qualité) ;
 - les conditions météorologiques conditionnent l'activité sur un site de chargement de matière pétrolière (limitation de l'activité, procédures de sécurité) ;
- **compétences**, qui sont des savoir-faire nécessaires à la résolution d'une situation. Par exemple, *le contrôle de l'équerrage* et *le contrôle de l'avance* sont des compétences nécessaires à une situation de perçage, comme à une situation d'ébavurage ;
- **critères de performances** qui déterminent une réussite sur des aspects particuliers d'une situation. Par exemple, une situation de résolution de conflit entre une nourrice et un enfant

implique les critères suivant : *Posture professionnelle, Langage adapté et Vigilance*;

- **des tâches** à réaliser pour résoudre une situation. Par exemple, *Contrepercer, Ebavurer* sont des sous-tâches nécessaires à la fixation d'un support.

En conséquence, les ensembles de définitions des descripteurs sont tout aussi variables. S'il s'agit de variables cognitives, le domaine de définition correspond à toutes les valeurs que cette variable peut prendre. Lorsqu'un descripteur est une compétence ou une tâche, il prend une valeur booléenne selon que la compétence ou la tâche en question est impliquée dans une situation. Les critères de performance ont un domaine de définition correspondant à l'ensemble des valeurs de score qu'ils peuvent prendre.

Pour être un descripteur, un variant δ doit satisfaire à la condition suivante.

Conditions nécessaires sur les descripteurs

Il existe une fonction F_δ , bijective, telle que

$$\begin{array}{rcl} F_\delta & : & D_\delta \rightarrow \mathbb{N} \\ & & x \mapsto F_\delta(x) \end{array} \quad (7.1)$$

D_δ est le domaine de définition du variant δ ,
 \mathbb{N} est l'ensemble des entiers naturels.

En d'autres termes, les différentes valeurs d'un descripteur doivent être transposables dans un espace d'entiers naturels.

Espace de classe de situations

Une classe de situations S est définie par un vecteur σ pour lequel chaque composante σ_i est la valeur correspondant au descripteur i . Ainsi, toutes les situations pouvant être décrites par ce vecteur particulier appartiennent à cette classe. On nomme \mathcal{S} , l'espace produit par les différentes valeurs que peut prendre chacun des descripteurs. Chaque classe de situation S_i peut alors être représentée par un point dans l'espace \mathcal{S} , on l'appelle l'**espace des classes de situations**.

La création d'un tel espace à partir de composantes de nature radicalement différente peut poser problème. Considérons un exemple avec deux descripteurs dans une activité de perçage :

- δ_1 est le matériau avec $\delta_1 \in \{\text{acier}, \text{composite1}, \text{composite2}, \text{composite3}\}$;
- δ_2 est la taille du trou à réaliser avec $\delta_2 \in \{2.6\text{mm}, 3.2\text{mm}, 4\text{mm}\}$.

Dans la réalité, la nature du matériau modifie beaucoup plus la tâche que la variation de la taille des trous, car les disparités dans la nature de la matière sont beaucoup plus significatives que les disparités dans la taille des trous à réaliser.

Ainsi, les classes de situations (*acier, 2.6mm*) et (*composite1, 2.6mm*) sont plus éloignées, e.g. dissimilaires, l'une de l'autre que ne le sont les classes de situations (*acier, 2.6mm*) et (*acier, 3.2mm*). Afin de rendre compte de cette différence dans la représentation des classes de situations, deux solutions sont possibles :

- définir les fonctions de transposition F_δ de sorte que l'espace produit, une fois transposé dans les entiers naturels, reflète l'éloignement sémantique entre les situations, quelle que soit la mesure de distance utilisée ;
- définir une mesure de distance sur l'espace des entiers naturels qui prend en compte l'éloignement sémantique entre deux classes de situations.

Ces deux solutions sont équivalentes, la disparité étant reportée sur la structure ou sur la mesure. Cependant, le choix de l'une ou l'autre solution conditionne la mise en œuvre informatique du problème. Nous pensons qu'il est préférable de laisser la main aux concepteurs sur la définition des descripteurs et sur la définition de leur fonction de transposition. En effet, une fois l'espace transposé dans un espace d'entier naturel, il est préférable de manipuler des mesures de distances *standards*.

En outre, établir des fonctions de transposition (par des tableaux associatifs, ou des règles) est plus facile que de définir des mesures de distances. La transposition des descripteurs vers les entiers naturels doit donc être définie lors de la modélisation du profil, la mesure de distance est, quant à elle, définie dans notre représentation.

Nous allons justement justifier notre choix pour une mesure de distance. La distance euclidienne est précise cependant, dans un espace doté d'un grand nombre de dimensions, son calcul s'avère couteux sur le plan computationnel. Ainsi, considérant que les fonctions F_δ ont été définies, nous proposons d'utiliser $d(S_1, S_2)$, la distance entre deux classes de situations S_1 et S_2 , définie par la **distance de Manhattan**. Celle-ci est très rapide à calculer et est exprimée en tant qu'entier naturel. En outre, dans l'optique où on considère l'espace vectoriel comme un graphe, la distance de manhattan entre deux points est strictement équivalente à la distance entre deux nœuds du graphe. Ces différentes propriétés sont de nombreux atouts pour la performance computationnelle, et donc pour assurer le caractère **dynamique** de la personnalisation.

Distance de Manhattan

$$d(S_1, S_2) = \|S_1 - S_2\|_1 = \sum_{i=1}^n |s_1^i - s_2^i|$$

avec S_1 et S_2 des vecteurs tels que $S_1 = (s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^n)$ et $S_2 = (s_2^1, s_2^2, \dots, s_2^n)$

Un autre problème venant de la génération de l'espace S provient de l'**incongruité** que peuvent avoir certaines classes de situations. En effet, tous les vecteurs de descripteurs ne sont pas valides du point de vue écologique : ils décrivent des classes de situations qui ne peuvent pas exister dans un contexte réel. Par exemple, dans l'exemple précédent, il est impossible de percer des trous de 4mm dans un matériau composite. L'espace \mathcal{S} est donc associé d'un ensemble de vecteurs à exclure. Dans la suite de ce chapitre, lorsque nous mentionnerons l'espace des classes de situations, nous nous référerons implicitement à l'**espace des classes de situations valides**.

Exemple

Afin de faciliter la compréhension, nous proposons d'illustrer notre propos au travers d'un exemple simple. Considérons un domaine d'application lié au perçage de trous dans des barques d'avions. Les procédures et les conditions de réalisation de cette tâche diffèrent selon la taille des trous à percer et le matériau utilisé. Nous définissons donc deux descripteurs : δ_{Taille} et $\delta_{Matériau}$.

$$\begin{aligned} \delta_{Taille} &\in \{"2.6", "3.2", "4.5"\} \\ \delta_{Matériau} &\in \{"Acier", "Composite1", "Composite2", "Composite3"\} \end{aligned}$$

Nous disposons des fonctions adéquates f_{Taille} et $f_{Matériau}$ allant des ensembles de définitions respectifs vers \mathbb{N} . Une représentation graphique de l'espace pour ce domaine est proposée par la figure 7.1. Les situations grisées sur cette figure sont des situations incongrues ($S_8, S_{10}, S_{11}, S_{12}$).

Soient les classes de situations $S_3 = \{"2.6", "Composite2"\}$ et $S_9 = \{"4.5", "acier"\}$; la distance de Manhattan se calcule comme suit :

$$\begin{aligned} d(S_3, S_9) &= \|S_3 - S_9\| \\ d(S_3, S_9) &= \sum_{i=1}^n |s_{3i} - s_{9i}| \\ d(S_3, S_9) &= |f_{Taille}("2.6") - f_{Taille}("4.5")| + |f_{Matériau}("Composite1") - f_{Matériau}("acier")| \\ d(S_3, S_9) &= |0 - 2| + |2 - 0| = 4 \end{aligned}$$

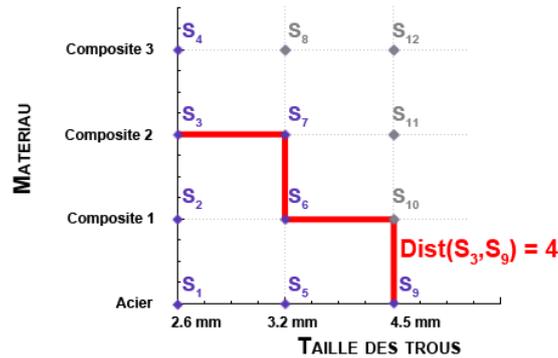


FIGURE 7.1 – Exemple d'espace de classes de situations

7.2.2 Représentation des connaissances sur l'apprenant

Besoins de représentation

Notre objectif est de représenter les connaissances dont le système dispose sur l'état de connaissance de l'apprenant par rapport à un domaine considéré modélisé par la structure proposée en 7.2.1. Les connaissances dont nous disposons peuvent provenir de diverses sources d'informations :

- les résultats d'une **évaluation** faite par le formateur ou d'une auto-évaluation ;
- **les traces d'activités** issues d'utilisations antérieures de l'environnement d'apprentissage ;
- **la trace** en temps réel de la session d'utilisation courante ;
- **les demandes d'assistances** de la part de l'apprenant ;
- **des capteurs physiologiques** (rythme cardiaque, électro-encéphalographie, etc.) ;
- toutes autres sources pouvant donner une information sur la capacité de l'apprenant à gérer une situation et avec quelle difficulté.

Étant issues de capteurs, de l'interprétation du comportement de l'apprenant par un système informatique ou de l'interprétation subjective d'un formateur, les données fournies sont entachées d'un certain nombre de défauts :

- **incertaines** : la capacité de l'apprenant est interprétée avec une incertitude (ex : l'apprenant sait **peut-être** réaliser cette tâche) ;
- **imprécises** : la source d'information peut être un ensemble (ex : le formateur donne des notes différentes à un seul étudiant pour un même sujet théorique associé à une classe de situations) ;
- **ambigües** : la source d'information est sujette à interprétation subjective (ex : l'apprenant s'estime plutôt débutant) ;
- **contradictaires** : des éléments d'information provenant de sources différentes peuvent être en contradiction les uns avec les autres (ex : l'apprenant réalise les tâches correctement alors qu'il demande des assistances) ;
- **incomplètes** : les sources d'informations ne sont pas toujours disponibles, le système doit malgré tout être capable de représenter le manque d'informations pour permettre la prise de décision.

Nous sommes donc à la recherche d'un cadre formel permettant la représentation de ces différentes connaissances sur les informations à disposition.

Choix d'un cadre formel

La problématique majeure qui nous intéresse ici est la représentation de l'imperfection des informations à disposition. Nous avons considéré les cadres formels suivants :

- **la théorie des ensembles** permet de représenter l'imprécision des données. Une information sur une variable se représente par un intervalle de valeurs : $x \in [0, 20]$;
- **la théorie des probabilités** permet de représenter l'incertitude aléatoire liée à la variabilité d'un phénomène. Une information se représente comme une variable affectée d'une valeur à laquelle est associée une mesure de probabilité : $P(x = 10) = 0.8$;
- **la théorie des ensembles flous** [Zadeh, 1965] enrichit la théorie des ensembles avec la prise en compte de l'ambiguïté. Dans la théorie des ensembles, l'appartenance d'un élément dans un sous-ensemble était booléenne, avec les ensembles flous, l'appartenance de l'élément est nuancée grâce à une mesure entre 0 et 1 ;
- **la théorie des possibilités** [Zadeh, 1978, Dubois and Prade, 1988] apporte la gestion de l'incertitude épistémique, qui résulte d'un manque de connaissance, à la théorie des ensembles flous. L'information sur une variable est représentée par deux valeurs, une valeur de possibilité $\Pi(x)$ et une valeur de nécessité $N(x)$ qui fournissent une double mesure pour la vraisemblance d'une hypothèse ;
- **la théorie des fonctions de croyance** [Shafer, 1976] généralise toutes les théories précédentes dans un même cadre formel. Une information sur une variable est représentée par une distribution de masse de croyance sur toutes les hypothèses possibles. Ainsi, on peut décrire que $x \in [10, 20]$ avec une certitude de 60% avec la distribution de masse suivante : $m(x \in [10, 20]) = 0.6, m(\Omega) = 0.4$ où $m(\Omega)$ représente l'incertitude épistémique dite *ignorance*. En plus d'exprimer l'ignorance, il est possible d'exprimer des conflits entre des sources d'informations contradictoires.

En plus de devoir permettre la manipulation de données partielles telles que décrites ci-dessus, il est nécessaire de pouvoir représenter la **quantité d'information disponible** afin d'établir la qualité du diagnostic et donc de prendre des décisions en conséquence. Il faut limiter l'impact de décisions prises dans l'incertitude alors qu'au contraire, des décisions prises avec beaucoup d'informations peuvent être plus audacieuses. En outre, il nous apparaît également nécessaire de disposer d'information sur le **degré de consistance des sources entre elles**, c'est-à-dire le degré auquel les informations reçues s'accordent entre elles. En effet, des sources d'information contradictoires peuvent être des symptômes de *misconception* permettant d'établir un diagnostic. Seul le cadre formel des fonctions de croyance répond à tous ces critères. Nous proposons donc d'utiliser ce cadre pour représenter l'état de connaissance de l'apprenant pour les classes de situations définies dans la section 7.2.1. Plus précisément, nous avons opté pour le **Modèle des Croyances Transférable** (MCT) proposé par [Smets and Kennes, 1994] qui est particulièrement adapté à la problématique de la représentation et de la fusion d'informations.

Formalisation de la théorie des fonctions de croyance

Dans le cadre des fonctions de croyance, l'état du système prend des valeurs discrètes appelées **hypothèses** ω_k et l'ensemble des K hypothèses pouvant expliquer l'état du système est appelé **cadre de discernement**. Celui-ci peut être évalué à partir de **sources d'informations**.

Cadre de discernement

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K\} = \bigcup_{k=1}^K \omega_k$$

Sources d'informations

Des *sources d'informations* fournissent des opinions pondérées représentées par une fonction de croyance concernant l'état réel du système.

Les **fonctions de croyances** peuvent être représentées de différentes manières, nous utiliserons la représentation par une **distribution de masses de croyances** notée m^Ω .

Masse de croyance

$$\begin{aligned} m^\Omega &: 2^\Omega \rightarrow [0, 1] \\ &B \mapsto m^\Omega(B) \end{aligned} \quad (7.2)$$

où l'espace $2^\Omega = \{\emptyset, \{\omega_1\}, \{\omega_2\}, \{\omega_1, \omega_2\}, \dots, \{\omega_1, \dots, \omega_K\}\}$ rassemble tous les sous-ensembles possibles formés des hypothèses et unions d'hypothèses de Ω .

La distribution de masses m sur le cadre de discernement Ω pour la source d'information i se note m_i^Ω . Pour être une distribution de masse, l'équation 7.3 doit être respectée, elle signifie que l'état du système doit nécessairement pouvoir être décrit par les hypothèses de l'univers de discernement.

Distribution de masse de croyance

$$\sum_{B \in \Omega} m^\Omega(B) = 1 \quad (7.3)$$

L'application de ce cadre formel à notre problématique se fait tel que pour chaque classe de situation S_i , le *cadre de discernement* se décrit :

$$\Omega(S_i) = \{Ability(S_i), Disability(S_i)\}$$

avec :

- *Ability* est l'hypothèse selon laquelle l'apprenant est capable de gérer des situations relevant de la classe de situation S_i , ou bien que les connaissances mises en jeu par cette classe de situation sont acquises ;
- *Disability* est l'hypothèse que l'apprenant est incapable de gérer des situations relevant de la classe S_i .

Toutes les hypothèses sur l'état du système ayant été explicitées, on parlera de représentation en *monde clos*.

Pour une classe de situations S , en accord avec la définition 7.2, nous définissons les termes suivants :

- $a(S) = m^{\Omega(S)}(\{Ability\})$ est la masse de croyance sur la **capacité** de l'apprenant à gérer une situation relevant de la classe S ;
- $d(S) = m^{\Omega(S)}(\{Disability\})$ est la masse de croyance sur **l'incapacité** de l'apprenant à gérer une situation relevant de la classe S ;
- $i(S) = m^{\Omega(S)}(\{Ability, Disability\})$ est la masse de croyance sur **l'ignorance** qu'a le système quant à la capacité, ou l'incapacité, de l'apprenant à gérer une situation relevant de la classe S ;
- $c(S) = m^{\Omega(S)}(\{\emptyset\})$ est le **conflit** résultant de la *contradiction* entre les observations pour les situations relevant de la classe S .

avec :

$$a(s) + d(s) + i(s) + c(s) = 1 \quad (7.4)$$

L'espace \mathcal{S} dans lequel chaque classe de situation est munie d'une distribution de masse (a, d, c, i) est l'**espace-zpd**¹.

1. Le terme d'espace-zpd ne doit pas être confondu l'appartenance ou non à la zone proximale de développement (ZPD). L'espace est ainsi nommé du fait qu'il rend possible la détermination de la ZPD.

Définitions des sources d'informations

Dans notre représentation, une source d'information se décrit par le tuple $\langle S, m^\Omega, M \rangle$:

- S est le vecteur permettant de décrire une classe de situation dans l'espace-zpd ;
- m^Ω est une distribution de masse de croyance sur le cadre de discernement que nous avons défini, il s'agit donc d'un quadruplet (a, d, i, c) ;
- M est un ensemble de métadonnées laissées à la discrétion des concepteurs et pouvant éventuellement intervenir dans le processus décisionnel. Les métadonnées peuvent inclure : l'origine de la source d'information, sa date de création, son auteur, des conditions particulières par rapport au moment de la génération de la source d'information...

7.2.3 Mise à jour de l'état de connaissance

Chaque source d'information apporte des éléments de connaissances sur une classe de situation S décrits par une distribution de masse de croyance (a, d, i, c) avec $a + d + i + c = 1$.

Pour établir un profil de l'apprenant, il est nécessaire de combiner les différentes sources d'information à disposition, c'est à dire d'inférer une croyance sur la capacité de l'apprenant à gérer une situation à partir de différentes observations. Ces observations peuvent être simultanées, auquel cas il s'agit de **fusionner** les sources d'informations pour obtenir une croyance valable à un moment donné. Dans le cas contraire, il s'agit en réalité de mettre à jour un état de connaissance qui a potentiellement évolué, il s'agit alors d'un problème de **révision**. Nous avons proposé un **opérateur de fusion sans conflit** et un **opérateur de révision** pour réaliser ces combinaisons dans l'espace-zpd. Dans la suite de cette section, pour chacun des opérateurs nous illustrerons l'intérêt et présenterons une définition ainsi que des propriétés intéressantes.

Fusion sans conflit de sources d'informations simultanées

Illustrations : *la trace de l'activité de l'apprenant au sein de l'environnement montre qu'il réalise les tâches attendues correctement. En outre, les données issues de capteurs physiologiques viennent conforter l'estimation de sa bonne appréhension de la situation.*

La fusion consiste à combiner des sources d'informations simultanées décrivant un même état du système, en l'occurrence l'état de connaissance de l'apprenant, que ces sources soient contradictoires ou concordantes. Ici, le conflit résultant de sources contradictoires reflèterait une difficulté d'interprétation de la situation en cours. Cette information ne présente aucun intérêt pour le diagnostic de l'apprenant. Aussi, nous proposons d'utiliser un opérateur de fusion qui normalise la distribution de masse par rapport au conflit, et donc le fait disparaître. L'intérêt de l'opérateur de fusion sans conflit est de pouvoir calculer une croyance globale sur l'état de connaissance de l'apprenant sur un point précis dans l'espace \mathcal{S} à partir de différentes sources. Le principe de la fusion sans conflit est de conserver le maximum d'information possible en redistribuant l'information contradictoire équitablement sur les différentes hypothèses.

Nous proposons d'utiliser la règle dite **règle orthogonale** de Dempster [Dempster, 1967, Dempster, 1968] pour définir un opérateur de fusion sans conflit.

Règle de Dempster dite règle orthogonale

Soient m_1 et m_2 distinctes et définies sur un même cadre de discernement Ω , supposées fiables.

$$m_{\bar{f}}(A) = m_1(A) \bar{\oplus} m_2(A)$$

$$m_{\bar{f}}(A) = \frac{1}{1-K} \sum_{B \cap C = A \neq \emptyset} m_1(B) m_2(C)$$

où

$$K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) m_2(C).$$

L'intérêt de cette règle est de normaliser les différentes masses de croyances en redistribuant la masse issue de la contradiction entre les différentes sources d'informations. En effet, nous ne souhaitons pas ici conserver l'information sur le fait que les différentes sources sont contradictoires, car cela n'aurait ici aucune utilité. Cependant, nous cherchons à obtenir une croyance de ces sources combinées qui soit représentative de l'état de connaissance de l'apprenant.

En appliquant cette règle à notre domaine, nous pouvons déterminer les formules suivantes :

Opérateur de fusion sans conflit dans l'espace-zpd

$$a_R = \frac{a_1 * a_2 + i_1 * a_2 + i_2 * a_1}{1 - a_1 * d_2 - a_2 * d_1}$$

$$d_R = \frac{d_1 * d_2 + i_1 * d_2 + i_2 * d_1}{1 - a_1 * d_2 - a_2 * d_1}$$

$$i_R = \frac{i_1 * i_2}{1 - a_1 * d_2 - a_2 * d_1}$$

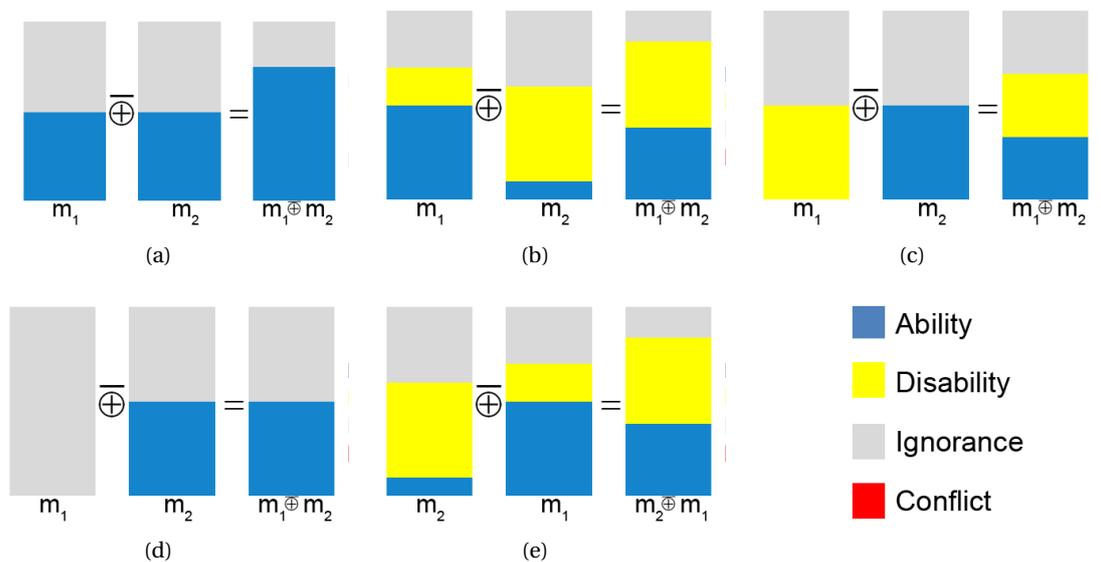


FIGURE 7.2 – Comportement de l'opérateur de fusion

Nous illustrons dans la figure 7.2 un certain nombre de propriétés de l'opérateur de fusion sans conflit qui ont, par ailleurs, été démontrées par [Shafer, 1976] :

- il n'est pas **idempotent**, de manière intuitive, on s'attend à ce que le résultat de la fusion d'information, même identique, soit plus informative que ses sources (figure 7.2 (a)) ;
- il est **commutatif** et c'est le but d'un opérateur de fusion que de pouvoir combiner les croyances sans préférence d'ordre (figure 7.2 (b) et (e)) ;

- il **normalise** les croyances par rapport au conflit, et donc il n'en génère pas (figure 7.2(c))² ;
- **l'élément neutre** est la distribution de masse (*ability* = 0, *disability* = 0, *ignorance* = 1, *conflict* = 0) (figure 7.2(d)).

Révision des informations par de nouvelles sources d'information

Illustrations : *les croyances issues des observations lors d'une session précédente estiment que l'apprenant n'est pas en mesure de gérer une situation particulière, pourtant la trace actuelle montre son aptitude. La croyance doit donc être mise à jour.*

Le mécanisme de révision consiste à **prendre en compte des sources d'informations nouvelles** qui viennent conforter, ou au contraire invalider, des croyances antérieures. L'intérêt de ce mécanisme est de mettre à jour les croyances du système dans l'état de connaissance de l'apprenant en fonction de l'évolution de celui-ci. La révision est guidée par le principe suivant : **maximiser la prise en compte de la nouvelle information en minimisant la perte des informations anciennes**. Dans le cas de la révision, on suppose que l'état du système, ici l'apprenant, a changé — il a appris, ou désappris — et on souhaite mettre à jour notre représentation en conséquence.

Il semblerait qu'aucun consensus sur la meilleure règle de révision à appliquer n'ait été atteint dans l'état de l'art. Nous proposons d'utiliser la règle dite de **révision interne** proposée par [Ma et al., 2011] pour ses propriétés intéressantes que nous présenterons dans cette section.

Soient m_I et m_S , les distributions de masses pour l'état de connaissances antérieures sur une classe de situation S et la nouvelle source d'information sur cette même classe de situation, définies sur le même cadre de discernement Ω :

Règle de révision interne

$$m_R(A) = m_I(A) \otimes m_S(A) = \sum_{A \subseteq B} \sigma(A, B) * m_i(B)$$

avec

$$\sigma(A, B) = \begin{cases} \frac{m_I(A)}{Bel(B)} & \text{pour } Bel(B) > 0 \\ 0 & \text{pour } Bel(B) = 0 \text{ et } A \neq B, \\ 1 & \text{pour } Bel(B) = 0 \text{ et } A = B. \end{cases}$$

$Bel(B)$ est la crédibilité de l'hypothèse B , c'est-à-dire la part de croyance spécifiquement alloué à B

$$bel(B) = \sum_{C \subseteq B, C \neq \emptyset} m(C)$$

L'application de cette définition au contexte de l'espace-zpd permet d'établir les règles de révision des valeurs (a, d, i, c).

2. Une source d'information donne des informations sur les hypothèses (*Ability, Disability* ou les deux), mais ne peut pas contenir de conflit interne puisque le conflit est une mesure de contradiction entre source d'information. Il n'est donc pas nécessaire de s'occuper du cas de la fusion d'information qui serait entâchées de conflit.

Opérateur de révision interne pour l'espace-zpd

$$\begin{aligned} a_R &= \frac{a_I}{a_I + d_I + i_I} * i_S + a_S \\ d_R &= \frac{d_I}{a_I + d_I + i_I} * i_S + d_S \\ i_R &= i_I * i_S \\ c_R &= 1 - a_R - d_R - i_R \end{aligned}$$

(a_I, d_I, i_I, c_I) est la distribution de masses de croyance initialement affectée à la classe de situation S à partir des informations antérieures,

(a_S, d_S, i_S, c_S) est la distribution de masses de croyance pour la nouvelle source d'information,

(a_R, d_R, i_R, c_R) est la distribution de masses de croyance affectée à la classe de situation S et révisées grâce à la nouvelle source.

Nous illustrons dans la figure 7.3 les différentes propriétés de l'opérateur de révision démontrées par [Ma et al., 2011] :

- il n'est pas **idempotent**, ce qui signifie que la révision d'une croyance par une croyance identique renforce la croyance résultante (figure 7.3 (a)) ;
- il n'est **pas commutatif** : la croyance à la droite de l'opérateur, qui correspond à la croyance *la plus à jour* est plus informative que la croyance à la gauche de l'opérateur qui est plus ancienne (figure 7.3 (b) et (e)) ;
- il permet la **remise en cause** des informations antérieures (figure 7.3(c)) : l'ancienne information est minimisée alors que la nouvelle information est maximale dans la croyance résultante ;
- il **ne génère pas de conflit**, en accord avec les objectifs de la révision. Il n'est pas nécessaire de savoir si la nouvelle source d'information est en contradiction avec l'état épistémique puisque nous sommes dans le cas où l'état du système-apprenant a changé et nous cherchons à mettre à jour l'état épistémique (figure 7.3(c)) ;
- il **souligne le conflit existant** : si du conflit, issu d'une contradiction antérieure, se combine avec une autre source ayant également du conflit interne, celui-ci augmente (figure 7.3(f)). Il n'y a dans notre cas aucune crainte de voir le conflit "exploser" — comme on pourrait le constater avec certains opérateurs de fusion — car les nouvelles sources d'information peuvent être normalisées en répartissant la valeur de conflit sur les trois autres masses ;
- l'**élément neutre** est la distribution de masse (*ability* = 0, *disability* = 0, *ignorance* = 1, *conflict* = 0) (figure 7.3(d)) : si on ne dispose d'aucune information a priori (*ignorance* = 1) alors la nouvelle source d'information représente toute la quantité d'information disponible.

7.2.4 Mécanisme d'inférence dans l'espace-zpd

Ne perdons pas de vue que notre objectif principal est d'établir un diagnostic de l'apprenant, y compris sur des situations non rencontrées. Pour cela, il est nécessaire d'estimer l'état de connaissance de l'apprenant sur des situations particulières à partir de sources d'informations issues de situations voisines.

A ce titre, nous proposons un mécanisme d'inférence au sein de l'*espace-zpd*. Celui-ci se déroule en plusieurs étapes pour chaque point S de \mathcal{S} (voir la figure 7.4) :

1. **Fusion sans conflit** des sources d'information par unité de temps pour obtenir les croyances successives sur l'état de connaissance de l'apprenant par rapport à S ;
2. **Révision** successive des croyances pour obtenir l'état actuel de l'apprenant pour S ;
3. **Propagation** des croyances de S à son voisinage ;
4. **Fusion avec conflit** des croyances issues de la propagation.

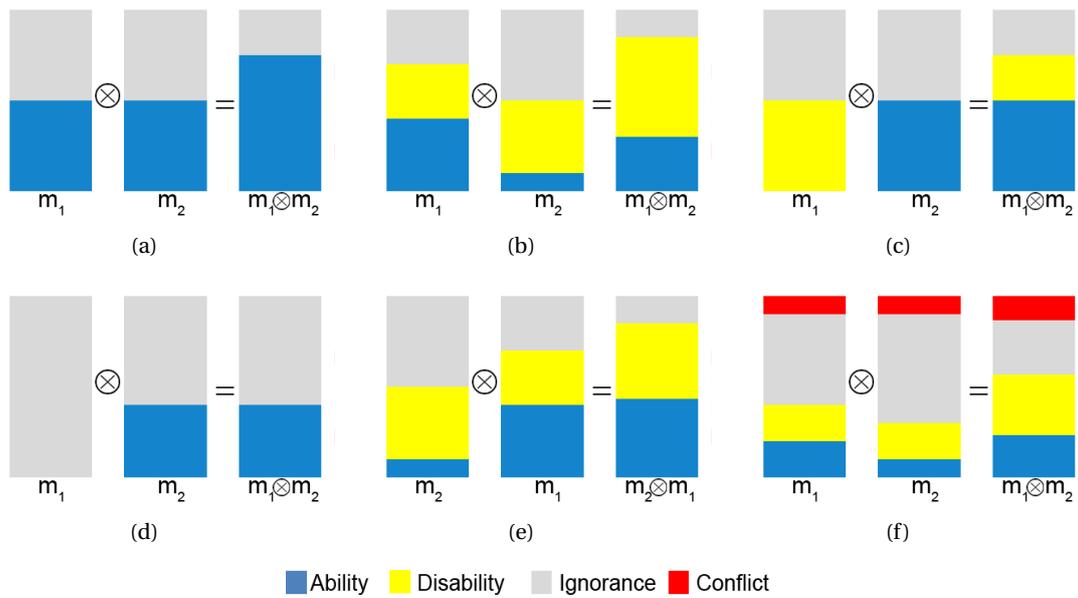


FIGURE 7.3 – Comportement de l'opérateur de révision

Les opérateurs (1) et (2) sont relatifs à la mise à jour de l'état de connaissance de l'apprenant, ils ont été décrits dans les sections 7.2.3 et 7.2.3. Les opérateurs (3) et (4) permettent d'inférer un nouvel état de connaissance à partir de l'état à jour. Nous allons maintenant décrire la fonction de propagation (3) et l'opérateur de fusion avec conflit (4).

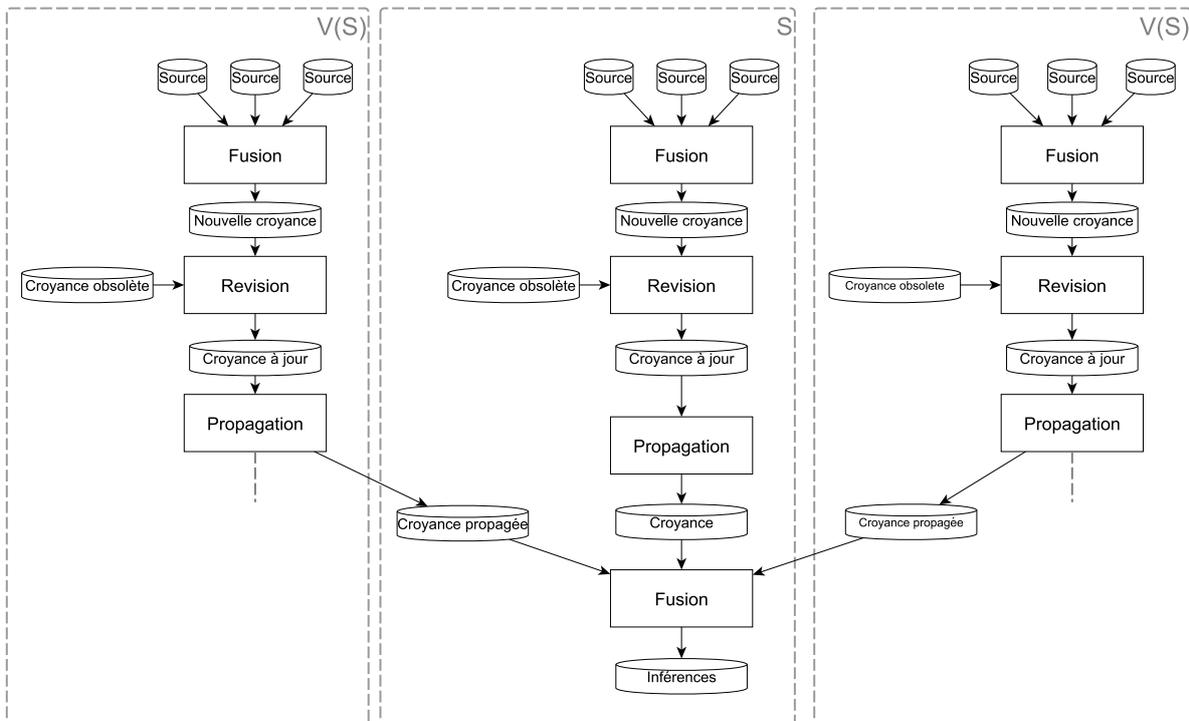


FIGURE 7.4 – Mécanisme d'inférence pour un point S à partir de ses voisins

Propagation des croyances

Illustration : *Si un apprenant sait réagir à une situation donnée, on peut estimer qu'il saura réagir à une situation proche.*

L'objectif de la propagation est d'estimer des croyances sur des classes de situations n'ayant pas été observées à partir des classes de situations voisines pour lesquelles des sources d'information sont disponibles. On utilise ici la structure topologique de l'espace-zpd pour estimer des distances entre des classes de situations. Ainsi, la quantité d'information fournie à une situation S_A par les informations d'une situation S_B est déterminée par la distance qui les sépare. Nous définissons ainsi la fonction de propagation Φ .

Fonction de propagation

$$\begin{aligned} \Phi &: \mathcal{S} * \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{M} \\ (S_A, S_B) &\mapsto \Phi(S_A, S_B) \end{aligned} \quad (7.5)$$

$\Phi(S_A, S_B)$ est la croyance propagée de S_A jusqu'à S_B .

\mathcal{M} est l'ensemble des distributions de masses de croyance e.g. l'ensemble des tuples (a, d, c, i) tel que $a+d+i+c = 1$.

Nous proposons d'utiliser la règle d'**affaiblissement simple** de [Shafer, 1976] pour définir la fonction Φ .

Règle d'affaiblissement simple de Shafer

$$\begin{aligned} m^\alpha(A) &= (1 - \alpha) * m(A), \forall A \subset \Omega \\ m^\alpha(\Omega) &= (1 - \alpha) * m(\Omega) + \alpha \end{aligned}$$

Nous proposons que **la perte d'information sur les croyances a, d, i, c soit quantifiée par la distance qui les sépare**. Ainsi, nous appliquons cette règle à notre espace muni de la distance de Manhattan.

Règles d'affaiblissement pour l'espace-zpd - Φ

$$\begin{aligned} \Phi(S_A, S_B) &= (\Phi_a(S_A, S_B), \Phi_b(S_A, S_B), \Phi_d(S_A, S_B), \Phi_c(S_A, S_B)) \\ a_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_a(S_A, S_B) = (1 - \alpha)^d * a_{S_A} \\ d_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_d(S_A, S_B) = (1 - \alpha)^d * d_{S_A} \\ c_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_c(S_A, S_B) = (1 - \alpha)^d * c_{S_A} \\ i_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_i(S_A, S_B) = (1 - \alpha)^d * (i_{S_A} - 1) + 1 \end{aligned} \quad (7.6)$$

avec d , la distance de Manhattan entre S_A et S_B dans l'espace \mathcal{S} .

Le comportement de la fonction de propagation est présenté dans la figure 7.5. De manière tout à fait intuitive, plus on s'éloigne du point contenant l'information, moins celle-ci est fiable.

Fusion avec conflit

Illustration : *On peut estimer la capacité de l'apprenant à gérer une situation par sa capacité à résoudre les situations voisines. Cependant, dans le cas d'une misconception, la variation d'un des paramètres de la situation (un descripteur) peut entraîner des contradictions.*

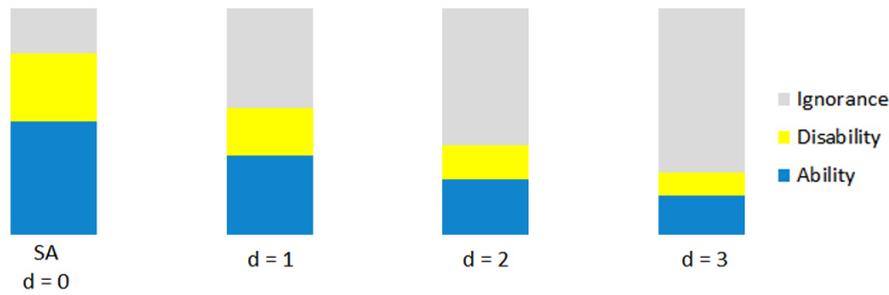


FIGURE 7.5 – Propagation des croyances en fonction de la distance

Pour une classe de situations, toutes les croyances issues des propagations voisines doivent être fusionnées avec les croyances locales (si elles existent) pour inférer l'état de connaissance sur cette classe de situations. S'agissant de fusion, on cherche à combiner des sources d'informations décrivant un même état du système, ici l'état de connaissance de l'apprenant, que ces sources soient contradictoires ou concordantes. La différence avec l'opérateur présenté dans la section 7.2.3 est de deux ordres. D'une part, la nature des sources d'information est différente. Dans l'opérateur de fusion sans conflit, les informations provenaient des observations du système (par des traces d'activité, des capteurs, etc.), ici, les sources d'informations sont issues d'une propagation des observations à des situations proches. D'autre part, la fusion sans conflit veillait à faire disparaître les discordances entre les sources d'informations car celle-ci n'étaient pas utiles. Dans le cas de l'opérateur de fusion avec conflit, la discordance entre les sources d'informations est conservée car elle est le reflet d'une connaissance sur l'apprenant. En effet, si des croyances issues de deux situations voisines sont contradictoires, on peut considérer qu'il y a un problème dans l'apprentissage et que la classe de situation à la croisée de ces deux situations doit faire l'objet d'une attention particulière. Le principe de la fusion est de **maximiser la concordance des sources d'informations (et donc de conforter une croyance) tout en soulignant leurs contradictions potentielles.**

La **règle de combinaison conjonctive** [Shafer, 1976] appliquée au cadre MCT [Smets and Kennes, 1994] répond à nos besoins.

Règle de combinaison conjonctive

Soient m_1 et m_2 distinctes et définies sur un même cadre de discernement Ω , supposées fiables.^a

$$m_f(A) = m_1(A) \oplus m_2(A)$$

$$m_f(A) = \sum_{B \cap C = A} m_1(B) * m_2(C)$$

^a. Nous entendons par là que la quantité de confiance que nous pouvons accorder aux différentes observations est fixe.

En appliquant cette règle à notre domaine, nous pouvons déterminer les formules suivantes.

Opérateur de fusion dans l'espace-zpd

$$a_R = a_1 * a_2 + i_1 * a_2 + i_2 * a_1$$

$$d_R = d_1 * d_2 + i_1 * d_2 + i_2 * d_1$$

$$i_R = i_1 * i_2$$

$$c_R = 1 - a_R - d_R - i_R$$

Nous illustrons dans la figure 7.6 différentes propriétés de l'opérateur de fusion avec conflit dé-

montrées par [Shafer, 1976] :

- il n'est pas **idempotent** (figure 7.6(a)), ce qui encore une fois est attendu car on souhaite disposer d'une plus grande quantité d'information après la fusion ;
- il est **commutatif** (figure 7.6(b) et 7.6(e)), l'ordre dans lequel on fusionne les croyances à un même instant t n'est pas une source d'information en soit ;
- il **génère du conflit** en donnant de l'information sur la quantité de contradiction entre les différentes sources d'informations (figure 7.6(c)) ;
- il **souligne le conflit existant**, si du conflit, issu d'une contradiction antérieure, se combine avec une autre source de ayant également du conflit interne, celui-ci augmente (figure 7.6(f)) ;
- **l'élément neutre** est également la distribution de masse ($ability = 0, disability = 0, ignorance = 1, conflict = 0$) (figure 7.6(d)).

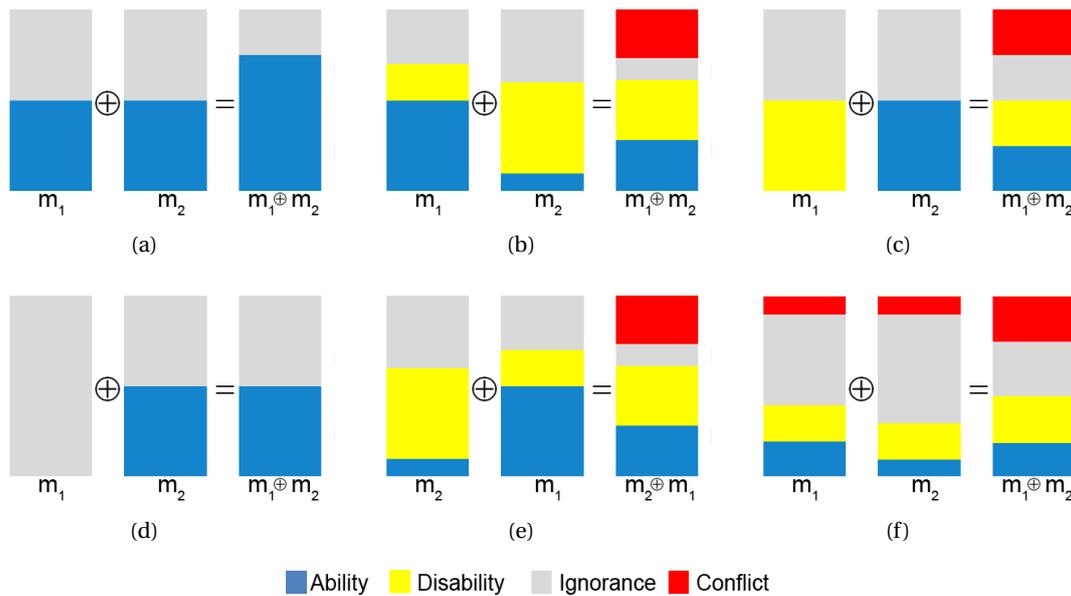


FIGURE 7.6 – Comportement de l'opérateur de fusion

Inférences

Pour chaque point représentant une classe de situation, toutes les croyances issues de propagations voisines sont fusionnées pour obtenir une estimation de la capacité de l'apprenant à gérer les situations décrites par ce point.

Inférence en un point S

$$m_S = \bigotimes_{s_i \in \nu(S)} (\Phi(S, s_i))$$

où m_S est la distribution de masse de croyance inférée pour la classe de situation S ,
 Φ est la fonction d'affaiblissement par rapport à la distance entre les classes de situations,
 $\nu(S)$ est l'ensemble des points à distance de S .

Le tableau de figures 7.7 montre les résultats de la mise à jour et de l'application du système inférentiel dans le cas où l'espace de classes de situations est défini par un seul descripteur de situation. Cet exemple montre comment, à partir d'observation sur l'activité de l'apprenant dans des situations

relevant des classes S5 et S9, il est possible d'évaluer l'apprenant sur des classes de situations S6, S7 avec moins de 50% d'ignorance.

7.3 Modèle décisionnel

L'état de connaissance de l'apprenant est représenté par un espace de classe de situations auxquelles sont associées des croyances sur la capacité de l'apprenant à gérer une situation de cette classe (section 7.2.1). Cette représentation est mise à jour en utilisant des opérateurs de révision et de fusion à partir des différentes observations disponibles (section 7.2.3). Un mécanisme d'inférence permet d'estimer la capacité de l'apprenant au sujet de situations non-rencontrées (section 7.2.4). Nous disposons maintenant d'une représentation suffisamment complète pour permettre la **prise de décision**.

7.3.1 Les enjeux de la prise de décision dans l'espace-zpd

La prise de décision en fonction de l'état de connaissance de l'apprenant vise à déterminer comment personnaliser le scénario de l'environnement virtuel. La personnalisation du scénario peut prendre deux formes. Il peut s'agir en premier lieu d'adapter la situation courante — niveau microscénaristique — et en second lieu de prescrire une nouvelle situation — niveau mésoscénaristique — pour faire progresser le scénario.

Il y a deux cas de prise de décision. Dans le premier cas, elle vise à déterminer si la situation courante doit être complexifiée ou assistée, il s'agit d'une forme d'adaptation au niveau microscénaristique. Dans le second cas, elle vise à déterminer les classes de situations qui présentent un intérêt pour l'apprentissage et qui doivent donc être mise en œuvre par le scénario, c'est ici une forme d'adaptation au niveau mésoscénaristique.

Modèle pédagogique

Le modèle pédagogique définit comment prendre des décisions pertinentes pour l'apprentissage. Nous proposons de modéliser les connaissances pédagogiques par **des contraintes sur les situations** réunies au sein d'**objectifs stratégiques**. Ces derniers évoluent au cours du temps pour permettre l'orchestration des situations d'apprentissage, ils intègrent autant les aspects apprentissages (choix de nouveaux types de situation à mettre en place) que les aspects motivationnels (construction de la confiance de l'apprenant). Par exemple, certains objectifs stratégiques peuvent contraindre au déroulement de situation dans la Zone Proximale de Développement de l'apprenant pour susciter de l'apprentissage, ou au déroulement de situation dans la zone de développement actuel pour mettre l'apprenant à l'aise.

Les contraintes s'expriment à partir des connaissances disponibles au sein de l'espace-zpd sur l'état de connaissance de l'apprenant. Les contraintes sont écrites comme égalités ou des inégalités sur les différentes valeurs à dispositions (masses de croyances (a, d, i, c) et métadonnées notamment).

Des exemples de contraintes sont proposés dans le tableau 7.8. Un exemple d'objectif stratégique et des contraintes qui le composent est proposé dans le tableau 7.1.

Plusieurs objectifs stratégiques peuvent être en vigueur à un moment donné. Certains peuvent être atteints en même temps tandis que d'autres sont contradictoires et donc une certaine classe de situations permettra de remplir les uns et pas les autres. Une bonne prise de décision doit aboutir à une solution maximisant la quantité d'objectifs remplis ainsi que la qualité du respect des contraintes qu'ils intègrent. En d'autres termes, il faut satisfaire à beaucoup d'objectifs mais les satisfaire bien.

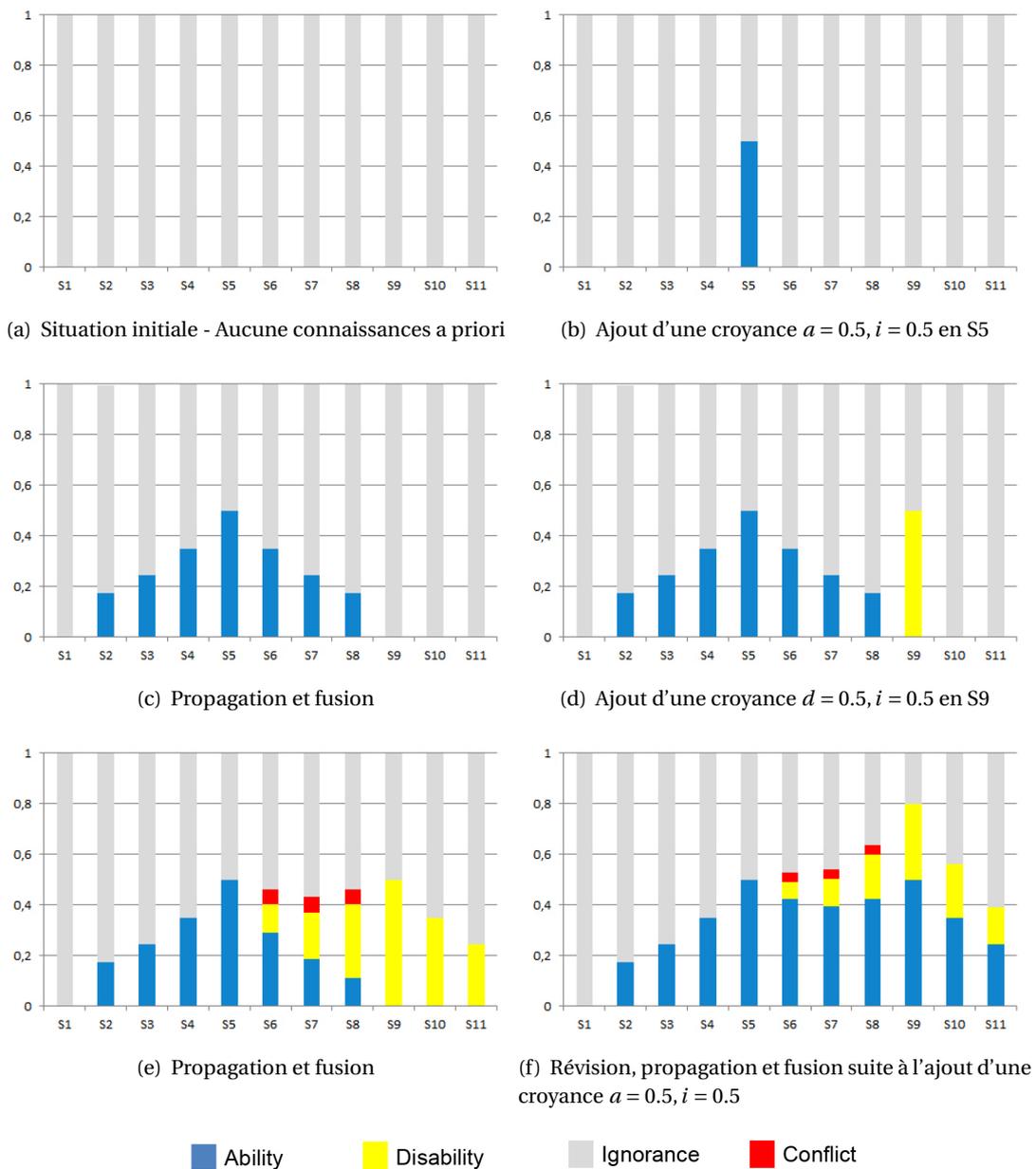


FIGURE 7.7 – Mécanisme d'inférence dans l'espace-zpd

X	D	Exemple de contraintes C
$NombreDeRencontre(S)$	\mathbb{N}	$NombreDeRencontre > 4$
$a(S)$ (Ability)	[0, 1]	$a(S) > 0.5$
$d(S)$ (Disability)		$d(S) > i(S)$
$i(S)$ (Ignorance)		$a(S) + i(S) < d(S)$
s_i (la i -ème composante de S)	$D(s_i)$	$s_i = \max(D(s_i))$

FIGURE 7.8 – Exemples de modélisation de satisfaction de contraintes

Objectif stratégique
$a(S) > d(S)$ Metadonnee.NombreRencontre = 0 Taille = 3.2mm

TABLE 7.1 – Objectif stratégique pour la mise en œuvre d'une classe de situations inédite, difficile et mettant en jeu le descripteur *Taille* avec la valeur *2.8mm*

Prise de décision au niveau microscénaristique

L'enjeu de la prise de décision sur la personnalisation de la situation en cours est de décider si, à partir de la situation dans laquelle se trouve actuellement l'apprenant, une adaptation doit être apportée et si cette adaptation doit être de nature à *complexifier*, ou au contraire à *faciliter* la situation courante.

Les objectifs stratégiques dirigent cette prise de décision. En effet, les critères d'adaptativité d'une situation varient en fonction des besoins - qui peuvent être d'ordre pédagogique ou d'ordre motivationnel. Par exemple, à certains moments, il est plus pertinent d'orienter le scénario vers des situations *difficiles* (voire frustrantes) pour l'apprenant alors qu'à d'autres moments, le scénario visera à mettre l'apprenant en confiance par des situations faciles à maîtriser. Cette difficulté est dirigée par la prise en compte du modèle de progression global.

Nous définissons formellement la prise de décision sur l'adaptation à apporter sur la situation S .

Prise de décision pour l'adaptation

$$\gamma_0 = \Delta(S, \Theta)$$

Θ un ensemble de contraintes à satisfaire.

$\Delta(S, \Theta)$ est une fonction de d'évaluation de la satisfiabilité des contraintes Θ par la situation S .

Si $\gamma_0 > \epsilon$ alors une adaptation $S + \delta$ est nécessaire telle que :

$$\Delta(S + \delta, \Theta) > \epsilon$$

ϵ est une tolérance.

En d'autre termes, une adaptation ne sera faite que si la situation ne répond à aucun objectif stratégique.

Prise de décision au niveau mésoscénaristique

L'enjeu ici de déterminer à partir de l'état des connaissances de l'apprenant **quelle classe de situations mettre en œuvre** afin de satisfaire un ensemble d'objectifs pédagogiques et motivationnels. Le système doit donc déterminer parmi toutes les classes de situations disponibles dans l'espace \mathcal{S} , celles qui maximisent le respect des objectifs stratégiques. Il s'agit donc d'un problème de **satisfaction de contraintes** que l'on peut formaliser comme suit :

Satisfaction de contraintes dans l'espace-zpd

Soit le problème de satisfaction de contraintes $\langle X, D, \mathcal{C} \rangle$

X est un ensemble de variables sur les classes de situations (croyances, métadonnées, valeurs des descripteurs)

D est l'ensemble des domaines de définitions de X

\mathcal{C} est l'union des ensembles de contraintes C tel qu'un élément de C est défini par un couple $\langle t, R \rangle$ où $t \subset X$ et R définit une relation des variables de t vers des éléments de D

Des exemples sont proposés dans le tableau 7.8.

7.3.2 Résolution du problème de satisfaction de contraintes

Dans un cas comme dans l'autre, le résultat de la décision est une classe de situations définie par son vecteur dans l'espace \mathcal{S} . S'il s'agit du niveau microscénaristique, alors cette classe de situation a pour contrainte forte d'être la plus proche possible de la classe de situation courante qui respecte les objectifs stratégiques. Il s'agit donc d'un cas particulier de prise de décision pour la génération d'une nouvelle situation, au niveau mesoscénaristique, que nous allons maintenant décrire. L'espace de recherche pouvant être relativement grand³, il convient d'opter pour des algorithmes de recherche rapides et performants afin de respecter le caractère **dynamique** que doit satisfaire la prise de décision.

Le problème majeur auquel nous nous heurtons pour décrire un algorithme de prise de décision quant à la sélection des classes situations dans l'espace-zpd provient de la variabilité et de la généralité de notre modèle de contraintes. Les contraintes sont de natures **diverses** (elles peuvent être liées aux composantes de la situation, aux métadonnées qui y sont attachées ainsi qu'aux croyances qui y sont associées), varient avec les objectifs stratégiques et, surtout, ne sont pas connues *a priori* dans le cadre de la conception de notre modèle de diagnostic, mais renseignées, par les formateurs et/ou experts pédagogues pendant la phase d'exploitation de l'environnement virtuel. Il est donc nécessaire d'opter pour un algorithme de résolution de contraintes indépendant du domaine. Nous pouvons envisager deux types d'algorithme : un algorithme de recherche glouton ou l'usage d'une métaheuristique.

Algorithme de recherche glouton

L'approche gloutonne consiste à parcourir l'ensemble de l'espace \mathcal{S} et à calculer, pour chaque élément de l'espace de recherche, le degré de satisfiabilité des contraintes. Cependant, nous considérons qu'une *meilleure solution* ne satisfait pas nécessairement tous les objectifs stratégiques mais les satisfait du mieux possible. Ainsi, pour évaluer justement une situation, il faut calculer toutes les possibilités de prise en compte de chacun des objectifs. Dans le cas où il y a sept objectifs, pour chaque élément il faudrait calculer $2^7 = 128$ valeurs de satisfiabilité. De plus, ce calcul devrait nécessairement se faire de manière exhaustive sur tout l'espace. Cette approche pourrait tout à fait être envisageable sur des scénarios relativement circonscrits, mais dans une optique de passage à l'échelle, nous mettrions en péril la contrainte de temps interactif. Nous proposons donc d'adopter une méthode indépendante à l'échelle.

3. L'espace de recherche correspond au nombre de classes de situation pouvant être décrites dans l'espace \mathcal{S} . Celui-ci augmente rapidement avec le nombre de descripteurs. Ainsi, pour un espace de dix descripteurs pour lequel chaque dimension représente une variable pouvant prendre cinq valeurs différentes, on obtient un espace de recherche d'environ dix millions d'éléments

Require: Fonctions d'évaluation F
Require: Objectifs O

```

t ← 0
InitialiserPopulation(P(t))
Evaluer(P(t))
while t ≥ NbIterationMax do
  Pm ← SelectionnerMeilleurs(P(t))
  Pp ← SelectionnerParents(P(t))
  Pc ← Reproduire(Pp)
  Mutation(Pc)
  Evaluer(Pc, F, O)
  P(t+1) ← NouvellePopulation(Pm, Pc)
  t ← t+1

```

FIGURE 7.9 – Algorithme génétique multi-objectifs

Métaheuristique pour la prise de décision dans l'espace-zpd

Une métaheuristique vise à résoudre un problème d'optimisation — nous cherchons la classe de situation-solution qui optimise la satisfaction des contraintes — sans a priori sur le problème en question : l'algorithme est indépendant du problème considéré. Les métaheuristicues sont des méthodes itératives qui ne garantissent pas nécessairement une **solution optimale**, mais elles permettent la découverte de **solutions satisfaisantes** dans un délai raisonnable. Nous proposons d'utiliser une métaheuristique reposant sur un algorithme évolutionnaire qui s'adapte bien à la résolution d'un problème d'optimisation multi-objectifs [Konak et al., 2006]. Plus précisément, nous avons mis en place un algorithme génétique. Pour rappel, un algorithme génétique est une méthode d'optimisation stochastique. Elle vise à faire évoluer une population d'individu (les solutions potentielles) afin d'en améliorer la qualité au regard d'une fonction d'évaluation par rapport au problème d'optimisation considéré.

Description

Nous proposons de mettre en œuvre un **algorithme génétique multi-objectifs à deux niveaux**. Le niveau des objectifs stratégiques sera intégré directement dans le génome de l'individu et le niveau des contraintes sera intégré dans le calcul de la valeur de fitness.

La définition d'un algorithme génétique nécessite de définir les individus qui sont des solutions aux problèmes, leur génome qui est une forme de codage sur lequel portera l'évolution ainsi que les opérateurs d'évolution (croisement et mutation) qui permettent à la population d'évoluer vers de meilleures solutions.

Nous rappelons l'algorithme génétique en figure 7.9.

Individu

Les individus sont les points de l'espace-zpd représentant des classes de situations auxquelles sont associées une distribution de masse de croyance et des métadonnées (nombre de fois que l'apprenant a rencontré une situation de cette classe, date de la dernière rencontre...). Un exemple d'individu est proposé dans le tableau 7.10.

Génome

Le génome, ou codage, d'un individu est décrit par son vecteur de représentation dans l'espace de situations \mathcal{S} concaténé d'un champ de valeurs booléennes correspondant aux objectifs stratégiques

Point de l'espace \mathcal{S}	(0,2,1)
Distribution de masses de croyance	$a = 0.2$ $d = 0.1$ $i = 0.5$ $c = 0.2$
Métadonnées	$NombresDeRencontre = 4$ $DerniereRencontre = 21/04/2014$

FIGURE 7.10 – Exemple d'individu pour l'algorithme évolutionnaire

		Génome d'un individu dans l'espace-zpd								
		Vecteur dans \mathcal{S}			Expression des objectifs					
		S_1	S_2	S_3	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	O_6
Exemples	1	0	1	1	1	1	0	0	1	
	2	2	1	0	1	1	0	0	1	
	3	2	0	0	0	1	1	0	1	
	0	1	3	1	1	1	0	1	0	

FIGURE 7.11 – Exemple de génome d'un individu

en vigueur. Ces valeurs déterminent si un objectif stratégique est satisfait par l'individu représenté par le génome. On dira que **l'objectif est exprimé**. Le génome est donc dynamique puisqu'il est dépendant de la stratégie de sélection mise en place à un moment déterminé. Des exemples de génomes sont proposés dans le tableau 7.11.

Opérateur de croisement

Le croisement entre un individu X et Y est doté d'un génome dont les composantes sont issues aléatoirement de X ou de Y.

Soit X doté du génome $G_x = (0, 2, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1)$ et Y doté du génome $G_y = (1, 0, 2, 1, 1, 0, 0, 1)$. Les génomes suivants résultent de croisements entre X et Y :

- (1,2,0,1,1,1,0,1)
- (0,0,2,1,0,1,0,1)
- (1,2,2,0,0,1,0,1)

Opérateur de mutation

Les mutations se font en modifiant aléatoirement une ou plusieurs composantes du vecteur de génome G. Chaque composante est ainsi, potentiellement, incrémentée ou décrementée. Les génomes suivants résultent de mutation de X doté du génome $G_x = (0, 2, 0, 1, 0, 1, 0, 1)$:

- (1,2,0,1,0,1,0,0)
- (0,1,0,0,1,1,0,1)
- (1,3,1,0,1,1,1,1)

Modes de sélection

La sélection est dite **par rang** : les meilleurs individus d'une génération sont sélectionnés pour générer la génération suivante. Il n'y a pas de hasard dans la sélection des parents.

L'algorithme génétique que nous proposons est de type **élitiste** : les meilleurs individus de la génération courante sont parents de la génération suivante mais sont également conservés dans la population.

Paramètres

La convergence et la vitesse de convergence de l'algorithme génétique sont fortement influencés par les paramètres suivants :

- **Taille de la population** : le nombre d'individus dans une population ;
- **Taille de l'élite** : proportion d'individus conservés d'une génération à l'autre ;
- **Taux de mutation** : probabilité d'application de l'opérateur de mutation sur un gène.

Nous présenterons des résultats sur la manipulation de ces paramètres dans le chapitre 11.

Fonctions d'évaluation

L'élément décisif de l'algorithme génétique est la fonction d'évaluation qui classe les individus. Chaque individu (un point de l'espace-zpd) est évalué pour les objectifs stratégiques exprimés par son génome en calculant une valeur de score des contraintes satisfaites. Formellement, on peut décrire la fonction d'évaluation, également dite de fitness, $F_t(p)$, en vigueur à l'instant t tel qu'exprimée dans la définition suivante.

Fonction d'évaluation d'un individu p

$$F(t, p) = \sum_{O \in \mathcal{O}(t)} O(p) f_O(p)$$

avec

$$O(p) = \begin{cases} 1 & \text{si le gène pour } O \text{ est exprimé,} \\ 0 & \text{si le gène pour } O \text{ n'est pas exprimé.} \end{cases}$$

$$f_O(p) = \sum_{i=0}^{Card(O)} \omega_i f_i(p)$$

ou $\mathcal{O}(t)$ est l'ensemble des objectifs stratégique en vigueur à l'instant t ,

$f_i(p)$ est une fonction de calcul de score pour la contrainte i ,

ω_i est un coefficient de pondération tel que $\sum_{i=0}^{Card(O)} \omega_i = 1$.

Les contraintes sont pondérées par une valeur w_i représentative de leur importance relative au sein d'un objectif.

Exemple

On considère un espace-zpd de deux dimensions relatives à deux critères de performances : *caractéristiques des enfants* et *pratiques sécuritaires*. Après exécution du mécanisme d'inférence, on dispose d'un espace-zpd représenté graphiquement par la figure 7.12. Le code couleur des points symbolisant les classes de situations sur le schéma répond à 4 règles simples :

- la composante bleue augmente avec la valeur $a(S)$ (capacité à gérer la situation) ;
- la composante verte augmente avec la valeur $d(S)$ (incapacité à gérer la situation) ;
- la composante rouge augmente avec la valeur $c(S)$ (conflit des sources d'information) ;
- la transparence augmente avec la valeur $i(S)$ (ignorance).

Le tableau 7.14 propose quelques résultats d'évaluation pour les objectifs stratégiques présentés dans le tableau 7.13.

7.4 Étendre la Zone Proximale de Développement

Le modèle de diagnostic proposé ici permet de sélectionner des classes de situations en accord avec le profil de l'apprenant selon plusieurs objectifs pédagogiques. Selon notre paradigme construc-

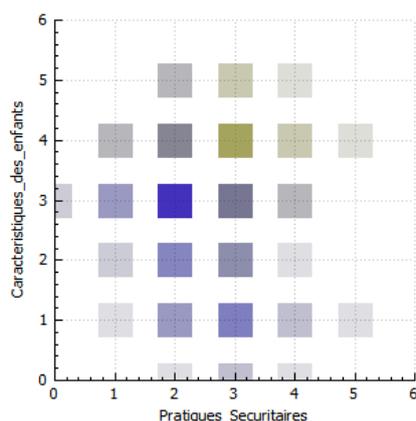


FIGURE 7.12 – Espace-zpd sur deux descripteurs.

Objectif 1		Objectif 2	
Contraintes	ω	Contraintes	ω
$c(S) > 0.3$	0.7	$a(S) = 1.0$	1.0
$NbRencontre = 0$	0.3		

FIGURE 7.13 – Exemple d'objectif stratégique

tiviste, l'objectif général est d'étendre la ZPD de l'apprenant.

Il est donc nécessaire de définir à la fois ce qui relève de la Zone de Développement Actuel — les classes de situations que l'apprenant maîtrise — des situations de la Zone Proximale de Développement - les classes de situations que l'apprenant pourrait maîtriser.

Nous avons défini arbitrairement ces zones comme les ensembles de classes de situations répondant aux contraintes sur les distributions de croyances suivantes.

Ensemble des classes de situations dans la ZPA

$$S \in ZPA \text{ si } \begin{cases} a(S) \geq 0.75 \\ d(S) \leq 0.1 \end{cases}$$

	Génome			Phénotype					
	Vecteur dans \mathcal{S}	Objectifs		a	d	i	c	NbRencontre	Score
	S	O_1	O_2						
p1	(4,3)	0	1	0.08	0.48	0.32	0.12	1	0.02
p2	(4,3)	1	1	0.08	0.48	0.32	0.12	1	0.67
p3	(4,3)	1	0	0.08	0.48	0.32	0.12	1	0.66
p4	(2,3)	0	1	0.34	0.09	0.51	0.06	0	0.66
p5	(2,3)	1	1	0.34	0.09	0.51	0.06	0	0.73
p6	(2,3)	1	0	0.34	0.09	0.51	0.06	0	0.37
p7	(3,3)	0	1	0.33	0.16	0.37	0.14	0	0.66
p8	(3,3)	1	1	0.33	0.16	0.37	0.14	0	1.324
p9	(3,3)	1	0	0.33	0.16	0.37	0.14	0	0.66

FIGURE 7.14 – Exemple de calcul de score pour la prise de décision

Ensemble des classes de situations dans la ZPD

$$S \in ZPD \text{ si } a(S) \geq 0.6$$

Une utilisation simple du système de diagnostic serait d'utiliser la recherche de classes de situations dans la ZPD et de les mettre en œuvre dans l'environnement. Il s'agit alors du mode d'utilisation canonique du modèle de diagnostic que nous avons proposé.

Cependant, l'architecture TAILOR dans laquelle ce processus décisionnel s'intègre, vise à produire un apprentissage en prenant en compte les aspects motivationnels. La progression au sein de la ZPD permet de maintenir le niveau de difficulté adéquat pour favoriser chez l'apprenant l'état de *flow* : elle permet la prescription de classes de situation qui représentent un nouveau défi pour l'apprenant tout en étant à sa portée (voir figure 7.15).

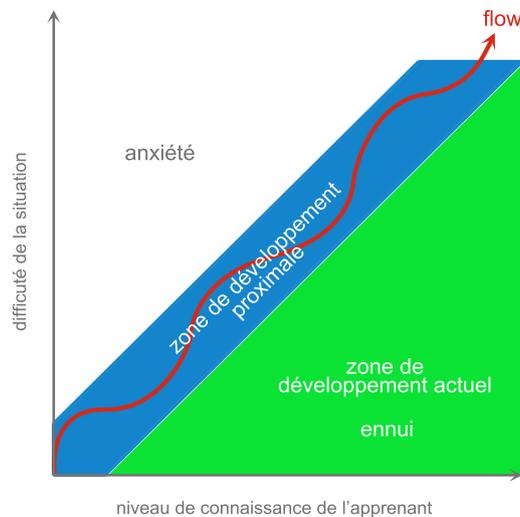


FIGURE 7.15 – Maintien du flow et ZPD

7.5 Bilan

Afin d'opérationnaliser la théorie de la zone proximale de développement, nous avons proposé un espace de classes de situation. Celui-ci repose sur des descripteurs permettant d'identifier l'appartenance d'une situation à une classe. L'association de cet espace avec un modèle de croyance permet de modéliser les aptitudes de l'apprenant. Nous avons défini des opérateurs pour mettre à jour et enrichir la base de connaissances sur l'état de l'apprenant. Le profil de l'apprenant ainsi dressé et mis à jour permet de disposer d'une base de connaissances nécessaire à la **personnalisation** tout en offrant un moyen de naviguer au sein de la **variabilité** des situations possibles. Un modèle pédagogique, décrit par des contraintes, définit les classes de situations pertinentes en accord avec des objectifs stratégiques pour assurer le **contrôle pédagogique**. Ces objectifs peuvent être déterminés avant la session ou au cours de celle-ci par le formateur, mais ils peuvent également être pilotés par un système informatique en accord avec un modèle de progression tel que nous l'avons proposé dans notre architecture globale (voir le chapitre 5). L'utilisation d'une métaheuristique pour la prise de décision permet de s'affranchir de la complexité potentielle du problème et donc, permet un **passage à l'échelle** sur des cas d'application très complexes sans pour autant nuire au **caractère dynamique** de la scénarisation.

Chapitre 8

Instanciation par la génération procédurale de situations à partir de modèles de domaine

“ It is difficult, when faced with a situation you cannot control, to admit you can do nothing. ”
Horseradish, Lemony Snicket

Sommaire

8.1 Définitions	142
8.2 Modèles de connaissances pour la génération procédurale	142
8.2.1 ACTIVITY-DL : un métamodèle pour la description de l'activité	142
8.2.2 CAUSALITY-DL : un métamodèle pour la description des chaînes de causalité	145
8.3 Algorithmes de génération	148
8.3.1 Génération à partir du modèle d'activité	148
Sélection des activités	148
Extraction et agrégation des assertions	149
8.3.2 Génération à partir de la causalité	152
Sélection des événements et des barrières	152
Extraction et agrégation des assertions	152
8.3.3 Cas de l'adaptation microscénaristique	155
8.4 Bilan	155

Les classes de situations sélectionnées lors de l'étape de diagnostic doivent être instanciées par des **situations** pour être mises en œuvre au sein d'un scénario. Cependant, afin de satisfaire à nos contraintes de facilitation de la production des EVAH, il n'est pas souhaitable que la conception et l'écriture de ces situations soient faites - ni explicitement ni exhaustivement - par les créateurs ou exploitants de l'environnement virtuel. La solution à ce problème est donc de générer les situations de manière automatique. Pour autant, la qualité de l'apprentissage passe, dans le paradigme que nous avons choisi, par la **validité écologique** des contenus proposés. Ainsi, le processus de génération des situations doit intégrer les connaissances sur le domaine. Cependant, pour satisfaire à nos objectifs de **modularité** et de **réutilisabilité**, il est inconcevable d'inclure les connaissances sur le domaine dans les algorithmes de génération en eux-mêmes. Voilà pourquoi nous proposons de **générer procéduralement la situation à partir des modèles de connaissance sur le domaine** grâce à des algorithmes reposant sur la sémantique des métamodèles sur lesquels ils reposent. A ce stade, il est nécessaire de

distinguer d'une part, **l'instanciation de la classe de situations** qui consiste à générer un agrégat d'assertions sur le monde pouvant se décrire de concepts et d'instances d'objet du monde, et d'autre part **l'instanciation de la situation**, réalisée au cours du contrôle du scénario, qui vise la mise en œuvre effective de la situation prescrite. Le terme d'instanciation, ici, ne s'applique donc pas au modèle du monde. A l'issue du processus de génération, les agrégats d'assertions peuvent contenir des descriptions **non instanciées** sur le monde considéré.

La fonction d'instanciation d'une classe de situation est subordonnée aux choix des descripteurs. Nous nous appuyons ici sur les modèles de la plateforme HUMANS pour proposer une méthode d'instanciation à partir de modèle de connaissance.

Après quelques éléments de définitions, nous présenterons en section 8.2 les formalismes ACTIVITY-DL et CAUSALITY-DL qui viennent compléter WORLD-DL pour la modélisation du domaine. Dans la section 8.3, nous présenterons les algorithmes que nous avons proposés pour la génération des situations à partir des modèles.

8.1 Définitions

Fonction d'instanciation

$$\begin{aligned} \Psi &: \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{G} \\ S &\mapsto \Psi(S) \end{aligned} \quad (8.1)$$

\mathcal{S} est l'espace des classes de situations,

\mathcal{G} est l'espace de tous les états partiels du monde possibles.

À partir d'une classe de situation S , décrites par un vecteur de descripteurs, la fonction d'instanciation Ψ crée l'ensemble des situations s quiinstancient S (voir figure 8.1). Une situation est une description partielle de l'état du monde qui peut se représenter sous la forme d'un **agrégat d'assertions** en lien avec le modèle du monde. Ainsi, étant donné que nous avons adopté une posture ontologique pour la représentation du modèle du monde, une situation pourra, ici, se décrire par un graphe reliant des instances, ou des concepts, entre eux par des relations étiquetées. Par ailleurs, en accord avec le métamodèle WORLD, il est possible d'accompagner les triplets de primitives qui imposent des contraintes sur les nœuds du graphes.

Situation

Une situation s , instance de S , et appartenant à \mathcal{G} est un tuple $\langle V, A \rangle$

V est un ensemble de variables, A est un ensemble d'assertions sur les éléments de V .

8.2 Modèles de connaissances pour la génération procédurale

En plus du modèle du monde, l'architecture TAILOR s'appuie sur un modèle de l'activité et un modèle de la causalité pour intégrer les connaissances sur le domaine. Nous avons choisi d'utiliser les langages de la plateforme HUMANS, à savoir ACTIVITY-DL et CAUSALITY-DL.

8.2.1 ACTIVITY-DL : un métamodèle pour la description de l'activité

Le langage ACTIVITY-DL proposé par [Barot, 2014] et [Lhommet, 2012] s'inspire du métamodèle HAWAI-DL [Amokrane, 2010]. La représentation de l'activité reprend les travaux de modélisation en

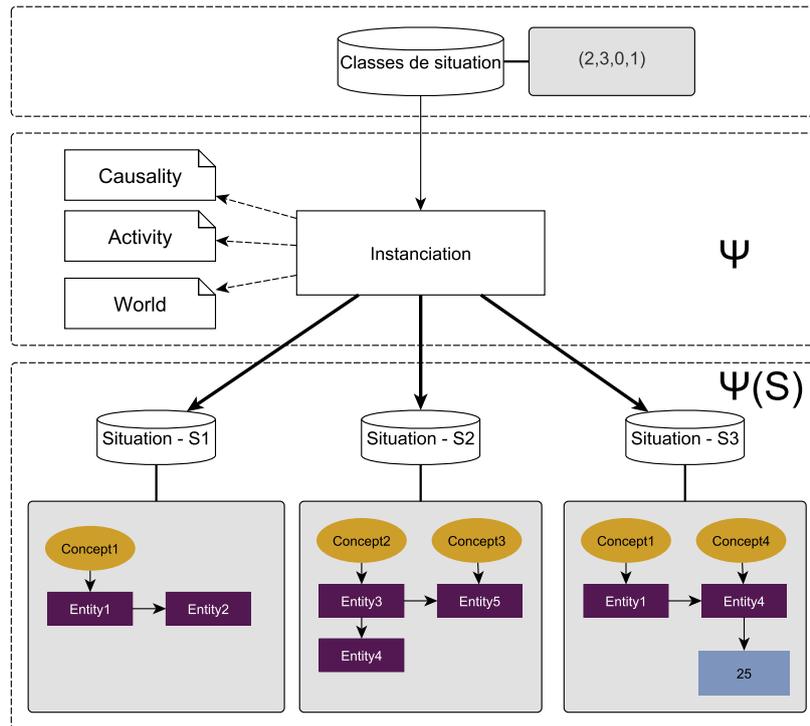


FIGURE 8.1 – Schéma générale de l'instanciation d'une classe de situations

ergonomie cognitive. Ainsi, la description de l'activité s'articule autour de la notion de **tâche**. Il s'agit alors de représenter le déroulement des tâches des opérateurs non pas sous une forme séquentielle, mais sous une forme hiérarchique. Ce type de représentation vise à s'approcher des processus cognitifs en jeu chez les opérateurs. Une tâche se décompose en un ensemble de tâches filles pouvant être liées par des constructeurs logiques qui précisent la nature des relations logiques entre elles, et par des constructeurs temporels qui précisent leur ordonnancement. Les tâches au niveau le plus bas de la décomposition hiérarchique, appelées tâches-feuilles, sont des **opérations** : des actions élémentaires référençant des actions du modèle du monde.

La décomposition hiérarchique est également une décomposition des buts en sous-buts qui s'expriment dans les **conditions de satisfaction** de la tâche, elles définissent dans quel état du monde la tâche peut être considérée comme réussie. Une représentation graphique d'une hiérarchie des tâches est présentée en figure 8.2.

À chaque tâche sont associées des **préconditions** qui doivent être étudiées avant sa réalisation. Elles sont de deux types :

- **les préconditions à examiner** déterminent quelles sont les conditions qui rendent la réalisation de la tâche nécessaire, ou préférable ;
- **les préconditions à réaliser** déterminent les conditions devant être vérifiées pour effectuer la tâche.

Les différents types de préconditions et leur sémantique sont présentés dans le tableau 8.1.

Les préconditions sont des agrégats d'assertions sur le monde ou sur l'activité pouvant être reliées entre elles par des relations ET/OU. Les assertions sur le monde sont des descriptions de l'état du monde par des triplets RDF et des primitives. Les assertions sur l'activité sont des triplets liant des tâches à des états de réalisation (réussie, en attente, en échec...). On pourra par exemple décrire qu'une tâche est réussie lorsque l'une de ces tâches filles, au moins, est réussie, ou lorsqu'un état du monde particulier est atteint.

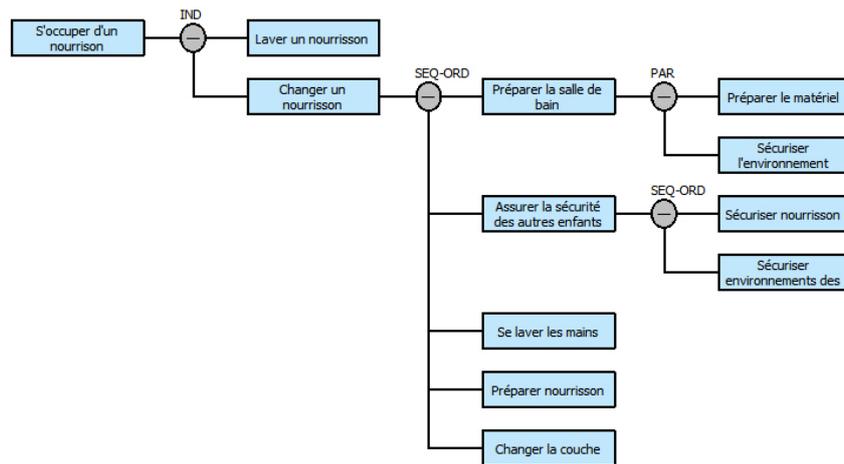


FIGURE 8.2 – Exemple de modèle décrit avec ACTIVITY-DL

Catégorie	Précondition	Description
Conditions à réaliser	Nomologique	Les préconditions nomologiques correspondent à l'état dans lequel le monde doit se trouver pour que la tâche soit physiquement réalisable. Elles incluent les préconditions des règles d'exécution de l'action liée à la tâche, définies dans le modèle du monde. <i>Exemple : Pour réaliser la tâche "Ouvrir la porte", il faut que la porte soit fermée.</i>
	Réglementaire	Les préconditions réglementaires correspondent aux états du monde nécessaires à la bonne réalisation de la tâche selon la procédure. <i>Exemple : Pour réaliser la tâche "Changer la couche", il faut avoir les mains propres.</i>
Conditions à examiner	Contextuelle	Les préconditions contextuelles correspondent à l'état du monde dans lequel il est pertinent de réaliser la tâche. Lorsque ces conditions ne sont pas vérifiées, la tâche peut être ignorée. <i>Exemple : La réalisation de la tâche "Changer la couche" n'est pertinente que si la couche est sale.</i>
	Favorable	Les préconditions favorables correspondent aux états du monde dans lesquelles la réalisation de la tâche sera privilégiée par rapport à d'autres tâches. Elles permettent de choisir entre plusieurs tâches lorsqu'il existe plusieurs alternatives permettant de réaliser une même tâche mère. <i>Exemple : Si les enfants dorment, la réalisation de la tâche "Faire du repassage" est à privilégier.</i>

TABLE 8.1 – Préconditions définies dans ACTIVITY-DL

Une tâche dispose également d'un **contexte** qu'elle transmet à ses tâches filles : il s'agit d'un ensemble de variables dont les valeurs sont transmises dans toute la hiérarchie. L'affectation de ces variables est une instanciation de l'activité. La notion de contexte permet de représenter ce qui est souvent considéré comme implicite dans d'autres modèles ergonomiques. Par exemple, la tâche *Changer le bébé* a un *enfant* dans son contexte. Ainsi, toutes les tâches filles de cette tâche pourront référencer l'*enfant* en question. On permet ainsi de décrire ce qui pourrait être élicité par : *l'enfant auquel il faut retirer la couche est celui qui est en train d'être changé.*

ACTIVITY-DL utilise un système de marqueurs permettant de préciser certains éléments du modèle d'activité. Ils peuvent être binaires ou valués. En ce qui concerne nos travaux nous utilisons des marqueurs valués pour attribuer aux tâches des couples (descripteur, valeur).

Des exemples de tâches et de tâches feuilles sont proposés dans la figure 8.2.

(a) Tâche mère

Task	Secourir enfant d'un étouffement	
Subtasks	Donner trois tapes dans le dos Pratiquer Heimlich	
Constructor	SEQ-ORD	
Context	References	(?child rdf:type :Child)
Conditions	Contextual	(?child :has-state :Chuckling)
	Satisfaction	NoValue(?child :has-state :Chuckling)
Marqueurs	Pratiques sécuritaires : 3 Caractéristiques des enfants : 2 Attente des parents : 2	

(b) Première tâche fille

Task	Donner trois tapes dans le dos	
Operation	Action	DonnerTape
	Ressources	avec-enfant : ?child avec-nombre : 3
Context	References	(?child rdf:type :Child)

(c) Seconde tâche fille

Task	Pratiquer Heimlich	
Operation	Action	FaireHeimlich
	Ressources	avec-personne : ?child
Context	References	(?child rdf:type :Child)

TABLE 8.2 – Exemple de tâche partageant un contexte avec ses sous-tâches

8.2.2 CAUSALITY-DL : un métamodèle pour la description des chaînes de causalité

Le métamodèle CAUSALITY-DL proposé par [Barot, 2014] vise à décrire des chaînes de causalité significatives. Ainsi, il ne décrit pas exhaustivement les changements d'état du monde possibles, comme pourrait le faire un graphe d'état, mais uniquement ce qui est pertinent pour une application donnée. Il repose sur un **graphe orienté acyclique d'événements**, tels que définis dans le chapitre 6, reliés entre eux par des **liens de causalité** ou des **liens de subsumption**.

Les événements du modèle de causalité sont directement liés aux événements décrits dans le modèle du monde. A ce titre, ils peuvent être endogènes ou exogènes, duratifs ou ponctuels. Les liens de causalité caractérisent le fait qu'un événement est un prérequis à l'occurrence d'un autre. Plusieurs liens de causalité peuvent se croiser au sein de portes logiques pour décrire des conjonctions ou des disjonctions d'événements favorables à l'occurrence d'un nouvel événement. Par ailleurs, les relations de causalité peuvent être enrichies par des **barrières**. Une barrière, lorsqu'elle est vérifiée, inhibe la propagation de la causalité. Une barrière est dite **passive** lorsqu'elle décrit un état qui doit être vrai pour inhiber la propagation de la causalité (par exemple : *le portique est fermé*). Une barrière est dite **active** lorsqu'elle référence explicitement une tâche qui doit être effectuée au moment de la propagation pour stopper la chaîne de causalité (par exemple : *Pratiquer la technique de Heimlich*). Une même barrière peut être associée à un ou plusieurs événements. Pour chaque événement, la barrière peut être une barrière de prévention ou une barrière de protection. Les barrières de prévention

apparaissent en amont de l'événement dans la représentation graphique du modèle et empêchent la réalisation de l'événement. Les barrières de protection apparaissent en aval dans le modèle et empêchent les conséquences de l'événement de déclencher à leur tour d'autres événements. Un fragment de modèle de causalité est proposé en figure 8.3.

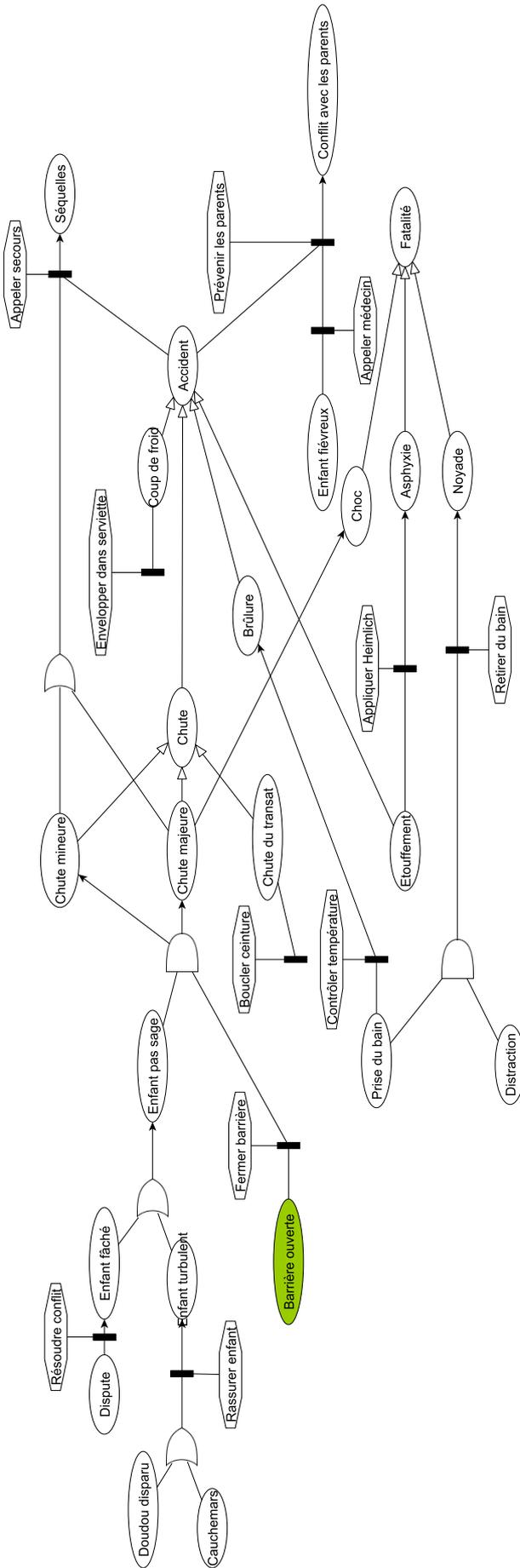


FIGURE 8.3 – Modèle de causalité pour le domaine de la formation des assistantes de vie

8.3 Algorithmes de génération

Dans le cadre de l'architecture TAILOR utilisant les modèles de domaine décrits dans les formalismes HUMANS-DL (WORLD-DL, ACTIVITY-DL et CAUSALITY-DL), la génération d'une situation correspond, en réalité, à la génération de l'état du monde susceptible de faire **dérouler à l'apprenant une certaine activité** qui répond à un certain nombre de descripteurs marqués sur les tâches concernées. La génération peut s'opérer à partir du modèle d'activité et à partir du modèle de causalité.

8.3.1 Génération à partir du modèle d'activité

Nous distinguons d'une part *l'*activité, qui est l'ensemble des comportements observés sur un site particulier et qui est décrite dans un modèle d'activité, et d'autre part *une* activité qui est une succession particulière de tâches décrites dans le modèle d'activité.

La génération d'une situation à partir du modèle d'activité se fait en deux temps. Il y a d'abord une étape de recherche et de sélection des activités qui sont compatibles avec les vecteurs de descripteurs demandés par le diagnostic, et ensuite une étape d'extraction des assertions qui crée un agrégat d'assertions sur le monde. Cet agrégat d'assertions est une description partielle d'état du monde qui rend propice la réalisation d'une activité particulière.

Sélection des activités

Une **activité** est un parcours possible des tâches (qu'ils s'agissent de tâche mère comme de tâches filles) qui soit signifiant, c'est-à-dire qui est le reflet d'une réalité de mise en œuvre. Pour un même modèle d'activité, il existe un nombre fini d'activités qui dépend des possibilités d'alternatives entre les tâches filles. En effet, certaines tâches ne sont opportunes que dans certaines conditions, notamment par le jeu des conditions contextuelles et favorables. Il s'agit alors de déterminer l'ensemble des tuples de descripteurs mis en jeu au cours des différentes activités (renseignés ici par des marqueurs) pour décider de celle à privilégier.

Nous présentons dans l'algorithme 1, une méthode pour générer toutes les activités possibles en prenant en compte les différentes alternatives pouvant naître des préconditions contextuelles et favorables notamment.

Toutes les activités possibles sont ensuite évaluées par rapport à leur capacité à satisfaire les prescriptions issues du diagnostic. L'évaluation se fait par la formule 8.2 : l'intérêt d'une activité dépend de sa capacité à satisfaire les classes de situations qui ont obtenu les meilleurs scores lors du diagnostic et à ne pas satisfaire les classes de situations proscrites.

Evaluation des activités

$$Score(A) = \sum_{s \in S_{prescrites}} rank(s) * p(s, A) - \sum_{\bar{s} \in S_{proscrites}} rank(\bar{s}) * p(\bar{s}, A) \quad (8.2)$$

$p(x, A)$ renseigne si l'activité A relève de la classe de situation x tel que

$$p(s, A) = \begin{cases} 1 & \text{si } s \in A \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$rank(x)$ est une fonction qui retourne le rang de x dans le classement de la prise de décision pédagogique,

$S_{prescrites}$ est l'ensemble des classes de situations à favoriser,

$S_{proscrites}$ est l'ensemble des classes de situations à éviter.

Algorithm 1 Algorithme de création des activités

```

function CREATEACTIVITIES(Task)
  current_activities ← []
  if LEAF(Task) then return [Task]
  if XOR(Task) then
    for all S in SubTasks(Task) do
      for all subtask_activities in CREATEACTIVITIES(S) do
        current_activities.add([Task].append(subtask_activities))
  else
    current_activities.add([Task])
    for all S in SubTasks(Tasks) do
      new_activities ← []
      for all path in current_activities do
        for all subtask_activities in CREATEACTIVITIES(S) do
          new_activities.add(path.append(subtask_activities))
        if ALT(S) then
          current_activities.add(new_activities)
        else
          current_activities ← new_activities
  return current_activities

```

Les activités présentant les meilleurs scores sont sélectionnées pour générer une situation. Nous présentons dans le tableau 8.4 la génération et l'évaluation des activités pour un diagnostic ayant établi les classes de situations suivantes :

— à prescrire :

1. (2, 2, 1, 2, 2, 1, 3)
2. (2, 2, 1, 2, 1, 1, 3)

— à proscrire :

1. (3, 2, 1, 2, 1, 1, 3)
2. (2, 2, 1, 2, 3, 1, 3)

Dans cet exemple, les activités *A4*, *A6* et *A8* sont candidates pour être instanciées en tant que situation à prescrire (voir figure 8.5), tandis que l'activité *A11* a été sélectionnée pour être instanciée en tant que situation à proscrire. Il s'agit ici de prescriptions établies en considérant l'existence d'un moteur de contrôle de scénario. La prescription de plusieurs situations permet ainsi d'augmenter les chances que l'une des situations désirées soient effectives (mise en œuvre dans l'environnement virtuel). De même, la proscription d'une situation n'a de sens que dans le cas d'une simulation avec contrôle, que celui-ci soit total ou minimal (approche SELDON [Barot, 2014]).

Lorsque les activités ont été sélectionnée, l'instanciation des situations se fait par l'extraction et l'agrégation des assertions qui conditionnent leur réalisation (préconditions et postconditions).

Extraction et agrégation des assertions

Le but de la génération des assertions est de créer un état du monde propice au déroulement d'une activité particulière. Pour cela, il s'agit de rendre la réalisation de certaines tâches indispensable et d'empêcher l'opportunité d'autres tâches. La génération des assertions se fait en examinant les préconditions des tâches de l'activité concernée. Parmi les quatre types de préconditions, toutes ne sont pas pertinentes du point de vue de la spécification du scénario.

	S'occuper d'un nourrisson	Laver un nourrisson	Changer un nourrisson	Préparer un nourrisson	Préparer la salle de bain	Préparer le matériel	Securiser l'environnement	Ranger les coupants	Sécher le sol	Assurer la sécurité des autres enfants	Se laver les mains	Préparer nourrisson	Changer la couche	Jouer avec un nourrisson	Descripteurs associés	Score
A1	x	x													[3,2,1,2,1,1,2]	0
A2	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x			[2,2,1,2,1,1,2]	0
A3	x		x	x	x	x	x		x	x	x	x			[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,3,1,3]	0
A4	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,2,1,3]	3
A5	x		x	x	x	x	x		x	x	x				[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,2,1,3] [2,2,1,2,3,1,3]	2
A6	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x			[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,2,1,3]	3
A7	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,2,1,3] [2,2,1,2,3,1,3]	2
A8	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,2,1,3]	3
A9	x		x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,2,1,3] [2,2,1,2,3,1,3]	2
A10	x		x	x	x	x	x			x	x	x	x		[2,2,1,2,1,1,2] [3,2,1,2,1,1,2]	0
A11	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,3,1,3] [3,2,1,2,1,1,3] [3,2,1,2,3,1,3]	-2
A12	x		x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,2,1,3] [3,2,1,2,1,1,3] [3,2,1,2,2,1,3]	1
A13	x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,2,1,3] [2,2,1,2,3,1,3] [3,2,1,2,1,1,3] [3,2,1,2,2,1,3] [3,2,1,2,3,1,3]	0
A14	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x		[2,2,1,2,2,1,3] [3,2,1,2,2,1,3]	2
A15	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,2,1,3] [2,2,1,2,3,1,3] [3,2,1,2,1,1,3] [3,2,1,2,2,1,3] [3,2,1,2,3,1,3]	0
A16	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,2,1,3] [3,2,1,2,1,1,3] [3,2,1,2,2,1,3]	1
A17	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		[2,2,1,2,1,1,3] [2,2,1,2,2,1,3] [2,2,1,2,3,1,3] [3,2,1,2,1,1,3] [3,2,1,2,2,1,3] [3,2,1,2,3,1,3]	0
A18	x													x	[2,2,3,3,1,2,1]	0

FIGURE 8.4 – Évaluation des activités par rapport aux critères pédagogiques

Les **conditions nomologiques** décrivent l'état dans lequel le système doit se trouver pour que la tâche soit réalisable. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, ces conditions ne sont pas pertinentes du point de vue de la spécification du scénario. En effet, elles ne déterminent pas un état dans lequel une tâche doit être réalisée, mais l'état dans lequel elle est réalisable. Bien qu'il faille prendre en compte ces conditions dans la scénarisation pour pouvoir assurer que l'activité déterminée soit faisable, cela se fait pendant l'étape du **contrôle** du scénario.

On peut adopter le même raisonnement pour les **conditions réglementaires**. Celles-ci déterminent comment une tâche doit être réalisée. Pour pouvoir mettre en place les activités sélectionnées, c'est à l'apprenant de s'assurer de la satisfaction de ces préconditions. Les possibilités offertes par l'environnement pour rendre ces conditions vraies seront gérées lors du **contrôle** du scénario.

En réalité, seules les conditions **contextuelles** et **favorables** sont intéressantes du point de vue de

Algorithm 2 Algorithme d'extraction des assertions à partir des arbres d'activité

```

function EXTRACTASSERTION(Activity)
  statements ← []
  no_statements ← []
  satisfaction_conditions ← []
  for all Task in Path do
    satisfaction_conditions.add(GETSATISFACTIONCONDITIONS(Task))
    if GETCONTEXTUALCONDITIONS(Task) not in satisfaction_conditions then
      statements.add(GETCONTEXTUALCONDITIONS(Task))
    if GETFAVORABLECONDITIONS(Task) not in satisfaction_conditions then
      statements.add(GETFAVORABLECONDITIONS(Task))
    for all N in NEIGHBORHOOD(Task) do
      no_statements.add(GETFAVORABLECONDITIONS(N))
      statements.add(GETSATISFACTIONCONDITIONS(N))

```

possibilités d'atteindre ces prescriptions, la description d'une situation doit être la moins contrainte possible. Ainsi, l'étape d'instanciation qui consiste à affecter une instance d'objet du monde à une variable dans une situation doit se faire le plus tard possible.

Nous présentons dans la figure 8.6 des exemples de génération de situations.

8.3.2 Génération à partir de la causalité

L'extraction des assertions à partir du modèle de la causalité se fait au travers des deux éléments constitutifs du graphe, à savoir, les **événements** et les **barrières**. Pour permettre la scénarisation, ceux-ci peuvent, tout comme les tâches, être marqués par des descripteurs.

La base de connaissances liée à la gestion du monde permet de connaître, à tout instant, l'état des différentes chaînes de causalité en informant de l'état d'activation des événements du graphe.

Sélection des événements et des barrières

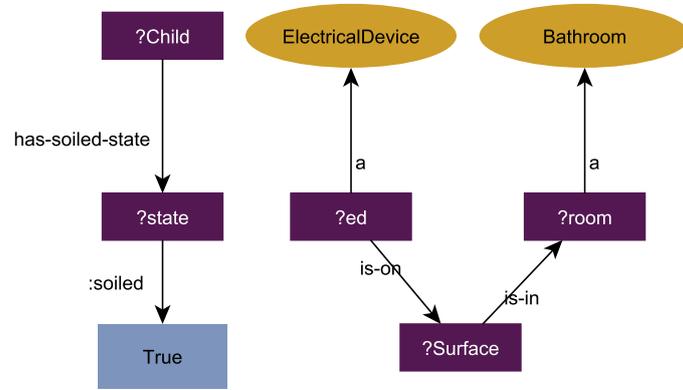
Le graphe de causalité est parcouru pour déterminer tous les événements qui répondent aux critères demandés par les classes de situations issues du diagnostic. Les chemins entre l'état du monde courant (défini par les événements signifiant dans CAUSALITY et non pas nécessairement par l'état du monde total) sont vérifiés afin d'assurer qu'il existe un chemin dont chaque étape (événement ou barrière) est compatible avec les contraintes posées.

Les barrières sont sélectionnées de la même manière en parcourant le graphe de causalité pour détecter celles qui répondent aux critères sans pour autant nécessiter un passage par des événements, ou barrières, allant à leur rencontre.

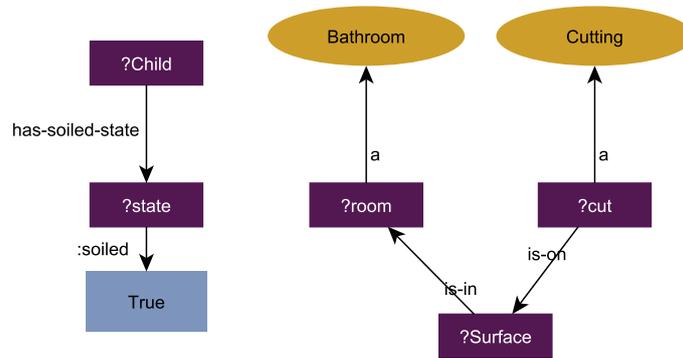
Extraction et agrégation des assertions

Un traitement différent est opéré selon que la sélection pour l'instanciation de la classe de situation est un événement ou une barrière.

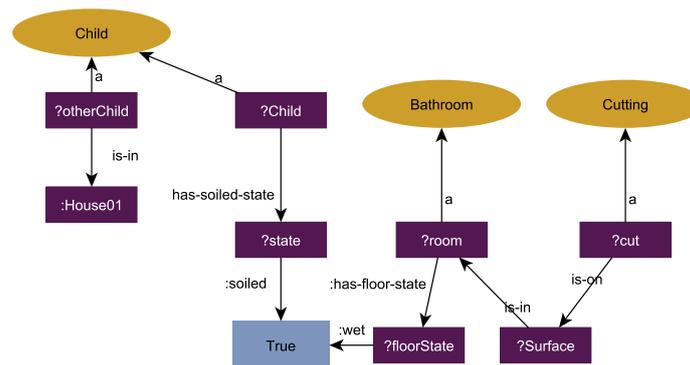
Cas des événements. Les événements peuvent être duratifs (maintien d'un état) ou ponctuels (changement d'un état). Dans le cas de l'**événement duratif** la situation est générée en utilisant les assertions qui caractérisent l'événement concerné dans le modèle de causalité. Dans le cas d'un **évène-**



(a)



(b)



(c)

FIGURE 8.6 – Situations générées pour les activités A4, A6 et A8

Tâche	Conditions		
	Contextuelles	Favorables	Satisfactions
Changer un nourrisson	(?child :has-soiled-state ?state) (?state :soiled world:True)		(?child :has-soiled-state ?state) (?state :soiled world:False)
Préparer le matériel			(?x rdf:type :Vêtement) (?y rdf:type :WipeBox) (?z rdf:type :Diaper) (?x :is-on ?Table) (?y :is-on ?Table) (?z :is-on ?Diaper) (?Table :is-in ?Bathroom) (?bathroom rdf:type Bathroom)
Préparer un pyjama		(:World :has-time ?time) Greater(?time, '20:00')	
Ranger objets coupants	(?x compound-of :Cutting) (?x :is-on ?Surface) (?Surface :is-in ?room)		(?x compound-of :Cutting) (?x :is-inside ?Box) (?Box :is-in ?room)
Ranger les appareils électriques	(?x compound-of :ElectricalDevice) (?x :is-on ?Surface) (?Surface :is-in ?room) (?x :is-plugged-to ?switch)		(?x compound-of :Cutting) (?x :is-inside ?Box) (?Box :is-in ?room) no(?x :is-plugged-to ?switch)
Sécher le sol	(?room rdf:type :Bathroom) (?room :has-floor-state ?state) (?state :wet world:True)		(?room rdf:type :Bathroom) (?room :has-floor-state ?state) (?state :wet world:False)
Assurer la sécurité des autres enfants	(?otherChild rdf:type :Child) notSameAs(?child, ?otherChild) (?otherChild :is-in :House)		

FIGURE 8.7 – Exemples de préconditions et de conditions de satisfaction dans la formation aux assistantes de vie

	Active	Passive
Prévention	Agrégation des préconditions favorables et contextuelles de la tâche liée à la barrière et des assertions liés aux événements antérieurs.	Agrégation des événements antérieurs (les événements prévenus).
Protection	Agrégation des préconditions favorables et contextuelles de la tâche liée à la barrière et des assertions liés aux événements postérieurs.	Agrégation des événements postérieurs (les événements protégés).

TABLE 8.3 – Extraction des assertions pour les différents types de barrières

ment ponctuel, c'est l'événement et ses paramètres qui sont utilisés en tant qu'assertions pour décrire la situation. Il est cependant à noter que le modèle de causalité ne détient pas l'information sur les types des événements, ceux-ci sont déterminés en interrogeant le modèle du monde.

Cas des barrières. Si une barrière est sélectionnée, les assertions caractérisant les événements qui demandent la levée de la barrière constituent les éléments de la situation. Les différents cas de génération sont présentés dans le tableau 8.3. L'agrégation des événements antérieurs ou postérieurs à une barrière se fait de la même manière que pour les événements et en considérant les portes logiques qui les lient. Ainsi, lorsqu'une porte OU est rencontrée, des instances de classes de situations sont créées pour chaque alternative, alors que lorsqu'il s'agit d'une porte ET, les assertions des événements précédents sont agrégées dans une seule situation.

Par exemple, le parcours du modèle présenté en figure 8.3 permet de détecter que la levée de la barrière *Rassurer l'enfant* répond à la prescription pédagogique. Pour favoriser la réalisation des tâches associées à cette barrière, il est nécessaire d'activer l'un ou l'autre de ces événements antérieurs, à savoir *Doudou perdu* ou *Cauchemar*. L'événement *Cauchemar* est également marqué par un vecteur de descripteurs incompatible avec les classes de situation prescrites, les états qui le caractérisent sont donc écartés.

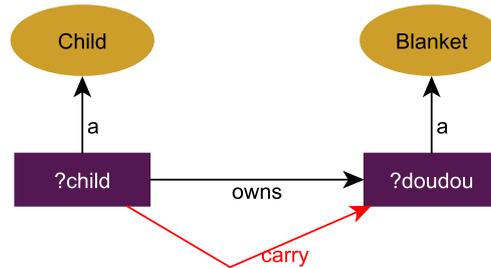


FIGURE 8.8 – Instanciation d’une situation liée à l’événement *Perte du doudou*. Le lien rouge permet de représenter une absence de relation entre deux instances.

8.3.3 Cas de l’adaptation microscénaristique

Les algorithmes que nous avons présentés sont destinés à réaliser la génération d’une nouvelle situation, donc à opérer sur le niveau mésoscénaristique. Cependant, ceux-ci sont tout aussi efficaces pour l’adaptation microscénaristique. En effet, l’adaptation de la situation en cours est en réalité une transition de la situation en cours vers une autre situation qui est très proche. Lorsque l’étape de diagnostic demande une adaptation en fournissant un nouveau vecteur de descripteurs - qui est par ailleurs nécessairement proche de la description de la situation courante - les mêmes algorithmes sont appliqués à un niveau plus local. En ce qui concerne la génération à partir de l’activité, la recherche des activités pertinentes ne se fera que sur les tâches filles de la tâche actuellement en cours de réalisation par l’apprenant. La génération à partir de la causalité se fera en ne considérant que les chemins de causalité liés à l’activité en cours, c’est à dire dans lesquels apparaissent une barrière qui est une tâche fille de la tâche en cours de réalisation.

Dans l’exemple 8.3, si on considère que l’apprenant est actuellement en train de donner le bain à un enfant, la situation caractérisée par l’événement *Prise du bain* peut évoluer vers une situation caractérisée par la levée de la barrière *Retirer l’enfant du bain* qui est nécessaire lorsqu’une *Distraction* survient.

8.4 Bilan

La scénarisation que nous ambitionnons vise à produire du contenu scénaristique **valide sur le plan écologique** de manière automatique. Pour cela, nous avons opté pour une génération procédurale du contenu à partir de modèle de connaissances sur le domaine. Dans le cas précis de l’architecture TAILOR s’appuyant sur les formalismes HUMANS-DL, cette génération se fait à partir d’un modèle d’activité et d’un modèle de causalité déterminant des assertions décrites dans un modèle du monde. Seules les connaissances liées aux métamodèles ont été intégrées dans les algorithmes, ainsi, on assure que la génération se fait de manière indépendante du contexte et ainsi, l’approche est tout à fait **réutilisable**.

La sémantique associée aux métamodèles dont ils dérivent a permis de concevoir des algorithmes de génération. Une partie des traitements, et notamment la génération des chemins, peut être faite en hors-ligne pour permettre une réactivité suffisante au cours de l’exécution. On assure ainsi le caractère **dynamique** de l’instanciation.

Chapitre 9

Processus de diégétisation automatique pour l'enrichissement de situation

“ Sometimes, when you are reading a book you are enjoying very much, you begin thinking so hard about the characters and the story that you might forget all about the author, even if he is in grave danger and would very much appreciate your help. ”
The Unauthorized Biography , Lemony Snicket

Sommaire

9.1	Le récit interactif comme support à l'apprentissage	158
9.1.1	Récit interactif et formation	158
9.1.2	Définitions	159
9.2	Approche	160
9.2.1	Besoins	160
9.2.2	Inspirations	161
9.2.3	Propositions	162
9.3	DIEGETIC : représentation des connaissances liées à la diégèse	163
9.3.1	Besoins	163
9.3.2	Description du métamodèle	164
	Élément - Element	164
	Rôle - Role	164
	Actant - Actant	165
	Fonction - Function	165
	Motif - Pattern	165
	Chemin - Path	166
	Exemple	166
9.4	Diégétisation	166
9.4.1	Principes	166
9.4.2	Le cadrage diégétique	167
	Alignement entre le domaine et la diégèse	167
	Exploration des motifs diégétiques	169
	Vérification de la continuité diégétique	170
9.4.3	Sélections des trames scénaristiques d'intérêt	170
	Charge Emotionnelle	172
	Grammaticalité	173
	Besoins d'ouverture	174

Quantité d'engagement pris	174
9.4.4 Etayage des objectifs scénaristiques pédagogiques	174
9.5 Bilan	175

L'approche de scénarisation que nous avons proposée vise à produire du contenu d'apprentissage personnalisé intégrant des aspects motivationnels. Deux types de procédés principaux peuvent être utilisés pour ajouter des facteurs de motivation au sein d'une simulation. D'une part les procédés de *gamification* ou *ludification* et, d'autre part, les procédés de récit interactif. Les uns et les autres peuvent être utilisés de concert. La ludification vise à incorporer des mécanismes issus des jeux dans un environnement *sérieux*. La comptabilisation d'un score ou l'atteinte de certains objectifs sont de tels mécanismes. L'application de ces procédés dans les domaines d'application auxquels nous nous intéressons présente cependant un inconvénient. S'agissant de domaines complexes, tel que la prévention des risques par exemple, il peut être difficile d'intégrer des facteurs ludiques sans porter atteinte à la crédibilité de l'environnement. En effet, la nature dramatique des situations qui peuvent être rencontrées se prête mal à une mise en contexte ludique.

Au contraire, le récit est un mode de transmission privilégié qui est applicable dans les contextes qui nous intéressent. Nous proposons donc d'enrichir le monde virtuel par la création dynamique d'une fiction autour des événements sans pour autant limiter l'ouverture offerte par des simulations du type bac-à-sable. Nous justifierons dans un premier temps notre choix du récit interactif en tant que support à l'apprentissage puis nous définirons la terminologie qui y est associée. Nous décrirons ensuite l'approche générale qui a guidé nos travaux. Après cela, nous présenterons le modèle de connaissances DIEGETIC pour la représentation des contenus pour le récit interactif. Cette partie sera suivie de la description du processus décisionnel permettant la diégétisation automatique des objectifs scénaristiques. Nous dresserons enfin un bilan de ce qui a été présenté dans ce chapitre.

9.1 Le récit interactif comme support à l'apprentissage

Nous avons fait le choix d'utiliser le récit interactif en tant que composante motivationnelle dans la scénarisation personnalisée pour l'apprentissage. Il convient de justifier ce choix au regard des différents atouts du récit. Il convient en outre de lever les ambiguïtés sur la terminologie liée au récit tant les termes sont utilisés de façon égales dans le langage courant.

9.1.1 Récit interactif et formation

Nous avons décidé de focaliser les aspects motivationnels sur le récit interactif. Celui-ci présente de nombreux attraits pour l'apprentissage. Tout d'abord, le récit est un **support pour les activités cognitives** : il apporte un sentiment de cohésion à nos expériences [Bruner, 2003] et permet à un apprenant d'organiser les connaissances [Schank, 1995]. Au cours du déroulement d'un récit, les spectateurs sont engagés dans un processus actif de réflexion qui peut être ensuite un support à la construction du sens [Dettori and Paiva, 2009].

Le récit permet d'agir sur différents **leviers de la motivation** [Malone and Lepper, 1987]. Tout d'abord, un récit est une source de *curiosité* qui peut susciter l'intérêt de l'apprenant. Le monde décrit par le récit dans un contexte d'apprentissage s'appuie certes sur une réalité, il n'en reste pas moins qu'il est fictif et qu'à ce titre, l'utilisateur sera plus enclin à agir et à expérimenter dans ce contexte. En outre, étant donné que l'on se situe dans le contexte d'une simulation interactive, le récit sera également nécessairement interactif, ce qui permet d'ajouter un niveau de contrôle supplémentaire de l'apprenant sur le contenu qui lui est proposé.

Le récit est, de plus, **une forme d'expression naturelle** [Bruner, 1990] : il peut être compris par des personnes de cultures différents et d'âge différents. Il peut également être mis en œuvre en utilisant

des modalités variées : langage écrit ou oral, images, sons, etc. En particulier, les environnements virtuels rendant compte d'un monde complet avec les modalités sensorielles qui l'accompagnent permettent d'offrir une expérience de récit particulièrement attrayante.

Par ailleurs, le récit est un vecteur d'apprentissage **adapté aux domaines complexes**. Les situations de travail que nous adressons sont des situations complexes dans lesquelles les facteurs humains sont prégnants. Ainsi, si l'on souhaite fournir un apprentissage situé, il est indispensable de prendre en compte et de **retranscrire la dimension parfois dramatique** des interactions humaines.

9.1.2 Définitions

Les termes associés au domaine du *récit interactif* peuvent être source d'ambiguïté car ils sont utilisés de manière indifférente dans le langage courant. Nous rappelons ici les définitions couramment utilisées dans la littérature francophone.

Histoire

Ensemble de faits, d'événements et d'actions pris dans l'ordre chronologique

Dans notre cas, l'histoire constitue donc l'ensemble des événements ou des actions survenant dans l'environnement que ceux-ci soient le fait de l'utilisateur-apprenant ou des différentes entités autonomes de la simulation (personnages virtuels, moteur physique, moteur de scénarisation).

Exemple : *Les Désastreuses Aventures des Orphelins Baudelaires (DAOB) relatent l'histoire de Violet, Klaus et Sunny, poursuivis de place en place par le Comte Olaf.*

Diégèse

L'univers dans lequel se déroule une histoire : elle inclut notamment les relations entre les entités, événements et actions indépendamment de leur ordre chronologique.

La diégèse constitue l'ensemble des éléments qui ne sont pas nécessairement pertinents du point de vue de l'énonciation factuelle des événements mais qui permettent de mettre en lumière des liens de causalité.

Exemple : *L'univers des DAOB est un univers fictif alternatif et anachronique dans lequel s'affrontent deux groupes au sein d'une même société secrète. Un ensemble de faits passés lie les personnages entre eux.*

Récit

Énoncé d'une histoire.

Le récit est une représentation d'une histoire. Celui-ci relate donc les mêmes faits mais sans contraintes chronologiques. Au contraire, un récit peut contenir des artifices temporels (flashbacks, bond dans le temps...) pour créer du suspense ou susciter la curiosité du spectateur. Par ailleurs, le récit peut se faire du point de vue d'un personnage particulier.

Exemple : *L'histoire des Orphelins Baudelaire est énoncé par Lemony Snicket sur la base des indices retrouvés au cours de son enquête.*

Dans un environnement virtuel, le récit se construit par l'interaction de l'utilisateur avec le système et par les comportements des entités autonomes.

Narration

Processus de présentation d'un récit.

La narration relève de tous les procédés stylistiques ou médiatiques utilisés pour présenter le récit.

Exemple : *L'auteur des DAOB adopte un ton particulièrement cynique et peu encourageant tout en laissant la part belle à l'humour noir.*

Le terme de narration fait souvent l'objet d'un abus de langage. Notamment, l'expression *narration interactive*, qui se confond volontier avec le récit interactif, décrit de manière générale tous les travaux qui visent à produire des histoires de manière plus ou moins interactive.

Notre objectif est d'agir sur le niveau diégétique essentiellement. Nous partons du principe que la présentation du récit sera faite de manière **expérientielle**, c'est à dire que l'histoire sera *vécue* par l'utilisateur-apprenant au sein de l'environnement virtuel, sans être nécessairement racontée. Ainsi, nous ne considérons pas les moyens liés à la mise en scène du contenu (narration verbale, jeu de caméras, ambiance sonore). Nous visons à produire les éléments diégétiques qui permettent de mettre en lumière une histoire émergeant des processus autonomes de l'environnement. Toutefois, l'intervention se fait au niveau du scénario, qui d'après nos définitions, se confond avec l'histoire. Nous pouvons donc considérer que notre travail se situe, en fait, à la fois sur le plan diégétique et sur le plan de l'histoire.

Nous proposons ici un modèle permettant la construction d'une **diégèse** autour des faits relatés dans l'environnement virtuel, **l'histoire**, afin de permettre à l'utilisateur de vivre une expérience de **narration interactive** : l'histoire se crée devant lui et se modifie, notamment, au regard de ses actions.

9.2 Approche

9.2.1 Besoins

Nous avons vu que la création d'un récit autour du scénario d'apprentissage pouvait permettre d'améliorer l'apprentissage. Nous souhaiterions donc mettre en œuvre des mécanismes qui permettront la création de ce récit sans pour autant nuire aux nécessités pédagogiques. Or, dans les environnements de type simulation ouverte qui nous intéressent, une histoire est déjà en train d'émerger. Étant donné la nature fortement autonome de la simulation, on ne peut contrôler directement cette histoire sans nuire à sa cohérence. Cependant, nous avons fait le choix de séparer la spécification et le contrôle du scénario. Nous partons donc du principe qu'il existe un contrôle limité permettant potentiellement d'atteindre les objectifs scénaristiques prescrits (approche SELDON). Or, ce contrôle est minimal afin de conserver la cohérence du fonctionnement du monde. Les possibilités d'intervention directement sur l'histoire sont donc limitées. À ce titre, nous proposons de nous situer plutôt sur le plan de la diégèse, l'univers dans lequel se déroule l'histoire, plutôt que sur le plan de l'histoire. Ainsi, plutôt que de contrôler directement l'histoire, nous allons modifier la diégèse pour qu'un observateur du scénario le considère d'un certain œil.

Pour cela, il nous faut tout d'abord disposer d'un mode de représentation du contenu diégétique, c'est-à-dire un modèle permettant de décrire de quoi les éléments d'une diégèse doivent être faits. Cette représentation doit répondre à nos objectifs de facilitation de la production d'un environnement virtuel pour la formation. Ainsi, il devra permettre la **maintenabilité**, la **réutilisabilité** et le **passage à l'échelle**. Une fois encore, nous pensons que les modèles de diégèse doivent être décrits par des experts du *storytelling*. La question de qui sont ces experts reste néanmoins ouverte : il n'est pas acquis que des auteurs d'œuvres non-interactives puissent renseigner ce type de modèle. Cependant, l'essor du récit interactif fait naître un nouveau domaine d'expertise lié justement à la définition d'espace de scénarios plutôt que de scénarios. Ce nouveau type d'expert est celui qui sera considéré pour notre étude. En plus d'un modèle de représentation, il est ensuite nécessaire de disposer d'un processus décisionnel pour déterminer comment appliquer les connaissances diégétiques à la situation en

cours pour créer un récit. Ce récit doit incorporer la composante émergente (le scénario qui se crée par le fonctionnement autonome de la simulation) et la composante contrôlée (le scénario prescrit). Le processus décisionnel nécessite de prendre en compte des critères permettant d'assurer la qualité des scénarios produits.

9.2.2 Inspirations

La question de la création d'une histoire autour d'éléments qui sont, soit générés par un module pédagogique, soit générés automatiquement par le fonctionnement d'une simulation autonome, nécessite de s'attacher autant à la question de génération procédurale du récit, et donc à des considérations informatiques du récit, mais également de s'attacher à ce qui fait la qualité d'un récit.

Pour cela, nous avons articulé notre réflexion autour de trois éléments structurants :

- la représentation des connaissances ;
- les contenus à proposer ;
- l'effet à produire.

La question de **représentation des connaissances** est de savoir comment un récit doit être représenté pour être à la fois facilement décrit par un auteur, donc intelligible mais également interprétable par un moteur décisionnel pour être mis en œuvre dans un environnement informatique. Les formalisations proposées par l'école structuraliste offrent un cadre de représentation intéressant.

[Propp, 1968] est précurseur en la matière avec la *Morphologie du Conte*. Après avoir analysé une centaine de contes russes, il propose un ensemble de 7 rôles (personnages archétypaux) et 31 fonctions (actions significatives). L'apport majeur de ses travaux est l'abstraction offerte par le modèle. En effet, chaque rôle est un concept qui peut être instancié par différents personnages. On dispose ainsi d'une **distinction entre le fond et la forme**. Grâce à cette grammaire, il est possible de représenter n'importe quel conte russe. Bien qu'effectivement limitée au folklore russe, la puissance de la grammaire proppienne est telle qu'elle a fait l'objet de nombreuses opérationnalisations pour générer des récits [Wama and Nakatsu, 2008] [Malec, 2010] [Gervás, 2013]. L'approche conceptualisante de Propp est reprise par les auteurs du courant de la **sémiotique structurale**. Notamment, [Greimas, 1966] généralise tout le modèle proppien et aboutit au **schéma actanciel** (voir figure 9.1). Le récit se constitue d'une quête (qui a un objet) commanditée par un destinataire au bénéfice d'un destinataire. Le sujet (héros) poursuit cette quête. Il est accompagné d'éléments positifs, les adjuvants, et d'éléments négatifs, les opposants.

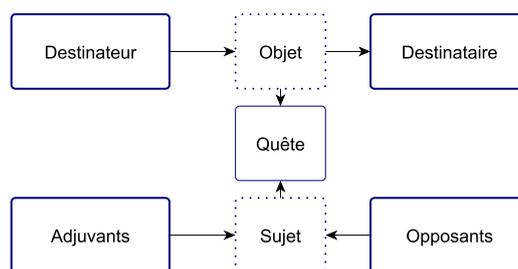


FIGURE 9.1 – Schéma actanciel de Greimas

[Brémond, 1973] propose également une nouvelle formalisation du récit. Cette formalisation est particulièrement adaptée à l'étude du récit interactif. En effet, pour Brémond, chaque étape d'un récit est un point de choix qui ouvre à plusieurs *possibles narratifs*. Construire un récit c'est faire un choix parmi ces possibles. Un récit s'articule autour d'une séquence de trois éléments : la virtualité de l'action (un agent du récit conçoit une action), l'actualisation de l'action (l'agent réalise l'action), et le résultat de l'action. Bien qu'il ne s'agisse pas des contributions majeures de ces auteurs respectifs (Propp, Greimas et Brémond), les caractérisations des différentes entités du récit sous formes de

rôles, actants et fonctions constituent des premières briques de représentation.

La question de l'**effet du récit** est formalisée dès l'ère classique par Aristote [Aristote, 335 av. J.-C.,] et la notion d'**arc dramatique**. Après avoir analysé un grand nombre d'œuvres de ses contemporains, et notamment les tragédies grecques, le philosophe propose un découpage du récit en plusieurs étapes (prologue, épisode, partie chorique, lamentations, épilogue) accompagné d'un **modèle d'évolution de la tension**. Le but du récit est de provoquer, chez le spectateur, un sentiment de tension. Dans le modèle aristotélicien, la tension, qu'on pourrait généraliser par une mesure de l'**attente** du spectateur, est gradative jusqu'à un niveau culminant : le *climax* ou le *paroxysme*. Après quoi, la tension retombe pour revenir à une situation d'équilibre similaire à la situation initiale. Bien que la notion soit couramment utilisée, il n'existe pas de consensus sur la notion de *tension*. Pour [Baroni, 2007], la tension est du **suspense** (effet crée par l'inconnue quant aux effets d'un événement) ou de la **curiosité** (effet crée par l'inconnue quant aux causes d'un événement). La notion est parfois utilisée indifféremment pour parler d'*attente* comme de la *charge émotionnelle* [Delmas, 2009]. Ainsi, comme le souligne [Szilas, 2007], le terme de tension est trop vague pour être utilisé en tant que tel. Il propose de parler de *paradoxe* ou de *conflit*. Nous pensons que plusieurs types d'effets peuvent être produits (surprise, curiosité, paradoxe, conflit), pour généraliser cette notion, nous reprendrons le terme de **propriétés narratives** de [Szilas, 2003].

Il est nécessaire d'ajouter un troisième élément structurant relatif aux contenus à proposer. Nous pensons que l'utilisateur sera plus à même d'adhérer à une diégèse si celle-ci met en jeu des structures fortes qu'il est capable d'identifier. C'est ici qu'intervient le génie de l'auteur. Doté d'un mode de représentation adéquat, il peut fournir l'effet voulu en créant des contenus sous la forme d'unités narratives abstraites, c'est-à-dire des configurations particulières des entités de la diégèse porteuses d'un sens particulier.

9.2.3 Propositions

L'objectif que nous visons est de susciter et maintenir l'intérêt de l'utilisateur en faisant en sorte que les situations d'apprentissage qu'il rencontre racontent une histoire. Cependant, deux difficultés se présentent. Pour commencer, l'apprentissage prend place dans une simulation dite émergente, dans laquelle des événements, provoqués par des entités autonomes, se produisent sans contrôle global. L'histoire créée doit donc pouvoir s'insérer dans ce contexte sans briser la cohérence du fonctionnement du monde. Ensuite, pour faciliter la production de l'environnement virtuel, nous avons adopté une approche de génération procédurale des situations d'apprentissage à partir de modèles de connaissances. Il est donc impossible de définir, de manière scriptée, des récits qui pourraient correspondre aux contenus pédagogiques proposés.

Nous proposons pour cela d'adopter une approche *dirigée par les processus auteurs*, c'est-à-dire de reproduire le processus de création d'un auteur. Il ne s'agit pas de reproduire les processus cognitifs en œuvre, mais de chercher à automatiser certaines étapes du processus créatif dans le cas particulier d'une simulation autonome. Nous nous sommes plus particulièrement attachés au processus de la **diégétisation**.

Diégétisation [Odin, 2000]

Processus de création d'une diégèse à partir et pour les éléments d'une histoire.

Il s'agit donc de la fabrication, au cours de l'écriture du récit, de l'univers dans lequel il se déroule¹. La création progressive du monde de la fiction peut se faire par des méthodes que nous qua-

1. Ce n'est pas toujours le cas et notamment en ce qui concerne les œuvres romanesques de grande envergure, l'auteur fabrique une grande partie de l'univers avant de définir l'histoire. Mais, dans tous les cas, certains éléments seront nécessairement ajoutés à l'univers au cours du processus d'écriture. Il y a donc diégétisation également, mais en partant d'un

liférons de constructives et destructives. Les méthodes **destructives** consistent à modifier ce qui a déjà été produit. L'auteur ajoute, altère ou supprime des éléments à la diégèse en fonction des besoins du récit et de la présentation qu'il en fait. Cela n'est applicable que pour les œuvres qui sont délivrées (vue, lue, expérimentée) à l'issue du processus créatif, lorsqu'elles sont terminées : romans, films, jeux vidéo. Les méthodes **constructives** consistent à ajouter des éléments à la fiction, ou à altérer certains éléments de façon mineure en veillant à conserver la cohérence de la diégèse. Cette méthode peut être appliquée dans les cas de *récit inachevé* [Rempulski, 2013], c'est-à-dire des œuvres qui sont en construction tels que les séries télévisuelles, les romans-feuilletons et les récits interactifs. Nous nous situons dans un contexte de formation dans une simulation autonome et interactive. Les méthodes destructives posent un problème vis-à-vis de la cohérence du système. Or, la cohérence du système est une contrainte que nous avons pour respecter la validité écologique des situations rencontrées. A ce titre, les seules méthodes applicables sont les méthodes constructives. Nous proposons donc **d'enrichir progressivement la simulation avec des connaissances liées à une diégèse en construction**. Pour assurer la cohérence, l'enrichissement devra veiller à prendre en compte l'histoire émergente. Nous avons pour cela proposé une méthode de **reconnaissance de trames scénaristiques**. Tant l'enrichissement que la reconnaissance s'appuient sur une démarche de représentation des connaissances. Pour celle-ci, nous nous appuyons sur l'argumentation de [Szilas et al., 2012] pour justifier l'adoption d'une posture structuraliste. En effet, les possibilités d'abstraction et la généricité des représentations structurales permettent d'atteindre un grand pouvoir génératif et donc d'obtenir un grand éventail de contenus malgré un effort de création limité. Dans cette optique, nous avons proposé le métamodèle DIEGETIC, inspiré des approches structuralistes, qui s'appuie sur une représentation ontologique pour décrire des éléments diégétiques de manière abstraite et générique. Cette représentation permet à la fois de constituer un modèle de génération de contenu mais également un modèle pour la reconnaissance de trames scénaristiques. Nous avons également proposé une méthode de reconnaissances de trames scénaristiques dans un environnement virtuel sous tendu par une base de connaissances. La prise en compte de propriétés narratives que le scénario doit satisfaire constitue des objectifs scénaristiques implicites permettant la sélection des trames scénaristiques à favoriser. La diégétisation est opérée par la sélection, en tant qu'objectif scénaristique explicite, d'une instantiation particulière des situations d'apprentissage confortant les trames scénaristiques sélectionnées.

9.3 DIEGETIC : représentation des connaissances liées à la diégèse

9.3.1 Besoins

Une représentation des connaissances sur la diégèse doit permettre de modéliser les différentes entités qui peuplent un récit, les relations que ces entités entretiennent de même que leurs évolutions. Ayant adopté une posture structuraliste, nous souhaitons pouvoir décrire du contenu diégétique à **différents niveaux d'abstraction**. La modélisation doit également être **générique**, c'est-à-dire complètement indépendante du domaine dans lequel elle s'appliquera. On permettra ainsi qu'un même modèle diégétique (un modèle décrivant conceptuellement le contenu d'une diégèse) puisse être utilisé pour différentes applications et dans différents domaines.

Un modèle de diégèse doit permettre d'attribuer des rôles à des personnages de la simulation, mais également aux autres entités telles que les objets, les lieux, les événements. En outre, le modèle de diégèse doit permettre de décrire des motifs diégétiques, des configurations particulières d'entités et de relation diégétique qui sont susceptible de véhiculer un sens particulier.

Il s'agit en réalité de rendre possible la description de ces situations à un niveau suffisamment abstrait pour être applicable à tout contexte sans en perdre le sens. Notamment, nous nous sommes intéressés aux travaux de [Politi, 1895] pour qui l'ensemble des histoires que l'Homme peut créer, peut être

décrit par une combinaison de trente-six situations dramatiques fondamentales. La description de ces trente-six situations dramatiques a été un objectif guidant la construction du métamodèle DIEGETIC pour la représentation du contenu diégétique. Ces différents besoins nécessitent en fait que la représentation dispose d'une grande **expressivité**, tout en étant **intelligible** par des auteurs humains et également **interprétable** par des moteurs informatiques afin d'être utilisée dans le cadre d'un processus automatique. Pour satisfaire ces objectifs, nous avons une fois de plus opté pour une représentation ontologique.

9.3.2 Description du métamodèle

Afin de représenter le contenu scénaristique lié à l'univers de la fiction, nous proposons le métamodèle DIEGETIC (voir la figure 9.2) reposant sur une structure ontologique. Celui-ci vise à permettre à la fois la représentation des connaissances sur une simulation au travers d'une vue purement diégétique, mais également la représentation des connaissances sur des structures narratives prédéfinies. DIEGETIC s'inspire **en partie** de la formalisation de Claude Brémond et de ses prédécesseurs en ce qu'il reprend les concepts de *rôles*, *d'actants* et de *motifs*.

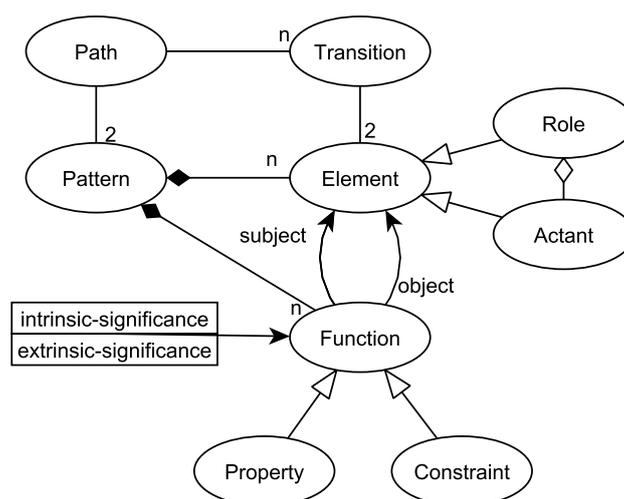


FIGURE 9.2 – Description du métamodèle DIEGETIC

Elément - Element

Les éléments sont les entités élémentaires au regard du contexte de la diégèse. Un élément peut être un rôle ou un actant.

Rôle - Role

Le rôle est un ensemble de possibilités d'action ou de mises en relation. Les rôles permettent de représenter des comportements archétypaux.

Un Traître est capable d'être l'objet d'une relation de confiance tout en étant le sujet d'une relation d'agression.

Actant - Actant

L'actant est une agrégation de rôles pour définir des entités diégétique archétypales. Un actant est une abstraction qui pourra être instanciée par des instances des objets du monde.

Le Fratricide est l'agrégation des rôles Traître, Frère, Meurtrier.

Fonction - Function

Les fonctions sont les liens existants entre d'une part un sujet, qui est l'élément porteur de la fonction, et d'autre part un objet, qui est le paramètre de la fonction. Le sujet est nécessairement un `Element`, et l'objet peut être un autre `Element` ou une donnée exprimée dans un type primitif.

Un couple de valeurs est associé à chaque fonction :

- l'**importance intrinsèque** (`intrinsic-significance`) : l'importance de l'objet de la fonction par rapport à son sujet ;
- l'**importance extrinsèque** (`extrinsic-significance`) : l'importance de la fonction par rapport au contexte dans lequel elle s'exprime.

Motif - Pattern

Un motif est un ensemble d'éléments et de données reliés ensemble par des fonctions. Il permet de définir des configurations diégétiques archétypales qui peuvent être rencontrées au cours d'un récit.

Dans un motif, les fonctions se distinguent en contraintes `Constraint` et en propriétés `Property` :

- Les contraintes sont **nomologiques** : elles représentent l'état du monde qui doit être vérifié pour que la structure narrative dans laquelle elle prend place soit possible du point de vue des règles de fonctionnement du monde.
Pour prendre part à une relation amoureuse, le sujet doit être en vie.
- Les propriétés sont des fonctions vérifiées par une structure narrative. Celles-ci donnent le sens à la structure narrative dans lesquelles elles s'insèrent.
Dans une relation amoureuse, un sujet aime l'autre.

Le motif de la Trahison (illustré en figure 9.3 implique un Traître, un Trahi. Il s'agit de deux éléments reliés par des relations d'alliance mutuelle. En plus, le Traître a une relation de dommage avec le Trahi.

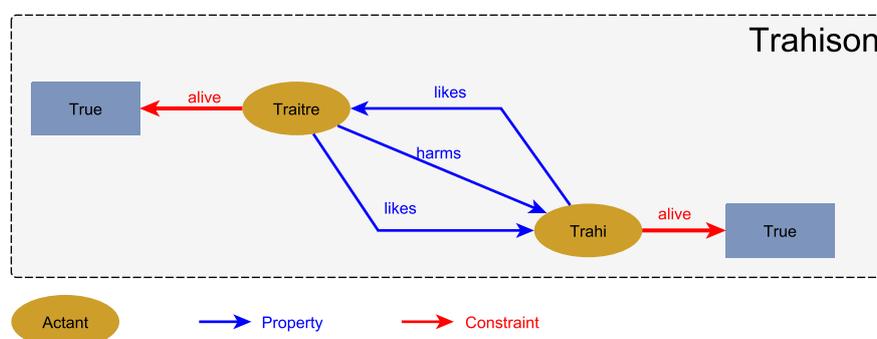


FIGURE 9.3 – Illustration d'un motif de trahison décrit dans le formalisme DIEGETIC

Chemin - Path

Un chemin décrit une évolution possible d'un motif vers un autre. Les transformations opérées sur les différents éléments du motifs sont décrites grâce aux transitions (Transition).

Une situation de Trahison peut évoluer vers une situation de Vengeance. Le Trahi devient le Vengeur et le Traître devient le Coupable.

Exemple

La figure 9.4 propose un exemple de description de deux motifs dans lesquels différentes fonctions (propriétés et contraintes) sont en jeu. Des transitions permettent aux différents actants d'évoluer vers d'autres actants dans un autre motif.

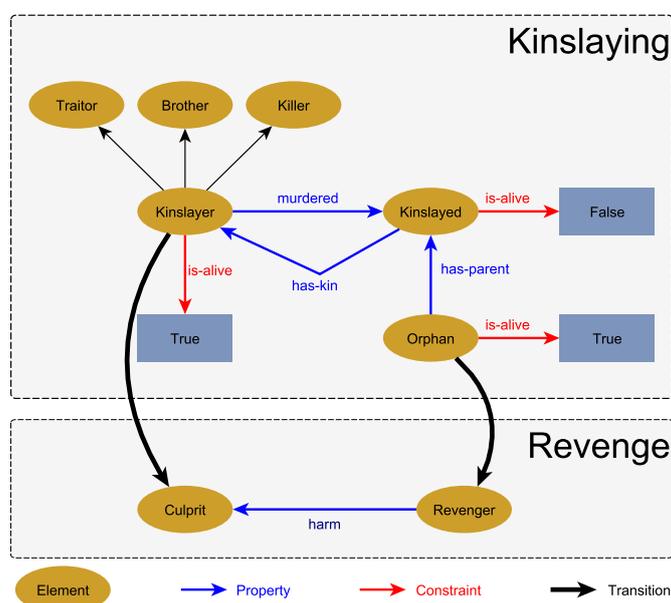


FIGURE 9.4 – Illustration du passage entre deux motifs décrit dans le formalisme DIEGETIC

9.4 Diégétisation

9.4.1 Principes

D'après [Chateau, 1983], la diégèse doit être **consistante** pour qu'un spectateur y adhère. Ainsi, les différentes attributions de rôles faites aux diverses entités du monde doivent rester cohérentes tout au long d'une session (niveau mesoscénaristique), voire, entre les sessions (niveau macrosécénaristique). Pour autant, cela ne signifie pas que les rôles sont immuables, en effet, un changement de rôle est possible dès l'instant où il se justifie par rapport aux règles de la diégèse décrites dans le modèle diégétique. Afin de distinguer la cohérence du fonctionnement du monde de la cohérence liée à la diégèse, nous parlerons dans le second cas de **continuité**. La diégèse repose sur l'implicite, elle se construit au fur et à mesure en accumulant les faits sans qu'il soit nécessaire de rappeler l'historique à chaque état.

Nous proposons d'appliquer ces notions pour étayer la diégèse autour des situations pédagogiques créées lors de l'étape d'**instanciation**. L'une des difficultés réside dans le caractère autonome de la simulation dans laquelle la formation prend place. En effet, des événements non-prévus affectant la

diégèse peuvent se produire dans la simulation. Il faut donc que le processus de diégétisation prenne en compte à la fois la diégèse qu’il a lui même créée mais également celle qui se crée indépendamment de tout contrôle. Cette prise en compte nécessite de reconnaître les **trames scénaristiques diégétiques** dans le déroulement de la simulation autonome.

De manière générale, une trame scénaristique est un ensemble de points clés partiellement ordonnés. [Barot, 2014] utilise cette notion à des fins de contrôle du scénario, mais celle-ci est également adaptée à la **reconnaissance d’un scénario**.

Trame scénaristique

Une trame scénaristique est définie par un tuple $\langle P, L, p_F \rangle$ tel que
 P est un ensemble de points clés,
 L est un ensemble de liens de causalité l entre des éléments de P tels que l est un couple (p_1, p_2) avec $p_1 \neq p_2$,
 p_F est le point clé final.

La figure 9.5 présente un exemple de trame scénaristique diégétique constituée d’instanciation particulière de motifs diégétiques.

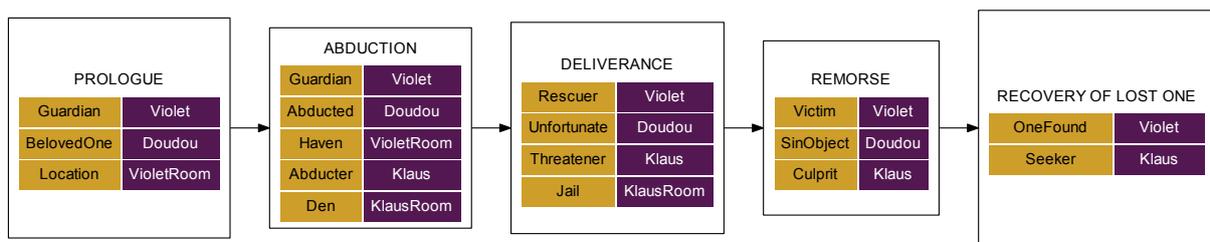


FIGURE 9.5 – Exemple de trame scénaristique

L’enrichissement des objectifs scénaristiques pédagogiques par des aspects narratifs se fait au travers d’un processus de diégétisation automatique. Celui-ci repose sur deux piliers. D’une part, le **cadrage diégétique** qui consiste à reconnaître des trames dans la représentation du monde et d’autre part la **sélection** qui vise à choisir les trames d’intérêt parmi celles-reconnues. Il s’agit ensuite de définir des objectifs scénaristiques qui conforteront les trames d’intérêt. Un schéma général du processus de diégétisation automatique est présenté en figure 9.6.

9.4.2 Le cadrage diégétique

Le cadrage vise à reconnaître dans la séquence d’états du monde une trame scénaristique constituée de motifs narratifs diégétiques qui ont été renseignés grâce au formalisme DIEGETIC. Pour cela, il convient d’inférer une instanciation du modèle diégétique à partir de l’état du monde décrit dans le formalisme WORLD-DL (l’alignement). Ensuite, les motifs narratifs existants dans cette nouvelle représentation sont extraits (l’exploration). Enfin, une sélection est opérée sur cette extraction afin de ne conserver que les trames scénaristiques consistantes (la continuité).

Alignement entre le domaine et la diégèse

Nous rappelons qu’à tout moment de la simulation, les connaissances sur l’état du monde sont représentées au sein d’un modèle sous-tendu par une ontologie dérivée du métamodèle WORLD-DL. Afin de rendre possible la reconnaissance de motifs narratifs dans la base de connaissance de gestion

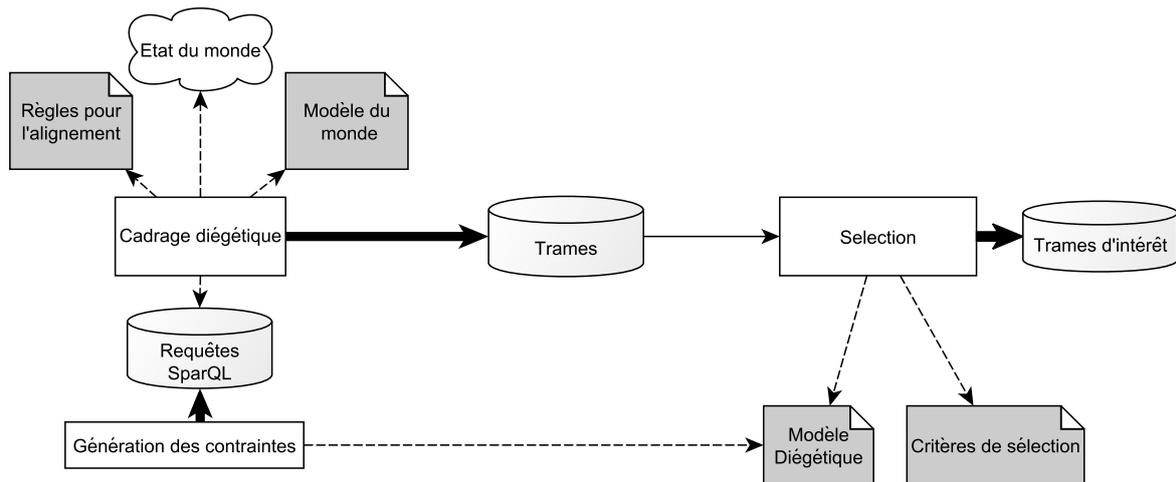


FIGURE 9.6 – Schéma général du processus de diégétisation automatique dans l'architecture TAILOR

du monde, il est nécessaire d'opérer une transposition des faits sur le monde vers les faits sur l'univers de la diégèse. Le but ici d'exprimer les connaissances sur le domaine dans le référentiel de la diégèse. Pour cela, nous proposons d'utiliser des méthodes **d'alignement d'ontologies**.

L'alignement d'ontologie consiste à mettre en relation des concepts, instances et propriétés de deux ontologies. Ces relations peuvent être des équivalences, des incompatibilités ou des subsumptions. L'alignement peut se faire de manière automatique, semi-automatique ou manuelle. Dans le cas d'alignement **automatique**, des mesures de similarités sont calculées entre les différentes entités des deux ontologies et des relations sont déduites à partir de ces valeurs. Les approches **semi-automatiques** permettent de calculer ces similarités tout en utilisant des connaissances de l'expert sur les liens possibles entre les deux ontologies. Enfin, l'approche **manuelle** vise à décrire exhaustivement les liens entre l'ontologie de départ et l'ontologie d'arrivée à travers des règles.

L'approche manuelle est la plus adaptée à notre problème. En effet, ici, nous utilisons des techniques d'alignement d'ontologie pour transposer des connaissances sur un domaine vers des connaissances sur la diégèse. Or, bien qu'on puisse imaginer des règles de très haut niveau légiférant ces transpositions, elles sont issues d'une prise de décision d'un expert et la découverte de ces transpositions informatiquement constitue un pan complet de recherche sur les ontologies.

En outre, l'écriture de règles permet d'avoir un contrôle fin des appariements entre l'ontologie de départ et l'ontologie d'arrivée. Le concepteur peut aisément décrire des associations entre les deux mondes pourvu qu'il dispose d'outils adéquats.

Nous proposons donc de décrire les équivalences entre l'ontologie du modèle du monde et l'ontologie de la diégèse par des règles (voir figure 9.1). Ces équivalences peuvent être diverses :

- entre des concepts : toutes les instances d'un concept C_W du modèle du monde sont des instances d'un concept C_D du modèle diégétique. *Par exemple, si une entité est un enfant, alors cette entité est un personnage;*
- entre les relations : toutes les instances ayant une relation R_W dans le modèle du monde ont une relation R_D . *Par exemple, si deux agents sont frère et soeur alors ces agents sont alliés;*
- entre un graphe et une relation : deux instances d'un graphe G_W dans le modèle du monde sont liées par une relation R_D du modèle diégétique. *Par exemple, les Agent qui ont fait l'action Pratiquer Heimlich sur un autre agent nouent avec ces derniers une relation saved.*

Cette approche montre un intérêt particulier par rapport à nos objectifs de généricité et de réutilisabilité. D'une part, la séparation entre le monde du domaine considéré et le monde de la diégèse permet d'utiliser plusieurs contextes différents pour de mêmes motifs narratifs. Inversement, on peut utiliser des modèles de diégèse différents dans un même domaine si, pour certaines applications, on souhaite privilégier certaines formes narratives plutôt que d'autres. Par exemple, on pourrait envisa-

Alignement

```
[(?x world:has-kind ?y)
->
(?x :has-ally ?y)
(?y :has-ally ?x)]
```

TABLE 9.1 – Exemple de règle d’alignement entre le modèle du monde et le modèle diégétique

ger de n’utiliser que des motifs ayant trait au genre de l’Epopée, ou uniquement des motifs liés aux relations amoureuses. Ceci est donc un atout pour la généricité de l’approche. En outre, comme nous l’avons vu dans le chapitre 6, l’ontologie du monde peut être construite en agrégeant des ontologies. Chacune de ces sous-ontologies peut donc être accompagnée d’un ensemble de règles d’alignement.

A l’issu de l’alignement, on dispose d’un ensemble de connaissances sur le monde issues du domaine considéré et d’un ensemble de connaissances permettant de décrire la diégèse à partir des éléments décrits dans le modèle diégétique. La figure 9.7 montre les relations diégétiques inférées à partir d’un état du monde décrit dans le métamodèle WORLD-DL.

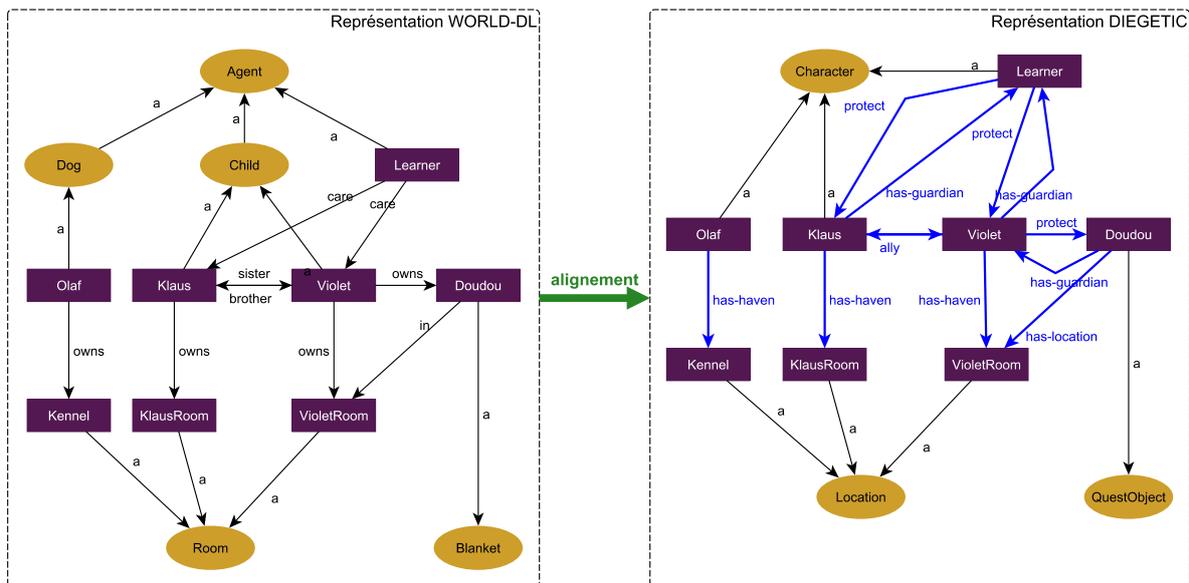


FIGURE 9.7 – Alignement d’ontologie pour l’inférence des connaissances diégétiques

Exploration des motifs diégétiques

L’exploration vise à reconnaître des instantiations possibles de motifs diégétiques (exprimés dans le formalisme DIEGETIC) au sein de l’état du monde exprimés en tant que diégèse. Pour cela, un ensemble de requêtes SPARQL est généré à partir des motifs du modèle diégétique. Celles-ci interrogent la base de connaissances sur le monde pour déterminer les instances du monde qui pourraient s’apparier des motifs. Ainsi, le résultat d’une telle requête est une instantiation possible d’un motif à partir du modèle du monde aligné avec le modèle diégétique.

Cependant, une reconnaissance de ce type ne suffit pas à *diégétiser* puisqu’il n’y a pas d’ajout de nouvelles connaissances diégétiques. En suivant le principe de la diégétisation constructive, l’ajout de connaissances doit se faire en accord avec ce qui est déjà présent dans l’état du monde diégétique. Il s’agit donc, en réalité, de faire du **late commitment** sur la diégèse.

Ce mécanisme proposé par [Swartjes et al., 2008] consiste à permettre la définition, pendant l'exécution de la simulation, de faits qui seront considérés, rétrospectivement, comme vrais depuis l'état initial. L'implémentation du late commitment est ici intégrée à la génération des requêtes SPARQL. Les appariements des éléments d'un motif et les instances de l'état du monde sont possibles dès lors qu'ils ne soulèvent pas une contradiction. Le late commitment portera exclusivement sur les fonctions diégétiques. Les deux cas de possibilité de late commitment sont :

- l'inexistence de fonction entre les instances concernées ;
- la compatibilité entre les relations existant déjà entre les deux instances concernées avec la nouvelle relation.

Lorsque les requêtes sont exécutées sur la base de connaissance de l'état du monde, il en résulte toutes les instanciations possibles au travers des late commitment envisageables.

Vérification de la continuité diégétique

A tout instant, l'état du monde peut être observé par le prisme de plusieurs instanciations de motifs diégétiques. Une diégèse se crée lorsqu'elle est consistante, il doit donc y avoir une **continuité** entre les motifs reconnus au cours de deux étapes successives dans la simulation pour créer une trame scénaristique. L'étape de vérification de la consistance vise à éliminer de la population de cadrages possibles ceux qui ne sont pas compatibles avec les cadrages précédents. Nous utilisons pour cela les chemins (*path*). S'il existe un chemin entre deux motifs et que les transitions entre les éléments du motifs sont vérifiées alors le cadrage est conservé. Il se constitue ainsi un arbre dans lequel chaque chemin est une trame possible. La figure 9.8 permet de visualiser un ensemble de trames scénaristiques valides sous la forme d'une arborescence. Dans cet exemple, aucun motif diégétique ne permet de poursuivre les trames issus des motifs de *Supplication* (symbolisé par une croix rouge). Une sélection est ensuite opérée pour déterminer les trames scénaristiques d'intérêt qui doivent être favorisées.

9.4.3 Sélections des trames scénaristiques d'intérêt

L'enjeu de la prise de décision est ici de sélectionner la situation diégétisée qui conforte la *meilleure* trame scénaristique. Trois types de critères permettent d'évaluer l'intérêt d'une trame scénaristique :

- des critères narratifs ;
- des critères morphologiques ;
- des critères pragmatiques.

La qualité des contenus scénaristiques est en général évaluée par l'effet qu'elle procure au spectateur (ou spect-acteur dans le cas particulier du récit interactif). Nous avons notamment évoqué en introduction la question de la tension et plus généralement la question des propriétés narratives. Les **critères narratifs** visent à faire respecter au récit certaines propriétés narratives dont la sémantique et l'évolution sont définies par les auteurs.

Cependant, outre l'effet produit par le récit, on peut choisir d'évaluer la qualité au regard de **critères morphologiques** qui mesurent le respect de certains canons de formes par le récit. Ces canons peuvent être définis de façon générale (ex : *la situation initiale précède l'événement perturbateur*) ou pour un genre particulier (ex : *entre deux amoureux, il y a toujours un obstacle*). Ils peuvent également se distinguer selon qu'ils sont d'ordre syntaxique (une structure particulière est valide) ou lexicale (une structure particulière peut contenir certains éléments particuliers).

Dans le cas particulier de la scénarisation interactive, le scénario se construit au fur et à mesure qu'il est présenté à un spect-acteur. Cette situation pose des contraintes particulières sur l'évaluation d'une trame scénaristique. En effet, par exemple, une trame scénaristique particulière peut respecter

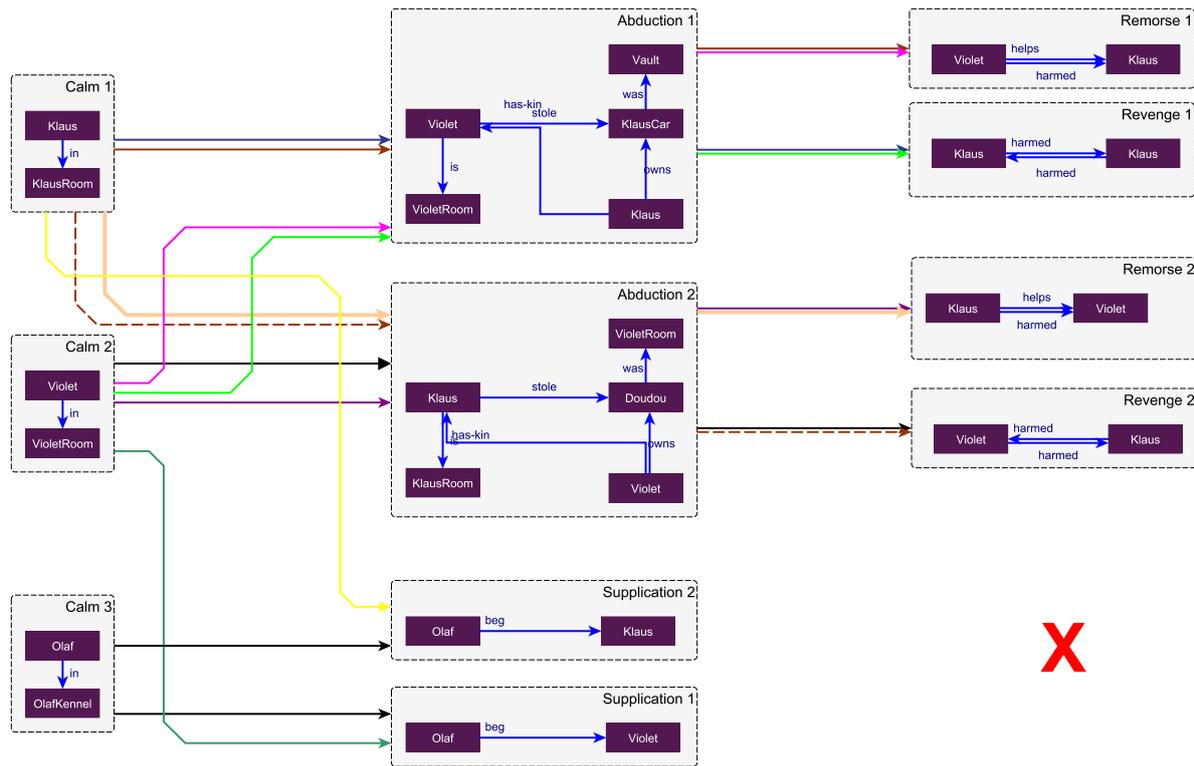


FIGURE 9.8 – Visualisation de trames possibles après la vérification de la continuité diégétique

un ensemble de critères narratifs et morphologiques mais sa mise en œuvre peut poser un problème significatif sur le plan pratique. C’est notamment le cas lorsqu’une trame scénaristique *réduit* l’espace des scénarios possibles : favoriser cette trame maximiserait effectivement les critères narratifs et morphologiques à court terme mais pourrait éventuellement fermer la porte à toute évolution du scénario à long terme. La prise en compte de cet aspect permet d’assurer une meilleure qualité future, ou espérée, des contenus proposés et permet également de garantir la maximisation des possibilités de personnalisation pédagogique. Ces propriétés étant fortement liées aux contraintes particulières de la mise en œuvre informatique des récits interactifs, on parlera de **critères pragmatiques**.

Dans un cadre général, nous proposons d’évaluer la qualité d’une trame scénaristique par une fonction d’utilité 9.1.

Evaluation d’une trame scénaristique

$$U(t) = U_{CN}(t) + U_{CM}(t) + U_{CP}(t) \tag{9.1}$$

U_{CN} est la fonction d’évaluation des critères narratifs

U_{CM} est la fonction d’évaluation des critères morphologiques

U_{CP} est la fonction d’évaluation des critères pragmatiques

Nous présenterons ici quatre critères que nous avons utilisés pour la diégétisation dans l’architecture TAILOR. Il s’agit d’un critère narratif, la charge émotionnelle, d’un critère morphologique, la grammaticalité et de deux critères pragmatiques que sont la quantité d’engagement pris et les possibilités d’ouverture du scénario.

Charge Emotionnelle

En plus des variations de l'histoire dûes aux différents motifs diégétiques appliqués à la simulation, nous souhaitons apporter des variations sur l'effet que celles-ci produisent. Un même motif peut produire des effets différents selon les instances qui remplissent les éléments qui le composent. Notre objectif est de sélectionner les instanciations qui portent une charge émotionnelle particulière à un moment donné. La valeur optimale de cette charge émotionnelle est déterminée par un profil qui pourra, par exemple, être un arc aristotélien au cours du temps.

Pour quantifier la charge émotionnelle à un moment donné, nous proposons de nous appuyer sur les changements d'état subis par l'utilisateur et par les autres entités de la simulation entre le moment précédent et le moment courant. Nous nous appuyons sur le **principe de proximité** [Polanyi, 1979] pour déterminer ce qui est émotionnellement porteur : *ce qui est proche de moi est pertinent pour moi*. Ce principe peut se décliner à un second degré : *ce qui est pertinent pour quelque chose qui m'est proche peut être pertinent pour moi*.

La charge émotionnelle d'une trame narrative se mesure donc par l'évaluation de l'impact émotionnel induit par les changements d'état du spectateur ou des entités qui lui sont proches.

Pour mettre en œuvre le calcul de la charge émotionnelle, nous proposons dans un premier temps de calculer l'importance relative de deux éléments de la diégèse.

Importance relative des éléments diégétiques

Nous définissons l'importance relative d'un objet par rapport à un sujet comme une valeur comprise entre 0 et 1. Plus l'importance relative d'un objet est haute, plus le gain ou la perte de cet objet est susceptible d'affecter le sujet. La mesure de l'importance relative entre deux entités quelconques de la diégèse décrite dans un modèle DIEGETIC est donnée par la formule 9.2.

Importance relative

$$I(S, O) = \max_{C \in \text{Chemins}(S, O)} \left(\prod_{e \in C} IS(e) \right) \quad (9.2)$$

$\text{Chemins}(S, O)$ est l'ensemble des chemins, constitués d'un ensemble d'arc e , entre S et O dans le graphe constitué par la base de connaissance

$IS(e)$ est la valeur d'importance intrinsèque de la fonction diégétique liée à l'arc e

La mesure d'importance relative s'appuie sur la structure de graphe de notre modèle de connaissances et sur les valeurs d'importance intrinsèque (*intrinsic-significance*) des fonctions diégétiques.

Dans l'exemple de la figure 9.9, l'importance relative de Tybalt pour Romeo est :

$$I(\text{Romeo}, \text{Tybalt}) = \max(IS(\text{aime}) * IS(\text{est - allie}), IS(\text{a - ennemi})) = \max(0.8 * 0.5, 0.35) = 0.4$$

Calcul de la charge émotionnelle

Evaluation des programmes narratifs

$$CE(S_1, p_i, p_f) = \frac{1}{\text{Card}(\rho(p_i, p_f))} \sum_{(S_i, r, o) \in \rho(p_i, p_f)} I(S_1, S_i) * (1 + I(S_1, o)) * E(e) \quad (9.3)$$

I est l'importance relative entre deux éléments diégétiques

$\rho(p_i, p_f)$ est l'ensemble des changements d'états survenus entre les points clés p_i et p_f

E est l'importance extrinsèque de la fonction en jeu dans le changement d'état

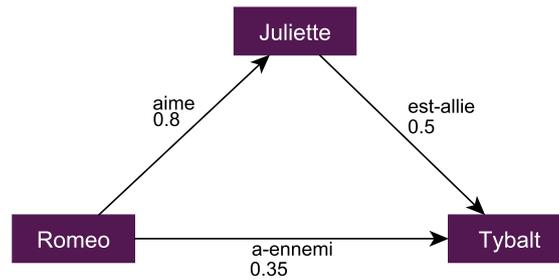


FIGURE 9.9 – Exemple d’une de graphe diégétique pour le calcul des importances relatives. La valuation des arcs reflète les valeurs d’importance intrinsèques des fonctions diégétiques en jeu.

Le calcul de charge émotionnelle subie par un sujet S_1 au point clé p est donné par la formule 9.3. La valeur $CE(Apprenant, p)$ permet d’évaluer la charge émotionnelle pour l’apprenant au point clé p .

La valeur de l’utilité narrative du point clé p pour la trame t est donnée par la formule 9.4.

$$U_{CN}(p) = |1 - CE(Apprenant, p) + CE_{expected}(p)| \quad (9.4)$$

$CE_{expected}$ est la courbe de charge émotionnelle optimale au cours du temps

Grammaticalité

Lors de l’étape de l’exploration, dans les cas où il n’existe pas de solution satisfaisante, le relâchement des contraintes induit des compromis qui affectent le respect d’une situation par rapport au motif qu’elle instancie. Nous souhaitons pouvoir quantifier ces compromis pour favoriser les motifs qui respectent le plus les motifs en question.

Nous proposons pour cela de nous référer à la notion de **grammaticalité** en linguistique [Beck, 1976]. Il s’agit de la propriété d’un énoncé à respecter une grammaire².

Nous avons adapté les trois principes de grammaticalité à l’évaluation des trames scénaristiques comme suit :

- R1. Une trame est mieux qu’une autre si elle respecte plus la grammaire qu’une autre ;
- R2. Une trame doit respecter l’ordre prévu par la grammaire ;
- R3. Les propositions d’une trame qui sont exigées par un haut niveau de la grammaire sont les plus importantes.

L’application de ces principes à notre contexte permet de classer l’importance du respect des contraintes suivantes :

- le taux de remplissage des rôles des motifs qui constituent la trame ;
- le taux de respect des contraintes sur les rôles ;
- le taux respect des chemins (Path) et transitions (transitions) définis dans le modèle diégétique.

Ce qui nous permet d’évaluer la grammaticalité par la fonction d’utilité $U_{CM}(t)$ calculée par la formule 9.5.

2. L’intérêt de la grammaticalité d’un récit a été notamment montré par lex xpérience de [Thorndyke, 1977]

$$U_{CM}(t) = 0.5 * \frac{R_{filled}(t)}{R_{total}(t)} + 0.3 * \frac{C_{satisfied}(t)}{C_{total}(t)} + 0.2 * \frac{P_{satisfied}(t)}{P_{total}(t) - 1} \quad (9.5)$$

R_{filled} est le nombre de rôles effectivement instancié

R_{total} est le nombre de rôles requis

$C_{satisfied}$ est le nombre de contraintes satisfaites

C_{total} est le nombre de contraintes total

P_{total} est le nombre de chemins et de transitions total

$P_{satisfied}$ est le nombre de chemins et de transitions valides

Besoins d'ouverture

Les différents motifs narratifs ne sont pas égaux quant aux possibilités qu'ils ont d'être suivis par d'autres motifs. En effet, certains motifs ne peuvent être suivis que par un nombre limité de motifs, voire ne pas être suivis du tout. Au contraire, d'autres motifs peuvent laisser la porte ouverte à un large éventail de nouveaux scénarios. Ceci se répercute directement sur les **possibilités d'ouverture** du scénario qu'il convient de maximiser pour assurer la résilience du système.

Les besoins d'ouverture diffèrent selon le moment de la simulation. En début de session, alors que la diégèse est peu construite, les besoins d'ouverture sont grands afin d'assurer la qualité du scénario quelle que soit l'évolution de la simulation. Au contraire, lorsque la session touche à sa fin, les besoins d'ouverture sont plus réduits. Nous proposons de mesurer l'utilité liée à l'adéquation entre les besoins en ouverture des scénarios et les possibilités d'ouverture d'une instance de motif diégétique ($U_{CP}^1(p)$) par la formule 9.6.

$$U_{CP}^1(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } O(s) \geq O_{expected}, \\ \frac{O(s)}{O_{expected}} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (9.6)$$

avec $O_{expected} \in \mathbb{N}^*$ est l'ouverture attendue.

Quantité d'engagement pris

Le cadrage diégétique nécessite de prendre des engagements (late commitment) sur des relations qui n'existent pas dans l'état du monde diégétisé. Chaque engagement, bien qu'il enrichit la diégèse, est également une contrainte de plus pour les cadrages diégétiques futurs. Idéalement, les scénarios s'appuyant sur la diégèse existante sont à privilégier.

La mesure d'utilité U_{CP}^2 liée à la quantité d'engagement est définie dans l'équation 9.7.

$$G_E(T) = \frac{N_{Commitment}(T)}{N_{Total}(T)} \quad (9.7)$$

$N_{Commitment}(T)$ est le nombre de late commitment nécessaire pour assurer la trame scénaristiques T ,

N_{Total} est le nombre total de fonctions diégétique en jeu dans la trame T .

9.4.4 Etayage des objectifs scénaristiques pédagogiques

Nous venons de décrire un modèle de **diégétisation automatique** qui permet de reconnaître l'essor d'une diégèse se créant automatiquement au cours de la simulation grâce à l'extraction de trames

scénaristiques diégétiques. Celle-ci prend en compte les changements apportés autant par l'apprenant que par les entités autonomes de la simulation. Nous souhaitons utiliser ces mécanismes de reconnaissance et de sélection pour étendre les objectifs scénaristiques pédagogiques avec des éléments confortant une trame scénaristique en cours de création.

L'introduction de chapitre a brièvement présenté la notion de **possibles narratifs** [Brémond, 1973] par lesquels un auteur crée un récit et enrichit la diégèse de celui-ci. A chaque état du récit peut succéder un nouvel *état possible*. Le génie de l'auteur est de déterminer, parmi l'ensemble des possibles, les propositions qui sont les plus pertinentes pour l'effet qu'il souhaite provoquer chez le spectateur. Nous proposons donc de mettre en œuvre ce mécanisme pour l'enrichissement des objectifs scénaristiques pédagogiques en nous appuyant sur le cadrage diégétique et la sélection des trames d'intérêt.

L'enrichissement diégétique des objectifs scénaristiques pédagogiques se fait en trois phases :

- **Pinstanciation** : les objectifs scénaristiques sont instanciés par rapport à l'état du monde. Au contraire de l'instanciation présentée dans le chapitre 8 (qui visait à produire une situation pédagogique pouvant contenir des concepts abstraits), il s'agit de décrire un état du monde partiel de manière concrète, décrivant des configurations d'objets du monde. Un objectif peut être instancié de plusieurs manières. Pour chacune des instances possible de situation, un *état possible du monde* est créé : il contient l'état du monde courant altéré *comme si* la situation prescrite était **effective** ;
- **le cadrage diégétique** : l'état possible du monde résultant de l'instanciation fait l'objet d'un cadrage tel que décrit dans la section 9.4.2 pour extraire les trames scénaristiques qui seraient valides si l'objectif instancié était effectif ;
- **la sélection des trames d'intérêt** : les trames scénaristiques potentielles font l'objet d'une sélection, telle que décrite dans la section 9.4.3.

Ce processus permet de déterminer quelles instanciations des objectifs pédagogiques permet de maximiser l'intérêt des trames scénaristiques. En outre, les engagements pris pendant le cadrage diégétique précisent les éléments de la diégèse qui étaient indéterminés.

9.5 Bilan

Pour ajouter des facteurs de motivation aux contenus proposés dans l'environnement virtuel, nous avons décidé d'utiliser les ressorts du récit interactif. A cette fin, nous nous sommes inspirés de différentes approches de la narratologie pour proposer un modèle de diégétisation automatique pour les simulations interactives peuplées d'entités autonomes. Ce modèle s'articule autour d'une représentation des connaissances sur la diégèse rendue possible grâce au métamodèle DIEGETIC, sur un mécanisme de reconnaissances de trames diégétiques et sur un processus décisionnel pour la sélection de trames scénaristiques d'intérêt.

La posture ontologique pour laquelle nous avons opté permet de satisfaire à nos objectifs quant à la **facilitation de la production** de l'environnement virtuel. Par ailleurs, les approches structurales offrent un grand pouvoir génératif qui permet d'ajouter un niveau de **variabilité** dans les contenus proposés. L'utilisation des techniques d'alignement d'ontologie permet de basculer les connaissances sur le domaine vers les connaissances sur les structures narratives sans avoir à définir manuellement du contenu diégétique spécifiquement dédié à l'application concernée.

Pour assurer la continuité scénaristique malgré l'autonomie de l'environnement qui encourage l'émergence de structures narratives indépendamment d'une quelconque forme de contrôle, nous avons mis en place un mécanisme de reconnaissances des trames scénaristiques émergentes. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'ajouter une couche de contrôle sur la simulation et donc de perdre les avantages de notre approche de simulation autonome : occurrence de situation inédite, **cohérence** des comportements, **liberté d'action** de l'utilisateur et **validité écologique**.

Troisième partie

Implémentations et résultats

Chapitre 10

Implémentation

“ You can invent things like automatic popcorn poppers. You can invent things like steam-powered window washers. But you can't invent more time. ”
The Bad Beginning , Lemony Snicket

Sommaire

10.1 Modèle et gestion de l'état du monde	180
10.1.1 Le moteur WORLDMANAGER	180
10.1.2 Utilisation de WORLD-DL pour la production d'environnements virtuels	180
10.2 Architecture TAILOR	181
10.2.1 Le diagnostic	181
ZPD-Space	181
Sélection pédagogique	182
10.2.2 Instanciation	182
10.2.3 Diégétisation	182
10.2.4 Interface utilisateur	183
Interface de pilotage de TAILOR	183
Interface Formateur	183
10.2.5 Intégration à Humans	184
10.3 Cas d'application	185
10.3.1 NIKITA - Formation des monteurs-assembleur dans le domaine aéronautique	185
Modèles de domaine	185
Mise en place d'un démonstrateur	186
Modèle du connaissance pour la détection d'intention	187
10.3.2 SIMADV - La formation des assistantes de vie	188

Nos propositions sur la scénarisation personnalisée dans les environnements virtuels pour la formation ont été implémentées et appliquées sur différents scénarios. Dans une première partie nous décrivons l'opérationnalisation du modèle du monde au sein du WORLDMANAGER et son intégration dans la production d'un environnement virtuel. Dans une seconde partie nous décrivons l'architecture TAILOR. La dernière partie de ce chapitre évoquera deux cas d'applications de nos travaux.

10.1 Modèle et gestion de l'état du monde

Les modèles décrits dans le formalisme WORLD-DL sont opérationnalisés grâce au WORLDMANAGER qui permet de maintenir et mettre à jour la base de connaissances sur le monde. Nous avons par ailleurs proposé des outils pour faciliter la production d'un environnement virtuel par l'utilisation d'un modèle de connaissance.

10.1.1 Le moteur WORLDMANAGER

Le moteur WORLDMANAGER a été développé en JAVA en utilisant le framework JENA. Le diagramme de classes de ce moteur est proposé dans l'annexe E.3. Le moteur offre à la fois un accès au modèle du monde, c'est-à-dire à l'ontologie, mais également à la base de faits correspondant à l'état du monde courant. Il est associé à un agent JADE pour l'intégrer au sein de la plateforme multi-agents HUMANS.

Ainsi, les différents modules peuvent accéder à l'état du monde pour disposer d'informations ou pour déclencher des actions et événements. L'annexe F résume l'ensemble du protocole de communication entre le WORLDMANAGER et les autres modules.

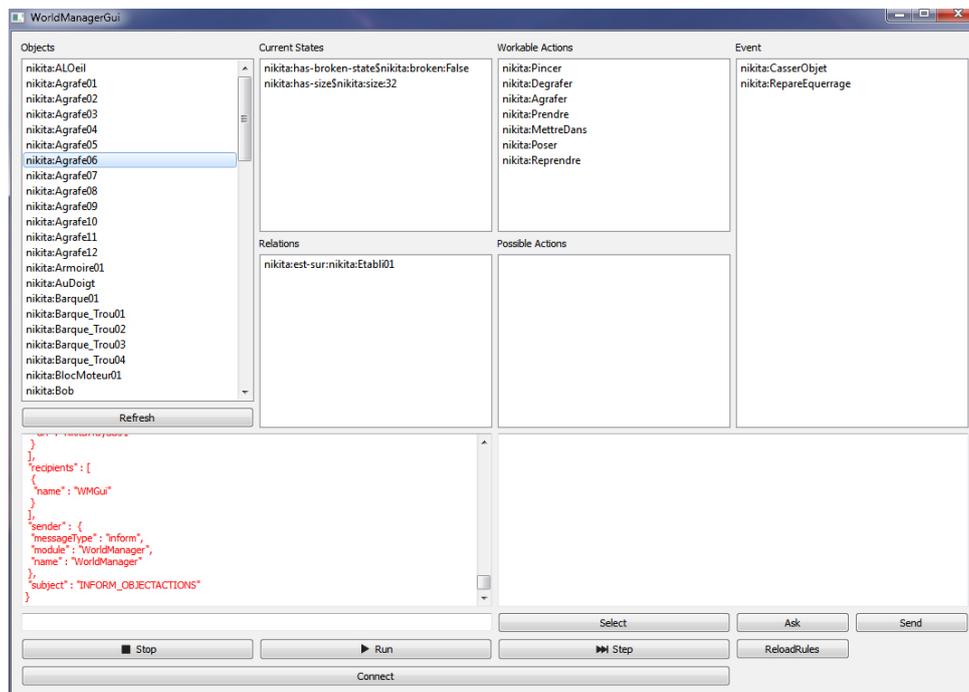


FIGURE 10.1 – Interface de visualisation de la base de connaissances

Le WorldManagerGUI offre une interface de visualisation des changements opérés sur le monde et permet en outre de simuler des actions, événements et commitments pour voir leurs effets.

10.1.2 Utilisation de WORLD-DL pour la production d'environnements virtuels

Un générateur de classe C# destinée au moteur de jeu UNITY a été développé en JAVA en utilisant la librairie JENA.

Pour chaque Component décrit dans le métamodèle WORLD-DL, une classe est créée. Les relations que peut nouer un composant sont décrites par des attributs de la classe du type adéquat. La cardinalité de ces relations (décrites via des relations du langage de description d'ontologie OWL) définit

si l'attribut de la classe est une liste d'élément ou un élément simple. Des membres sont également créés pour tous les attributs des états auquel le composant peut être lié.

Pour chaque `Object` décrit dans le métamodèle `WORLD-DL`, une classe est créée. La classe définit les composants dont elle hérite avec la primitive `RequireComponent`. Ainsi, l'ajout de la classe `Porte` sur la géométrie d'un objet de la scène confère automatiquement à cet objet les composants `Ouvrable` et `Verouillage`. L'annexe I présente des exemples de classes générées à partir d'un modèle du monde. Le framework `DOUG` [Degiovanni et al., 2014] développé par des étudiants de l'Université de Technologie de Compiègne permet de synchroniser les éléments de la simulation avec la base de connaissances en communiquant avec le `WORLDMANAGER`. Il convient aux concepteurs d'enrichir les classes générées pour créer les comportements liés à la scène 3D.

Le métamodèle `WORLD-DL` est également utilisé pour la génération de comportement pour des personnages virtuels autonomes. Le moteur `REPLICANTS` se sert du modèle du monde pour générer de nouveaux plans pour atteindre un but lorsqu'aucune solution ne peut être trouvée dans le modèle d'activité [Lhommet, 2012].

10.2 Architecture TAILOR

Les différentes fonctionnalités du moteur `TAILOR` ont été développées indépendamment afin de bénéficier des technologies les plus adaptées à chaque problème. Notamment, nous avons utilisé `JAVA` et la librairie `JENA` pour la gestion des connaissances sémantiques, tandis que le `C++` était très adapté aux besoins en performances nécessaires dans la manipulation de l'espace-zpd. Nous décrivons ici les différents éléments de cette architecture illustrée dans la figure 10.2.

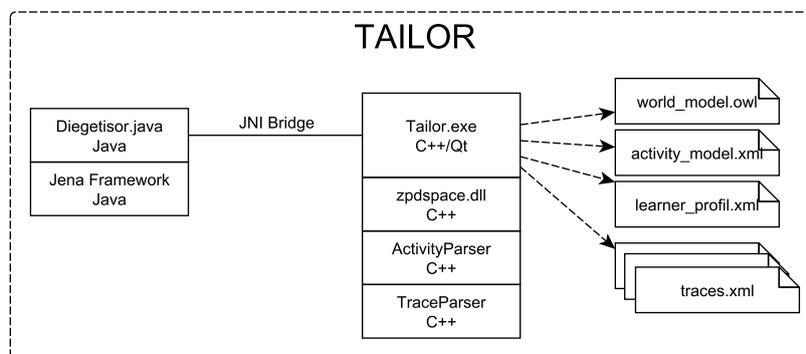


FIGURE 10.2 – Architecture logicielle du moteur TAILOR

10.2.1 Le diagnostic

ZPD-Space

L'espace de classes de situations associé aux distributions de masses de croyance et les différents opérateurs que nous avons proposés pour la manipulation de l'espace-zpd ont été implémentés dans la librairie `C++` `zpdspac`. Le diagramme UML de la librairie est proposé dans l'annexe E.1

Nous avons implémenté deux versions de l'algorithme d'inférence :

- une version **inductive** qui propage les croyances puis les fusionne avec l'opérateur de fusion avec conflit. Cette version permet de *saturer* le profil de l'apprenant en inférant toutes les croyances possibles. C'est donc la méthode privilégiée pour pouvoir mettre en œuvre une prise de décision pour la prescription d'une nouvelle situation ;

- une version **déductif** qui calcule la valeur d'une croyance en un point donné à partir de son voisinage. Il y a recherche des voisins, propagation de leurs sources de croyances et fusion avec conflit au point donné. Cette méthode est utilisée pour déterminer la croyance du système dans la capacité de l'apprenant à gérer une situation particulière, et notamment, celle en cours.

L'espace-zpd est alimenté en parcourant les traces d'activités générées par le module de suivi de l'apprenant, MONITOR, de la plateforme HUMANS [Amokrane, 2010].

Un profil d'apprenant, constitué d'un espace-zpd, peut être sauvegardé dans un format XML dont un exemple est fourni en annexe G. Un profil contient les informations suivantes :

- **la structure de l'espace** (noms des descripteurs, ensembles de définition des descripteurs) ;
- **les sources d'information** qui résultent de l'observation de l'apprenant, elles contiennent les informations suivantes :
 - *origine* : traces d'activité, demandes d'assistances, etc.,
 - *distribution de masse de croyance* (a, d, i c),
 - *vecteur de propagation* : dans notre implémentation, nous avons prévu le cas où les croyances se propagent différemment selon certains descripteurs,
 - *position* : un entier naturel permettant de retrouver le vecteur position dans l'espace ;
- **les points de croyance** résultent de la propagation des sources croyances dans l'espace-zpd, ils contiennent les informations suivantes :
 - *distribution de masse de croyance* (a, d, i c),
 - *position* : un entier naturel permettant de retrouver le vecteur position dans l'espace ;

Sélection pédagogique

La métaheuristique proposée dans le chapitre 7 a été implémentée en utilisant le langage C++ et la librairie STL. A l'heure actuelle, les contraintes suivantes ont été implémentées pour la sélection d'une classe de situation *S* :

- la distribution des masses de croyance de *S* tend vers une distribution déterminée ;
- l'une des masses de croyance de *S* est au delà d'un certains seuil déterminé dans un fichier ;
- l'une des masses de croyance de *S* est en deça d'un certain seuil ;
- certains descripteurs de de *S* ont des valeurs particulières.

Un diagramme de classe du module de sélection pédagogique est proposé en annexe E.2.

10.2.2 Instanciation

Une version simplifiée de l'algorithme d'instanciation à partir du modèle d'activité qui a été proposé dans le chapitre 8 a été implémentée en C++. Les descripteurs sont intégrés au modèle d'activité en utilisant la notion de marqueur de ACTIVITY-DL. Tous les descripteurs sont des sous-marqueurs valués du marqueur DESCRIPTOR.

10.2.3 Diégétisation

Le processus de diégétisation a été développé en JAVA en utilisant le framework JENA. Les situations dramatiques suivantes ont été modélisées :

- Enlèvement ;
- Délivrance ;
- Trahison ;
- Situation initiale ;

Nous avons appliqué le processus de diégétisation dans deux contextes différents. Il a d'abord été utilisé pour générer un récit. Il n'y a alors pas de génération d'objectifs pédagogiques, la diégétisation s'opère sur l'état du monde complet pour en tirer une vue pouvant donner lieu à la génération d'une histoire. Le moteur propose différents modes :

- **autonome et émergent** : le module enrichit la diégèse en procédant par des ajustements (événements exogènes et commitments) ;
- **autonome et contrôlé** : en plus de l'enrichissement de la diégèse, le module contrôle un personnage pour lui faire effectuer l'action qui maximise l'intérêt du récit ;
- **interactif et contrôlé** : l'utilisateur peut intervenir sur le récit en tant que personnage, le module réagit en enrichissant la diégèse ou en contrôlant les actions des personnages non-joueur ;
- **interactif et émergent** : l'utilisateur peut intervenir sur le récit mais les moyens d'intervention du module sont limités aux ajustements.

Le processus a également été implémenté pour l'enrichissement diégétique des situations pédagogiques et appliqué au cas de la formation aux assistantes de vie de famille. Un exemple d'exécution était proposé dans la figure 9.8 du chapitre 9.

10.2.4 Interface utilisateur

Afin de tester et montrer nos travaux, nous avons développé en C++/QT une interface dont le rôle est double : la vue TAILOR permet de piloter manuellement le fonctionnement de l'architecture à des fins de test et de démonstration tandis que la vue *Formateur* offre des moyens de contrôle sur un environnement virtuel.

Interface de pilotage de TAILOR

Cette interface, dont la fenêtre principale est visible en figure 10.3, offre les fonctionnalités suivantes :

- *Ouvrir un modèle* ACTIVITY-DL : charge un arbre d'activité sérialisé au format XML pour être utilisé dans l'étape d'instanciation ;
- *Charger un fichier de profil zpd* : charge un fichier XML contenant la description d'un espace-zpd (les axes), pouvant inclure, ou non, des points ou des sources de croyance ;
- *Charger une trace d'activité* : charge une trace d'activité enregistrée au format XML et ajoute les croyances sur les classes de situations issues de ces traces ;
- *Propager les croyances* : déclenche un mécanisme d'inférence inductif ;
- *Sélection pédagogique* : déclenche une prise de décision pour sélectionner des points d'intérêt dans l'espace-zpd à partir d'objectifs stratégiques prédéfinis ;
- *Générer les situations pédagogiques* : déclenche l'étape d'instanciation à partir des points d'intérêt sélectionnés ;
- *Diégétiser une situation* : déclenche le processus de diégétisation sur une situation.

L'interface permet également de visualiser les différents plans de l'espace-zpd. L'utilisateur peut choisir le plan à observer avec des *sliders* et des listes déroulantes.

Il est également possible d'ajouter manuellement des croyances et de régler les paramètres de propagation pour les inférences (profondeur maximum et coefficient d'affaiblissement).

Interface Formateur

Cette vue permet à un formateur de disposer de moyen de contrôle en temps réel sur le déroulement d'une simulation dans laquelle un utilisateur-apprenant est immergé. Elle dispose des fonctionnalités suivantes :

- *Se connecter à HUMANS* : permet de se connecter à la plateforme HUMANS et donc également à l'environnement virtuel ;
- *Déclencher une assistance* :
 - Affichage d'un message (explication sur la procédure, correction d'erreur, remédiation) dans la vue de l'utilisateur-apprenant,

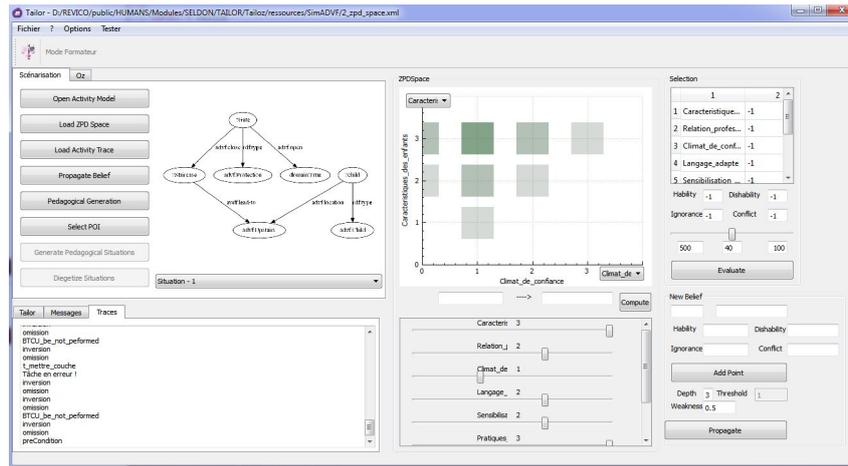


FIGURE 10.3 – Interface de contrôle du module TAILOR

- Mise en surbrillance d'un objet dans la vue de l'utilisateur-apprenant,
- *Demander un commitment* : décider manuellement d'une valeur d'un attribut booléen qui était jusqu'alors considéré comme inconnu ;
- *Déclencher un événement* : demander l'instanciation et l'activation d'un événement au sein de l'environnement virtuel.

Pour chacune de ses fonctionnalités, l'utilisateur peut sélectionner parmi une liste contenant toutes les possibilités ou utiliser une liste de choix recommandée dynamiquement à partir d'un raisonnement sur le modèle d'activité et de l'analyse de la trace produite par le suivi de l'apprenant. La figure 10.4 montre cette interface (a) et le résultat d'une demande de mise en surbrillance d'un objet (b).

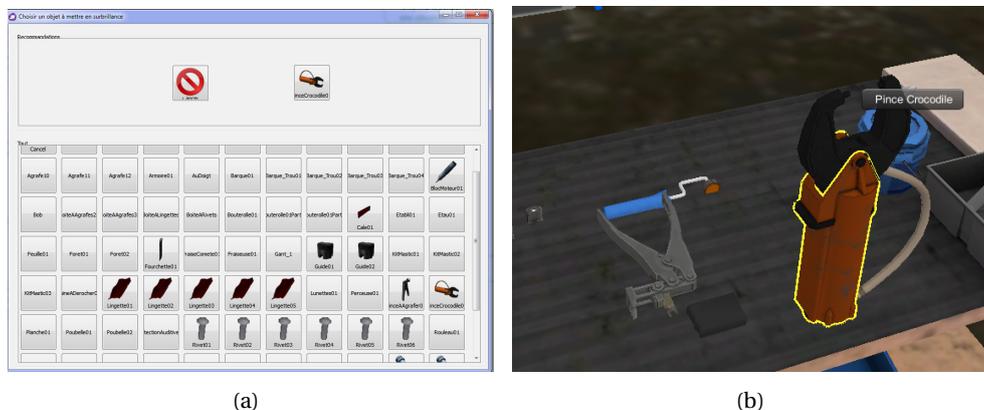


FIGURE 10.4 – Demande d'assistance par l'intermédiaire de l'interface formateur

10.2.5 Intégration à Humans

Le moteur TAILOR s'intègre à la plateforme HUMANS par l'intermédiaire d'un agent JADE. Dans le mode d'utilisation nominal, le moteur TAILOR reçoit en entrée les informations sur le suivi de l'apprenant de la part du module MONITOR et fournit, en sortie, les objectifs scénaristiques au module DIRECTOR. On est alors dans le cas de l'approche SELDON dans laquelle la spécification et le contrôle du scénario sont séparés entre TAILOR et DIRECTOR. Ce dernier est chargé de planifier une séquence d'ajustements favorisant la réalisation des objectifs scénaristiques sans nuire à la cohérence des comportements autonomes. Il est également possible d'utiliser TAILOR sans DIRECTOR.

Dans ce cas, les objectifs scénaristiques sont imposés à l'état de la simulation. Il peut en résulter une perte de la cohérence du fait des changements d'états non justifiés au regard du fonctionnement du monde.

10.3 Cas d'application

Nos réalisations ont été utilisées dans deux cas d'application radicalement différents mais répondant tout deux à la thématique des domaines complexes. Il s'agit d'une part de la formation à la construction aéronautique avec le projet ANR NIKITA et la formation des assistantes de vie avec le jeu sérieux SIMADVF.

10.3.1 NIKITA - Formation des monteurs-assembleur dans le domaine aéronautique

Le projet NIKITA réunissait un ensemble de partenaires autour de la thématique de la formation aux compétences perceptivo-gestuelles dans le domaine de la construction aéronautique. Dans le cadre de ce projet, trois questions principales étaient posées.

En premier lieu, était questionnée la **pertinence des interactions naturelles pour un apprentissage non-lié au geste**. L'hypothèse initiale étant que pour faciliter une intégrations des compétences et des connaissances, la prise en compte de la dimension du corps dans son environnement serait un atout à l'assimilation. En second lieu, le projet visait à évaluer l'intérêt d'une **scénarisation interactive et adaptative** dans le processus d'apprentissage. Enfin, la question de la création des contenus se posait pour déterminer comment **mettre en œuvre des représentations et des modèles communs** permettant la production aisée d'un environnement virtuel doté de possibilités d'interactions naturelles et de scénarisation interactive.

Le cadre d'application du projet était la formation au métier de la construction aéronautique et plus particulièrement la formation des monteurs-assembleurs sur les barques (partie du fuselage de l'avion) de la série A320.

Les cas d'application liés au projet NIKITA sont complexes dans la mesure où ils incorporent une lourde charge cognitive par la variabilité des situations qu'ils présentent. En effet, la construction aéronautique implique l'utilisation d'un large panel d'équipements, d'outils et d'outillages en fonction des matériaux et des parties de l'appareil concernées. Par ailleurs, ces situations intègrent des facteurs humains : les opérateurs sont amenés à travailler de manière collective que ce soit en situation de co-activité (plusieurs personnes affectées à des tâches différentes sur un même poste de travail) ou de collaboration (plusieurs personnes devant réaliser une tâche ensemble). A ce titre, NIKITA constitue un cas idéal dans lequel nous pouvons mettre en œuvre l'approche de scénarisation personnalisée aidée par les modèles de connaissances.

A partir d'une étude de terrain réalisé, des modèles de domaine ont été décrit en utilisant les formalismes HUMANS-DL. Ces derniers ont permis le développement de deux environnements virtuels. L'un de ces environnements est utilisable sur des interfaces classique (clavier, souris) et permet de réaliser la tâche de fixation d'une pièce sur la barque par l'utilisation de menus contextuels sur les objets (voir la figure 10.5). Un autre environnement utilise des périphériques de réalité virtuelle pour permettre une manipulation directe, naturelle et colocalisée des objets du monde (voir figure 10.7).

Modèles de domaine

Les équipes de chercheurs-ergonomes du LATI ont effectué des recueils de données sur le site d'AÉROLIA et au Lycée Technique Henry Potez tout deux situés à Méaulte [Delgoulet and Boccara,



FIGURE 10.5 – Manipulation des objets via un menu dans l'environnement NIKITA

2012].

Il est ressorti de ces analyses terrains que le déroulement des tâches était très codifié, notamment dans le cadre de la mise en place des processus de production dit *lean*¹. Malgré cela, une grande variété de situations peut naître des spécificités liées à chaque modèle d'avion.

Suite à ces analyses, les ergonomes ont utilisé une ancienne version de l'éditeur de modèle d'activité, VISUAL-HAWAI, pour décrire l'ensemble des comportements observés chez les opérateurs de production. Nous nous sommes chargés de convertir ces données dans la dernière version du formalisme ACTIVITY-DL. Les observations faites au lycée technique de Méaulte ont permis d'obtenir des informations sur les situations particulières délicates à appréhender par les apprenants.

Au total, 913 tâches dont 25 tâches de haut-niveau et environ 150 opérations différentes ont été explicitées dans le modèle d'activité.

Ne disposant pas d'outil d'édition pour WORLD-DL, nous avons aidé les ergonomes à décrire l'ontologie du domaine pour ce démonstrateur en utilisant TOPBRAID Composer. Le modèle du monde se compose de :

- 23 composants ;
- 34 types d'objets ;
- 36 actions ;
- 2 événements ;
- 40 comportements.

Mise en place d'un démonstrateur

Nous avons développé un premier environnement pour mettre en place un scénario de montage d'une pièce sur un A320. Cet environnement était développé grâce au moteur 3D UNITY. Le générateur de classes UNITY que nous avons décrit dans la section 10.1.2, a permis d'enrichir la scène 3D avec un modèle de connaissances reposant sur le formalisme WORLD-DL. Les objets 3D liés à des instances dans le modèle du monde sont interactifs : au clic, ils déclenchent l'ouverture d'un menu contextuel permettant de sélectionner une action et les paramètres de cette action.

Le scénario que nous avons retenu est celui de **la fixation d'un support sur une barque**. La barque est

1. Le *lean* est une méthode de gestion de la production pour optimiser la performance en terme de productivité, de qualité, de coûts et de délais. Pour cela, elle repose notamment sur l'amélioration continue, la chasse au gaspillage. Les procédures sont standardisées pour fluidifier la production.

la partie basse du fuselage de l'avion. Les supports sont des pièces fixées sur la barque et sur lesquels viendront se fixer d'autres pièces. L'opérateur doit accomplir les tâches suivantes :

- préparer le matériel : l'opérateur doit préparer les outils et consommables nécessaires à la réalisation de la tâche complète ;
- retirer la pièce de la barque : la pièce peut être déjà fixée temporairement sur la barque ;
- dérocher la pièce : l'opérateur doit gratter la couche superficielle de la pièce pour favoriser l'adhésion de la colle ;
- nettoyer la pièce ;
- encoller la pièce ;
- fixer temporairement la pièce avec des agrafes sur la barque ;
- attendre le séchage (24h) ;
- contrepercer la pièce : l'étape de contreperçage vise à agrandir des trous sur une pièce ;
- ébavurer la pièce : l'ébavurage consiste à fraiser légèrement un trou pour retirer le surplus de matière dégagé par le contreperçage ;
- fixer la pièce avec des rivets.

Pour ce démonstrateur, le monde est peuplé de 77 instances d'objets qui sont toutes liées à des objets de la scène géométrique. Le modèle d'activité décrit se constitue de 84 tâches dont 46 opérations, c'est-à-dire des actions élémentaires à effectuer dans l'environnement. Le modèle d'activité décrit en ACTIVITY-DL ainsi qu'un résumé du modèle du monde sont disponibles en annexe D.

En situation réelle, l'activité des opérateurs est ponctuée de moments de contrôle implicites au cours desquels les opérateurs vérifient le matériel, ou l'état de la pièce. Ils adaptent leur activité en conséquence. Pour mettre en jeu ces différents moments de contrôle, le formateur peut initialiser la scène, préalablement à l'exécution de l'environnement virtuel. Pour cela, il modifie l'état des objets dans l'ontologie du monde, cet état logique est automatiquement retranscrit dans l'environnement virtuel. Dans le cadre des scénarios NIKITA, le formateur peut notamment initialiser la position des objets (sur l'établi, dans l'armoire, dans la poubelle...), l'état des objets (le forêt est usé, la tête est montée sur le bloc moteur), l'état d'avancement de la procédure (la pièce est déjà préparée, encollée ou fixée...).

Modèle du connaissance pour la détection d'intention

Dans l'un des démonstrateurs que nous avons développé en partenariat avec le laboratoire LSI du Commissariat de l'Énergie Atomique, la base de connaissances sémantiques sous-tendue par le métamodèle WORLD-DL a été couplée avec un moteur physique afin de permettre la détection d'intention [Wagrez et al., 2013].

Le moteur MOIRAI permet de détecter l'intention de l'utilisateur par des mécanismes d'inférences dans des réseaux évidentiels. Les différentes sources de données (capteurs de mouvement, efforts et collisions du moteur physique, position des objets dans la scène) permettent de déduire l'action qu'essaie d'effectuer l'utilisateur. Par exemple, l'action "Prendre un objet" peut être détectée lorsque la main de l'utilisateur est proche d'un objet et qu'il réalise un geste de préhension (fermeture du poing). L'ajout des connaissances sémantiques sur le monde permet d'améliorer la prise de décision en étendant les réseaux évidentiels. Dans l'exemple de la préhension d'un objet, il est possible d'ajouter au réseau évidentiel un lien exprimant qu'une prise d'objet requiert d'être effectuée sur un objet héritant du composant *Portable*.

Pendant l'exécution, le moteur décisionnel MOIRAI fusionne les connaissances sur l'état du monde renseignées par le WORLDMANAGER avec les données issues de la simulation (capture de mouvement, efforts et collisions) pour reconnaître l'action et les paramètres de l'action que l'utilisateur souhaite effectuer dans un contexte donné. Une fois reconnue, l'action est transmise au WORLDMANAGER pour être appliquée. Les changements d'états résultant de cette action permettent de mettre à jour la simulation. Ce processus est résumé dans la figure 10.6.

sécurité dans la garde à domicile des enfants. L'approche HUMANS montre ici sa capacité à être utilisée dans des contextes différents des contextes industriels. La figure 10.8 montre une capture d'écran de l'environnement SIMADVF.



FIGURE 10.8 – Capture d'écran du démonstrateur SIMADVF

L'intérêt de l'approche par environnement virtuel est ici manifeste, elle permet la rencontre entre les apprenants et des situations d'apprentissages d'une gravité parfois extrême sans risques. De plus, l'enchaînement soigneusement choisi des situations permet de créer une gradation dans la complexité. En plus d'être formés aux compétences liées à la maîtrise des risques, les apprenants sont sensibilisés à la posture professionnelle qu'ils doivent entretenir avec les enfants et les parents. Nous ne sommes pas intervenus sur ce projet, toutefois, l'adéquation entre les besoins liés à cette application et nos objectifs faisait de ce cas d'usage une application idéale. En outre, nous disposons d'une grande richesse de données (analyses didactiques, retour d'expériences) que nous avons pu réutiliser pour concevoir des modèles de domaine.

Afin de produire un démonstrateur, nous avons retranscrit en ACTIVITY-DL une sélection de tâches issues de la description de l'activité qui avait été faite en langage HAWAI. Celui-ci permet d'illustrer les différents aspects de l'architecture TAILOR tout en étant très restreint. Il se compose de 34 tâches mères et 17 opérations. Nous avons produit un modèle du monde minimal permettant la réalisation de cette activité dans le langage WORLD-DL ainsi qu'un modèle d'alignement diégétique pour rendre possible la diégétisation. Nous avons également décrit les chaînes de causalité pertinentes dans le formalisme CAUSALITY-DL. Les modèles décrits sont disponibles dans l'annexe D.

Les modèles de connaissances ne sont pas intégrés à un environnement virtuel, mais permettent de montrer le fonctionnement de nos algorithmes sur un cas différent de l'assemblage aéronautique.

Chapitre 11

Validation

“ *Miracles are like meatballs, because nobody can exactly agree on what they are made of, where they come from, or how often they should appear.* ”
The Carnivorous Carnival, Lemony Snicket

Sommaire

11.1 Évaluation informatique	192
11.1.1 Caractère dynamique	192
Simulation du monde	193
Modèle de diagnostic	194
Génération procédurale des situations	196
Diégétisation	196
Processus de scénarisation	197
11.1.2 Liberté d'action	197
11.1.3 Variabilité	198
11.2 Retours d'expérience pour la conception des modèles	199
11.2.1 Conception du démonstrateur NIKITA	199
11.2.2 Conception d'un démonstrateur pour la plateforme HUMANS	200
11.2.3 Bilan	200
11.3 Pistes d'évaluations	201
11.3.1 Validité écologique	201
11.3.2 Qualité du contenu diégétique	201
Évaluation de la perception de la diégèse	202
Évaluation de l'indicateur de charge émotionnelle	202
11.3.3 Opérationnalisation de modèles issus de sciences humaines et sociales	202

La validation de nos travaux sur la scénarisation personnalisée présente, en elle-même, une difficulté majeure. Il faut tout d'abord rappeler que nos propositions visaient à répondre à de nombreux et divers objectifs. La validation de chacun de ces objectifs constitue un travail de grande ampleur qui mérite de s'y attarder pleinement.

Par ailleurs, bien que nous ayons centré notre étude sur la problématique informatique, nous ne pouvons faire totalement abstraction de l'usage auquel la scénarisation personnalisée se destine. Il est donc nécessaire d'évaluer, en plus des qualités informatiques de notre approche, la pertinence de son application dans un contexte réel.

Pour permettre d'évaluer pleinement nos travaux, il aurait fallu disposer d'une part d'un accès à des

experts de différents domaines pour l'évaluation de notre contribution quant à la production des environnements virtuels, et d'autre part à des opérateurs à différents stades d'expertise (novice, avancé, expérimenté) pour l'évaluation de la scénarisation personnalisée.

Bien que nous n'ayons pas eu accès à toutes ces ressources, nous avons pu évaluer certaines parties de nos travaux. Nous proposons donc d'étudier en premier l'évaluation informatique de l'approche. Ensuite, nous évaluerons l'usage dans un contexte de production et d'utilisation d'un environnement virtuel pour l'apprentissage humain. Au cours de ce travail de recherche, nous avons tenté d'opérationnaliser des modèles issus de sciences humaines. Dans la dernière section de ce chapitre nous proposons un certain nombre de réflexions quant à la validation d'une telle approche dans un cas général.

11.1 Évaluation informatique

Nous avons évaluer informatiquement notre approche du point de vue des différents objectifs que nous avons présentés en début de ce mémoire. Tout d'abord, l'un des objectifs était d'assurer un contrôle pédagogique pertinent, c'est-à-dire de fournir les bonnes formes de personnalisations au bon moment. Pour être *au bon moment*, les moteurs décisionnels en cause doivent être suffisamment réactifs pour que la décision résultante soit encore pertinente au regard des observations sur lesquelles elle s'appuie. Nous avons pour cela mesuré le **caractère dynamique** de l'approche, celui-ci s'observe en considérant les différentes échelles de temps en cause : le temps de interaction, le temps de la scénarisation au niveau microscopique et le temps de la scénarisation au niveau mésoscopique. Dans un second temps, nous avons évalué ce qu'apportait une simulation ouverte reposant sur des modèles de connaissance quant à la **liberté d'action** offerte aux utilisateurs. Enfin, nous avons également tenté de donner des éléments d'évaluation quant à la **variabilité** des situations permise par une méthode de génération procédurale à partir de modèle de connaissances.

11.1.1 Caractère dynamique

Dans le domaine de la réalité virtuelle, on considère en générale qu'un utilisateur perçoit son environnement en *temps réel* si celui-ci est mis à jour à une cadence d'au moins 30 images par secondes. Il s'agit ici d'une valeur s'appliquant principalement sur la perception visuelle de l'environnement. En deçà de cette valeur, l'utilisateur perçoit des saccades qui peuvent être désagréables. La cadence de mise à jour minimale est différente selon les modalités sensorielles concernées. Par exemple, les retours haptiques nécessitent d'être mis à jour 1000 fois par seconde pour une expérience agréable.

En ce qui concerne nos travaux, nous devons observer deux éléments distincts. D'une part, la question de la gestion du monde par laquelle passe toutes les actions et comportement. Ici, pour justifier le caractère dynamique de notre simulation, nous nous appuyerons sur la notion de **temps interactif** qui est la fréquence de rafraîchissement à partir de laquelle l'utilisateur perçoit le lien de causalité entre une action qu'il effectue et son résultat dans le monde. Il s'agit donc ici d'assurer le sentiment d'**agentivité** qui est la capacité d'une personne à agir sur les autres et sur le monde.

D'autre part, en terme de scénarisation, il nous faut évaluer la capacité du système à réagir aux actions de l'apprenant dans un délai suffisamment court pour que la personnalisation proposée soit toujours pertinente. En plus d'évaluer la vitesse d'exécution du moteur de maintien du monde, nous évaluerons chacun des trois processus décisionnels que nous avons proposés pour conclure sur le caractère dynamique de l'approche TAILOR.

Le passage à l'échelle étant un de nos objectifs, il est nécessaire d'évaluer, au moins qualitativement, l'influence de la taille des modèles sur la vitesse d'exécution des processus.

Simulation du monde

D'après la littérature, un utilisateur perçoit la causalité entre une action et son effet lorsque le délai entre les deux est compris entre 100 millisecondes et 1000 millisecondes. On parle alors de **temps interactif**.

Nous avons choisi d'utiliser une représentation des connaissances utilisant des modèles sémantiques pour bénéficier des avantages de ces représentations (expressivité, intelligibilité, interprétabilité). Cependant, sur le plan technologique, ces représentations sont lourdes et peu optimisées. Il était donc nécessaire d'évaluer la latence due à la simulation du monde par une représentation sémantique.

Nous avons pour cela mesuré les délais entre une demande d'action et son rendu dans l'environnement virtuel en utilisant le WORLDMANAGER et le framework DOUG. Nous avons pour cela mis en place trois modèles du monde :

- un modèle dit *simple* constitué de 2 actions et d'un unique objet ;
- le modèle du démonstrateur NIKITA ;
- un modèle dit *complexe* qui correspond au modèle précédent ayant été artificiellement gonflé par l'ajout d'instances d'objets inutiles. En ajoutant ces objets aux modèles du monde, la base de faits pour les raisonnements sur le monde est artificiellement grossie, et c'est justement cette taille qui est déterminante dans la vitesse d'exécution.

Scénario	Démonstrateur NIKITA	Modèle simple	Modèle complexe
Modèle du monde			
Objets	78	1	5500
Types d'objet	34	1	34
Composants	23	1	23
Actions	36	2	36
Comportements	40	2	40
Événements	2	0	2
Règles	54	4	54
Structures de données			
Triplets locaux	1602	71	7024
Triplets après saturation	2807	476	8273
Statistiques			
Latence moyenne (ms)	159	88	1975
Ecart-type (ms)	57	17	108

TABLE 11.1 – Evaluation de la latence du WORLDMANAGER dans différents contextes

Les scénarios d'expérimentation et les résultats sont présentés dans la figure 11.1. La moyenne proposée correspond à la latence entre la demande d'action et son résultat dans l'environnement virtuel calculé sur la base d'une séquence répétitive de 20 actions. On constate que cette **latence est fortement variable**, même dans le modèle simple. Dans le cas du démonstrateur, les valeurs sont parfaitement **acceptables pour une échelle de temps interactif**. Avec le modèle *complexe*, la latence dépasse la seconde, ce qui entrave fortement l'interaction et ne peut donc **pas être considéré comme du temps interactif**. Cependant, on peut imaginer réduire drastiquement cette latence. En effet, la réactivité du WORLDMANAGER est limitée ici par nos choix d'implémentation. Nous avons utilisé le moteur de règle standard de JENA qui parcourt, à chaque pas de simulation, toutes les règles pouvant être appliquées. Il serait plus performant de distinguer les règles logiques, devant effectivement être vérifiées à chaque pas de simulation pour la saturation de la base de faits et les règles dynamiques qui ne doivent être vérifiées que lorsqu'une action, un événement ou un comportement est actif. En outre, nous n'avons pas utilisé les techniques pour optimiser les accès à la base de connaissances alors qu'il existe des structures de données spécifiquement dédiées aux grandes bases de connais-

sances. Celles-ci permettent notamment l'indexation et la mise en cache des triplets pour des accès performants.

Modèle de diagnostic

La validation du caractère temps interactif de notre modèle de diagnostic nécessite de distinguer le **moteur d'inférence**, qui met à jour le profil de l'apprenant en fonction des données reçues, et le **moteur décisionnel** qui raisonne sur le profil pour établir des classes de situations d'intérêt.

Une grande partie des calculs opérés par le moteur d'inférence peut se faire hors-ligne (création et mise à jour du profil à partir de l'historique). La mise à jour des croyances dans le profil à la réception d'une nouvelle source d'information (traces d'activité) au cours d'une session n'est que très peu coûteuse (de l'ordre des millisecondes) et n'est que très peu dépendante du nombre de dimensions.

Nous présenterons donc principalement des résultats sur la prise de décision avec l'évaluation de l'algorithme évolutionnaire multi-objectif.

L'évaluation de celui-ci s'est faite selon deux critères :

- **la précision** qui qualifie la propriété de l'algorithme à trouver une solution optimale. La mesure de cette propriété est ici donnée par le pourcentage de score (fitness) atteint par la meilleure solution trouvée par l'algorithme par rapport à la solution optimale ;
- **la vitesse de convergence** qui quantifie usuellement le nombre de générations nécessaires pour converger vers une solution satisfaisante. Cependant, ce qui nous intéresse est le délai dans lequel la solution sera trouvée. Or, le temps d'exécution de l'algorithme sur une génération est fortement dépendant de la taille de la population. Nous préférons donc mesurer la vitesse de convergence par le délai jusqu'à la découverte de la solution plutôt qu'en terme de nombre de générations.

L'expérimentation visait à découvrir une classe de situation répondant à deux objectifs stratégiques dans un profil tel qu'il existait effectivement une solution optimale satisfaisant pleinement aux objectifs. Il s'agit donc d'évaluer si l'algorithme évolutionnaire est capable de retrouver cette solution est à quelle vitesse. Nous avons pour cela réalisé des exécutions de l'algorithme avec différents paramètres.

En premier lieu, nous avons fait varier la taille de l'espace de recherche. Dans un premier cas, l'espace de recherche est celui du contexte d'application SIMADVF, il se constitue de 8 descripteurs pouvant chacun prendre 4 valeurs. Ce profil est rempli et inféré à partir de 110 sources d'informations. Cet espace de classe de situations et les deux objectifs stratégiques associés créent un **espace de recherche de l'ordre de 10^5 solutions** à explorer. Pour le second cas, le même profil a été artificiellement gonflé en faisant prendre à chacun des 8 descripteurs 10 valeurs différentes. Le profil est rempli et inféré à partir de 500 sources d'informations générées aléatoirement. Ce cas se veut volontairement *surcomplexe* et n'a pas vocation être nécessairement représentatif d'un réel contexte. **L'espace de recherche est ici de l'ordre de 10^9 solutions** à explorer.

Ensuite, nous avons fait varier la taille de la population élite (les meilleurs individus conservés d'une génération à l'autre) par rapport à la taille totale. Ces paramètres permettent d'ajuster la prépondérance entre **exploration** et **exploitation**. Lorsque le ratio entre population élite et population totale est proche de 0, la métaheuristique est en mode exploration : elle cherche de nouvelles solutions aléatoirement et s'appuie peu sur les solutions existantes. Au contraire, lorsque ce ratio est proche de 1, la métaheuristique est en mode exploitation, elle *tourne autour* des solutions existantes. L'ajustement de ce ratio est primordial pour une bonne qualité de l'algorithme. Une population élite trop importante risque de faire *stagner* l'algorithme et donc ralenti la vitesse de convergence et la précision de celui-ci. Au contraire, avec une population élite faible, une solution optimale peut *potentiellement* être trouvée très rapidement ou au contraire très tardivement.

Il serait également possible d'évaluer la métaheuristique avec des valeurs de taux de mutation différentes. Cette valeur influe également sur le caractère exploratoire de la métaheuristique. Avec un taux de mutation élevé, l'algorithme explorera plus de nouvelles solutions, avec les mêmes limites

que celles citées précédemment.

Les données présentées dans les tableaux 11.2 et 11.3 sont issues d'une moyenne sur 10 exécutions de l'algorithme pour chacun des cas. Des graphiques montrant l'évolution de la valeur de fitness au cours des générations sont disponibles en annexe H.

La colonne *Précision* indique la précision atteinte, en tant que pourcentage du score par rapport à

Scénario simple (espace de recherche de $4^8 * 4$ points)

P=totale E=élite	Précision %	NbGénération optimale	Temps pour optimum (ms)	NbGénération à 90% précis	Temps pour 90% précision (ms)
P=50, E=5	100,00	101	31	28	9
P=50, E=15	100,00	224	65	54	16
P=50, E=25	100,00	257	71	66	18
P=50, E=40	100,00	258	79	137	42
P=100, E=10	100,00	32	102	3	10
P=100, E=30	100,00	52	158	3	9
P=100, E=50	100,00	34	96	5	14
P=100, E=80	100,00	155	422	25	68
P=500, E=50	100,00	6	96	1	16
P=500, E=150	100,00	11	186	1	17
P=500, E=250	100,00	14	210	2	30
P=500, E=400	100,00	49	682	7	97

TABLE 11.2 – Résultat de l'évaluation de l'algorithme évolutionnaire pour le scénario simple

Scénario complexe (espace de recherche de $10^8 * 4$ points)

P=totale E=élite	Précision %	NbGénération optimale	Temps pour optimum (ms)	NbGénération à 90% précis	Temps pour 90% précision (ms)
P=50, E=5	100,00	745	244	519	170
P=50, E=15	94,31	X	X	580	205
P=50, E=25	69,47	X	X	448	127
P=50, E=40	49,86	X	X	X	X
P=100, E=10	100,00	X	X	58	186
P=100, E=30	100,00	196	588	111	333
P=100, E=50	99,97	X	X	123	347
P=100, E=80	67,20	X	X	X	X
P=500, E=50	100,00	37	570	18	277
P=500, E=150	100,00	116	1898	22	360
P=500, E=250	100,00	196	2815	77	1106
P=500, E=400	99,95	X	X	282	3826

TABLE 11.3 – Résultat de l'évaluation de l'algorithme évolutionnaire pour le scénario complexe

la meilleure solution, lorsque la condition d'arrêt est atteinte. Celle-ci était fixée à 1000 générations. Les colonnes *NbGénération optimale* et *temps pour optimum* indiquent respectivement le nombre d'itérations et le temps en millisecondes pour trouver la solution optimale (qui est effectivement présente dans l'espace de recherche). Les colonnes *NbGénération à 90% précis* et *temps pour 90% précis* indiquent respectivement le nombre d'itérations et le temps en millisecondes pour trouver une solution dont le score atteint 90% du score de la solution optimale.

Le premier résultat notoire est que dans le pire des cas (cas complexe), une solution satisfaisante peut être déterminée en temps interactif (en moins de 300ms). Il semblerait que sur notre jeu de don-

nées, la solution optimale puisse même être atteinte (paramétrage $P=50$, $E=5$) dans ces délais. Dans le profil simple, la solution optimale est toujours trouvée et de manière relativement rapide (moins de 100 millisecondes la plupart du temps). Dans ce profil particulier, l'espace de recherche est relativement restreint et il est relativement facile de converger puisqu'une grande proportion de l'espace est explorée en quelques générations. Le paramétrage ($P=50$, $E=5$) semble être le plus intéressant, il converge vers la solution optimale en moyenne en 244 millisecondes et permet d'atteindre une solution satisfaisante à 90% en 170 millisecondes en moyenne. Il nécessite effectivement de nombreuses itérations — 20 fois plus d'itérations que pour le paramétrage ($P=500$, $E=50$) qui atteint la même solution 2 fois plus lentement — mais chacune d'elle est très rapide à exécuter du fait de la faible taille de la population.

Cependant, s'agissant d'un algorithme stochastique, il est nécessaire de mener une étude sur sa stabilité pour confirmer ces résultats et en déduire un comportement général satisfaisant de notre métaheuristique. Cette étude n'a été menée qu'en partie à ce jour. Les écarts-types pour l'exécution liés aux différentes conditions (qui ne sont pas présentés ici), montraient une grande stabilité des algorithmes avec une des variations de 5% par rapport à la moyenne. Cependant, dans certains cas, la variation est beaucoup plus grande (jusqu'à 43% en ce qui concerne la condition ($P=50$, $E=40$)). L'analyse empirique des données a permis de voir que cette grande variation était dû à la présence de *valeurs aberrantes*. Ces valeurs ne sont pas aberrantes du point de vue de la mesure puisqu'elles sont représentatives d'un réel comportement de l'algorithme, mais elles sont aberrantes du point de vue de la distribution qui est très stable. Nous n'avons pas réalisé suffisamment d'exécution de l'algorithme pour permettre l'utilisation de d'un échantillon de données avec des méthodes statistiques non paramétriques. Or, une telle méthode permettrait de quantifier la fréquence d'apparition de ces valeurs aberrantes et ainsi déterminer leur impact sur la latence globale du modèle de diagnostic.

Il serait également pertinent de faire le même travail avec des objectifs stratégiques qu'aucune solution dans l'espace-zpd ne remplit. Cela permettrait de déterminer dans quelle mesure l'algorithme est capable de trouver une solution satisfaisante quand aucune solution optimale n'existe.

Génération procédurale des situations

Nous avons mesuré les délais d'instanciation à partir de classes de situations pour notre algorithme de génération qui utilise uniquement les modèles d'activités (voir le chapitre 10). Celui-ci a été appliqué dans deux conditions :

- un modèle d'activité *simple*, constitué de 50 tâches avec une profondeur d'arbre maximum de 4 ;
- un modèle d'activité *complexe*, créé artificiellement, constitué de 151 tâches avec une profondeur d'arbre maximum de 10.

Le tableau 11.4 présente les scénarios et les résultats moyens pour 20 applications de l'algorithme d'instanciation. Le temps moyen de l'instanciation dans le cas simple est très faible (moins de 50 millisecondes). Dans le cas complexe, on peut déplorer de grosse perte de réactivité puisqu'avec 151 tâches — ce qui ne représente pas un cas surdimensionné — la durée de l'instanciation est proche de la seconde. Il est toutefois nécessaire de préciser que l'implémentation de l'algorithme qui a été faite n'est pas particulièrement efficace. Celle-ci pourrait bénéficier de nombreuses améliorations telles que des méthodes de parcours d'arbre avec élagages.

Diégétisation

Ce processus décisionnel se heurte à la même limite que la simulation du monde en ce qu'elle utilise un modèle de connaissance reposant sur une représentation sémantique. La vitesse d'exécution

	Modèle <i>simple</i>	Modèle <i>complexe</i>
Nombre de tâche	50	151
Profondeur	4	10
Durée moyenne	41,75 ms	926,35 ms
Ecart-type	3,75 ms	10,64 ms

TABLE 11.4 – Temps de génération pour deux modèles d'activité

est donc bornée par la vitesse des requêtes faites sur la bases de connaissances. À la date d'écriture du mémoire, la vitesse d'exécution d'un cadrage diégétique n'a pas été évaluée dans toutes les conditions possibles. Il faudrait en effet mesurer la latence dans des cas de modèles de domaine simples et complexes ainsi que dans des cas de modèles diégétiques simples et complexes.

Nous avons cependant mesuré la vitesse d'exécution sur un modèle du monde *SimADVF* et les quelques situations dramatiques de Polti que nous avons décrites dans le chapitre 10. A l'initialisation, le cadrage s'exécute à une vitesse moyenne de 197 millisecondes et permet de générer 12 instances de motifs diégétiques. Étant donné qu'il s'agit ici d'un cas relativement simple, il est légitime de s'interroger sur le caractère interactif de la diégétisation sur des cas complexes. De futures expérimentations permettront de répondre à ces questions. Dans le cas vraisemblable où l'étape de diégétisation venait à nuire à la scénarisation (temps d'exécution supérieur à la seconde), il faudrait considérer des optimisations. Notamment, nous pourrions considérer de ne pas explorer nécessairement toutes les possibilités de cadrage. Grâce à des heuristiques, l'exploration pourrait être réduite prioritairement à certains motifs diégétiques et éventuellement étendue dynamiquement si aucun cadrage n'est satisfaisant.

Processus de scénarisation

À partir de ces différents résultats, il est possible de conclure partiellement sur le caractère dynamique de notre approche. Dans le pire des cas (cas complexe), le diagnostic est l'instanciation sont exécutés en moyenne en $170 + 926 = 1096$ millisecondes. Ceci nous place dans l'ordre de grandeur de la seconde. S'agissant de personnalisation au niveau mésoscénaristique, cette valeur est largement acceptable. En effet, il peut se passer un délai de plusieurs secondes entre une situation et une autre sans pour autant gêner la perception que l'utilisateur a sur le système. Pour le cas de la personnalisation au niveau microscénaristique, cet ordre de grandeur peut s'avérer élever dans certains contextes de prise de décision rapide (accidents, crise). Il serait donc pertinent de mettre en œuvre les propositions d'amélioration que nous avons suggéré.

Il est nécessaire de poursuivre les évaluations sur la diégétisation pour déterminer si l'approche utilisée est viable dans un contexte de temps interactif.

11.1.2 Liberté d'action

Pour évaluer la liberté d'action de l'utilisateur, nous proposons d'une part de quantifier le nombre d'actions disponibles à l'apprenant à tout moment (évaluation objective) et d'autre part d'évaluer qualitativement le ressenti des utilisateurs (évaluation subjective).

Le nombre d'actions disponible est nécessairement fortement dépendant du domaine considéré puisque celles-ci y sont définies. Nous prendrons donc l'exemple du démonstrateur NIKITA. Dans le modèle du monde de ce domaine, 36 types d'actions sont disponibles. Celles-ci prennent entre 1 et 3 paramètres qui sont typés (en tant que composants ou en tant que types d'objets). Le nombre d'actions disponibles à tout moment est la combinatoire de tous les paramètres valides pour cette action. Nous avons donc dénombré **967 actions** pour ce modèle du monde. Parmi celles-ci, toutes ne

sont pas effectrices (elles ne produisent pas d'effet, car les paramètres choisis ne sont pas valides du point de vue du fonctionnement du monde). Il est d'ailleurs difficile d'évaluer le taux d'effectivité des actions (nombre d'actions effectives sur nombre d'actions disponibles) étant donné que celui-ci est fortement lié à l'état du monde courant.

Nous n'avons pas pu mener une évaluation de la perception de la liberté d'action sur de vrais utilisateurs. Cependant, au cours des expérimentations du démonstrateur clavier/souris NIKITA, les utilisateurs étaient en réalité gênés par l'étendue des actions possibles. Les participants s'attendaient à ce que, dans un contexte d'environnement virtuel qu'ils assimilaient à un jeu vidéo, l'ensemble des actions disponibles soit restreint à ce qui était nécessaire à la réalisation de la procédure.

11.1.3 Variabilité

L'approche que nous avons privilégiée permet de faire en sorte que toute la combinatoire des situations pouvant être mise en œuvre à partir des descriptions issues des experts soit accessible. La variabilité apparaît à plusieurs niveaux. En terme de représentation, l'utilisation de représentation générique et non instanciée permet de générer, à la volée, des instances qui peuvent s'avérer nécessaires et donc de ne pas être limité par du contenu prédéfini.

La modélisation du domaine d'apprentissage par des descripteurs abstraits permet de rendre compte d'un large panel de classes de situations pouvant émerger par la combinaison d'états du monde particuliers. En outre, l'approche de diagnostic et, notamment, la prise en compte du facteur d'*ignorance* assurent la rencontre de l'apprenant avec des classes de situations inédites.

Le processus d'instanciation d'une classe de situation s'appuyant sur des représentations abstraites permet d'instancier une même classe de situation par des activités différentes qui, elles-mêmes, peuvent être mises en œuvre par un large panel de situations.

Pour en rendre compte, nous présentons les résultats d'une étape d'instanciation en figure 11.1. L'instanciation a été ici appliquée sur un exemple limité à une seule tâche principale relative au change d'un enfant. La prescription proposée est telle que les pratiques sécuritaires de niveau 3 doivent être mises à l'épreuve.

Lors de l'étape de contrôle du scénario en vue de sa réalisation, les situations proposées pourront être instanciées par rapport au modèle du monde de différentes manières.

Dans notre application, nous avons décrit un modèle du mode pour décrire une salle de bain, il se constitue notamment des éléments suivants :

- un rasoir manuel ;
- un rasoir électrique ;
- un sèche-cheveux ;
- une paire de ciseaux ;
- une surface pour poser les objets sur le lavabo ;
- une surface pour poser les objets sur la machine à laver ;
- une surface pour pousser les objets sur la table à langer.

Dans ce contexte, les situations prescrites pourront être réalisées, au total, de 255 façons différentes. Ces différentes situations instanciées peuvent apparaître comme des variations mineures à première vue. Cependant, si on considère que la scénarisation ne s'est faite, ici, que sur des modèles très restreint (une tâche constituée de quelques sous-tâches et un modèle du monde très limité en terme d'objets), la variation est en fait, relativement à la taille des modèles, très grande.

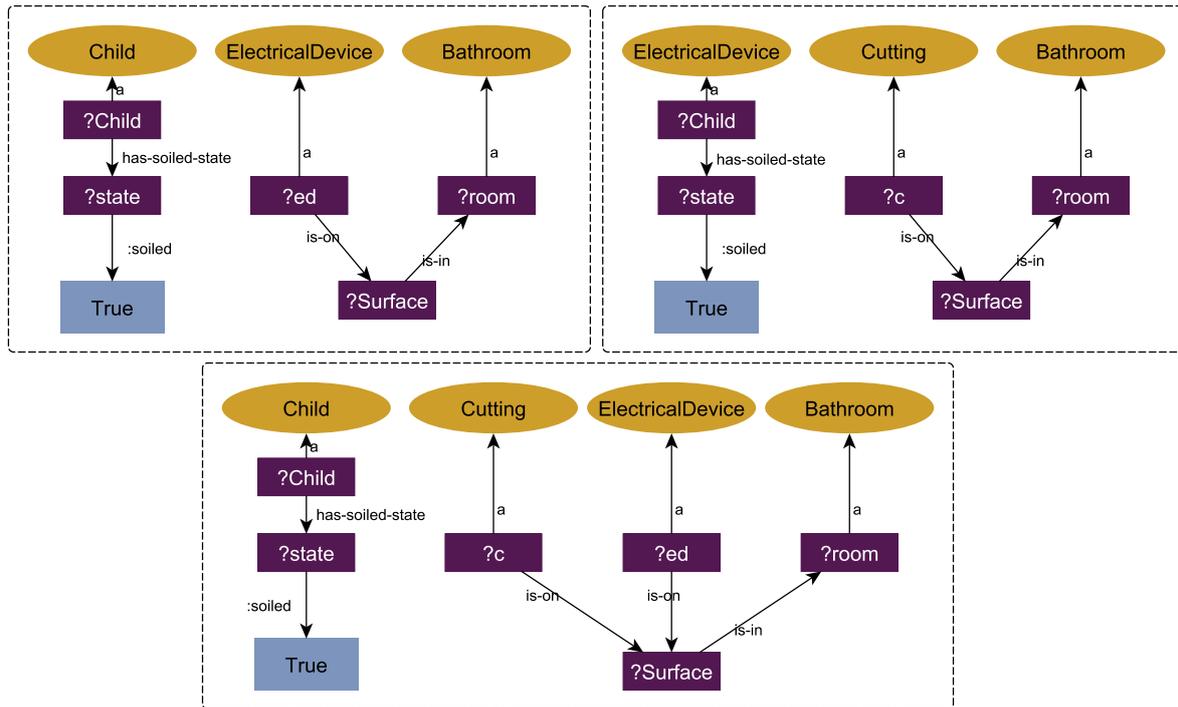


FIGURE 11.1 – Différentes instantiations d’une classe de situations

11.2 Retours d’expérience pour la conception des modèles

Nos travaux proposent une nouvelle approche des environnements virtuels pour la formation dont la conception est en partie dirigée par des modèles de connaissance. Pour cela, nous avons proposé des métamodèles que les experts doivent s’approprier pour renseigner les connaissances sur le domaine indépendamment de l’environnement virtuel. Nous avons évalué les capacités de nos représentations à être utilisées et appliquées au cours du projet de recherche NIKITA mais également au cours du développement de la plateforme HUMANS au sein du laboratoire HEUDIASYC.

11.2.1 Conception du démonstrateur NIKITA

Avant de proposer le métamodèle WORLD-DL aux ergonomes, ces derniers avaient commencé à renseigner les connaissances sur le monde sans utiliser de formalismes particuliers. Notamment, ils avaient organisé les différents types d’objet du monde dans une taxonomie dont ils n’étaient pas satisfait. En effet, la taxonomie empêche qu’un type d’objet partage des propriétés communes avec des objets situés dans des branches différentes. Lorsque nous avons proposé WORLD-DL, les ergonomes se sont rapidement approprié la modélisation par composant qui correspondait parfaitement à leur besoin. Par ailleurs, ils ont apprécié le fait que cette modélisation structurait la démarche d’élucidation des connaissances sur le domaine en offrant notamment un point de départ.

Étant donné qu’il n’existait alors pas d’outil d’édition propre au formalisme WORLD-DL et que les outils d’éditions d’ontologie les plus répandus étaient inconnus des ergonomes, nous avons aidé les experts à utiliser l’outil TOPBRAID Composer pour décrire un modèle du monde.

Après de nombreuses analyses faites sur le terrain par les ergonomes sur le site d’AÉROLIA, la description de la partie statique du modèle du monde pour le démonstrateur NIKITA (voir annexe D.1.2) n’a nécessité que quelques heures de travail. Un élément notoire de cette phase de conception à laquelle nous participions en tant qu’assistant et témoin a été que l’**expressivité** qui était pour nous un atout du formalisme s’est avéré un véritable inconvénient pour les ergonomes. En effet, les experts

s'interrogeaient sur les bonnes pratiques à adopter en terme de modélisation dès lors qu'un même phénomène pouvait se décrire de différentes manières.

En outre, la description des comportements par des règles sur les concepts semblait prometteuse pour les ergonomes, mais le manque d'un outil d'édition convivial a rendu la tâche très ardue. Toutes les règles ont été écrites manuellement à l'aide d'un simple éditeur de texte. Plusieurs journées de travail ont permis d'aboutir à la version finale des règles utilisées dans le démonstrateur.

11.2.2 Conception d'un démonstrateur pour la plateforme HUMANS

Dans le cadre de la réalisation d'un démonstrateur pour la plateforme HUMANS, nous avons proposé à des élèves ingénieurs de concevoir un modèle du monde. L'objectif était la réalisation d'un environnement virtuel reposant sur des modèles de connaissance. Le cas d'application était le changement de tuyaux dans une usine de produits chimiques. Les étudiants ont utilisé EDITOR, un premier prototype d'outil d'édition de modèle WORLD-DL. Après une description du métamodèle et un temps de découverte du logiciel, les étudiants ont pu décrire un modèle du monde composé de 14 classes d'objets (31 instances), 7 composants et 7 actions. Nous avons eu la surprise de constater à quel point les étudiants s'étaient approprié le langage. En effet, ils ont utilisé la représentation pour décrire des organisations complexes. Notamment, ils ont décrit un objet comme une composition d'autres objets. L'objet est actif lorsque différentes parties sont assemblées.

Le temps nécessaire à la rédaction des règles de fonctionnement s'est avéré plus difficile à évaluer. En effet, bien qu'ils aient pu faire cette tâche de manière autonome et relativement rapidement (une heure environ), de nombreuses corrections ont dû être faites pendant le débogage d'une application utilisant ce modèle.

Une fois les modèles décrits, grâce à l'outil de génération de classe et au framework DOUG, les étudiants ont réalisé une application complète permettant la manipulation d'un personnage dans un environnement virtuel en 6 heures (voir la figure 11.2).



FIGURE 11.2 – Démonstrateur pour la plateforme HUMANS

11.2.3 Bilan

Ces deux applications permettent difficilement de conclure sur l'intérêt de notre approche. Dans le cas du démonstrateur NIKITA, de vrais experts étaient impliqués. Ces derniers étaient demandeurs pour les métamodèles que nous avons proposés, mais le manque d'outil d'édition a nécessité notre intervention. En outre, même si le métamodèle (et notamment la notion de composant) invitait à une certaine élicitation des connaissances, l'expressivité offerte s'est révélée être un frein plutôt qu'un moteur du travail de modélisation.

Dans le cas du démonstrateur pour HUMANS, il s'agissait d'élèves ingénieurs en informatique qui disposaient d'un outil d'édition. L'expressivité du modèle leur a permis de décrire très facilement des

structures complexes.

Ce qui ressort de manière claire est que le formalisme d'écriture des règles de fonctionnement du monde n'est pas adapté à un effort de création par un humain non-informaticien. Deux problèmes majeurs ont été détectés à cet égard. D'une part, le formalisme en lui-même, reposant sur une représentation en triplet RDF nécessite une certaine prise en main mais surtout sa nature purement textuelle rend le travail d'écriture fastidieux. D'autre part, la compréhension du fonctionnement des règles était difficile. Les experts, tout comme les élèves ingénieurs, s'attendaient à certaines capacités de raisonnement de sens commun de la part du moteur et n'élicitaient pas complètement les changements d'état à produire. Par exemple, ils ne mentionnaient pas que la porte n'était plus fermée lorsque celle-ci s'ouvrait.

Il serait pertinent de réfléchir à une représentation autre, soit s'appuyant sur celle-ci dans le cas d'une métaphore graphique par exemple, soit en prenant un tout autre formalisme.

11.3 Pistes d'évaluations

Certains aspects de nos travaux n'ont pas pu être validés au cours de cette thèse. Nous proposons ici un ensemble de pistes d'évaluation qui nous paraissent primordiales.

11.3.1 Validité écologique

Pour rappel, la validité écologique est la propriété du contenu à être conforme à des situations réellement observables sur le terrain. Dans l'architecture TAILOR, les scénarios sont générés procéduralement à partir de connaissances sur le domaine qui ont été décrites par des experts. Du point de vue informatique, le contenu proposé est, par construction, nécessairement conforme à des situations observables, puisqu'il repose sur des modèles du contenu observable. Cependant, la perception qu'ont les experts du domaine de la validité des situations proposées mériterait d'être expérimentalement mesurée.

L'hypothèse de départ est que la conformité des scénarios générés par TAILOR est proche de la conformité des scénarios observés. Il faut donc comparer la perception qu'ont des experts d'un scénario réel et d'un scénario générés. Cependant, la pertinence de cette comparaison n'est valide que si on constate que les experts sont capables de percevoir la non-conformité d'un scénario. Dans le cadre d'un protocole d'expérimentation, des experts pourraient évaluer la conformité d'un scénario par rapport à la réalité pour les cas suivants :

- des scénarios réellement observés sur un site ;
- des scénarios générés grâce à l'architecture TAILOR ;
- des scénarios réellement observés, mais altérés pour introduire des non-conformités.

Ces scénarios pourraient être présentés à des experts de différentes manières :

- sous forme de rapport d'incident suivant la nomenclature en vigueur dans leur domaine d'expertise ;
- sous forme de témoignage raconté ;
- sous forme d'expérience dans un environnement virtuel.

11.3.2 Qualité du contenu diégétique

La mise en place de récit interactif dans notre contexte de simulation autonome a nécessité de faire reposer tout le récit sur la construction progressive d'une diégèse. Étant donné que le mode de représentation du récit est mimétique — il est montré à l'utilisateur qui l'expérimente dans le même temps — il est naturel de s'interroger sur la bonne perception, par un utilisateur, de l'univers diégétique créé. Nous présentons ici quelques pistes d'expérimentations pour évaluer

Évaluation de la perception de la diégèse

Dans un premier temps, il serait nécessaire d'évaluer la perception de l'univers fictif créé dans la simulation. En effet, la diégèse créée n'est pas explicitement présentée à l'utilisateur. L'hypothèse est que l'interaction de l'utilisateur avec le système permet de lui faire prendre conscience de la fiction dans laquelle il évolue. Pour cela, les participants pourraient être invités à répondre à un questionnaire sur les éléments de la diégèse après une session dans un environnement virtuel. Le but de ce questionnaire serait d'évaluer quels sont les éléments de la diégèse qui ont pu être perçus par les utilisateurs. Si une typologie d'éléments non perçue était mise à jour, il serait pertinent de réfléchir, en conséquence, à des moyens de les mettre en évidence.

Dans un second temps, il s'agirait de mesurer la perception des motifs mise en œuvre au cours de la diégétisation. Pour cela, les participants pourraient être invités à raconter, sous la forme d'un récit textuel, le déroulement de la session. L'hypothèse étant que si les motifs diégétiques sont perceptibles, ceux-ci seront retranscrits par les participants. Cependant, un biais peut être introduit au cours de l'analyse des résultats : l'analyse perçoit-il les motifs diégétiques que le participant a retranscrit ? Nous proposons donc plutôt de faire reconstruire par les participants l'histoire qu'ils ont vécue. Pour cela, ils disposeraient d'un ensemble de vignettes représentant les différents moments du scénario pour raconter l'histoire. Dans le cas où les motifs diégétiques sont perceptibles, les vignettes qui y sont rattachés seront perceptible. On pourra ainsi mesurer la distance entre les histoires retranscrites et l'histoire réelle par une *sorte de* distance de Levenstein¹.

Évaluation de l'indicateur de charge émotionnelle

Il serait nécessaire de vérifier que l'**indicateur de charge émotionnelle** que nous utilisons en tant que critère narratif est effectivement une propriété narrative pertinente. Cela requiert d'évaluer en fait deux choses. Tout d'abord, il nous faut valider, d'un point de vue informatique, que les scénarios générés suivent bien les courbes de charge émotionnelle servant de modèle. Cette tâche ne présente pas de difficulté particulière mais doit être réalisée sur des scénarios suffisamment conséquents pour être pertinente.

Dans un second temps, il s'agit de mesurer que la charge émotionnelle suggérée par la simulation est bien répercutée sur l'état émotionnel de l'utilisateur. Idéalement, on souhaiterait pouvoir mesurer l'effet produit directement sur les participants en utilisant des données physiologiques. Ce genre de mesure est *théoriquement* possible en utilisant des capteurs physiologiques tels que des capteurs de fréquence cardiaque ou des électro-encéphalogrammes. Cependant, même si ces capteurs sont maintenant aisément disponibles, il est encore difficile d'obtenir des mesures suffisamment précises pour en tirer des conclusions [Fricoteaux, 2012].

Pour contourner ce problème, une autre méthode serait de demander aux utilisateurs de verbaliser leur ressenti émotionnel, ou de l'évaluer sur une échelle de valeurs. L'écueil flagrant de cette méthode est le manque d'objectivité quant aux résultats obtenus.

Une dernière piste qui est celle que nous privilégions serait de demander à des participants de choisir, parmi un jeu de courbes de *tension*, celle qu'ils affecteraient à la session d'utilisation qu'ils viennent d'expérimenter.

11.3.3 Opérationnalisation de modèles issus de sciences humaines et sociales

Au cours de nos travaux, nous avons privilégié l'approche consistant à opérationnaliser des modèles issus de sciences humaines et sociales (modèles SHS), et notamment la zone proximale de dé-

1. La distance de Levenstein permet de mesurer la distance entre deux chaînes de caractères en comptant les différentes modifications qui permettent de passer d'un mot à l'autre (substitution, ajout ou suppression d'un caractère)

veloppement ou la représentation structurale en narratologie. Nous nous posons cependant la question de validation du respect du modèle informatique par rapport au modèle SHS qu'il opérationnalise. Tout d'abord, cette question est elle réellement pertinente? On pourrait en effet s'interroger sur le bien-fondé de la fidélité d'un modèle par rapport à un autre modèle. En ce qui nous concerne, nous pensons qu'effectivement, la question est pertinente. En effet, le travail d'opérationnalisation informatique d'un modèle SHS tel que nous l'avons mené constitue une réelle difficulté par la pluridisciplinarité qu'il requiert². Le travail de transcription a pu introduire des approximations et des contresens. A notre avis, il ne serait pas valide de prétendre avoir opérationnalisé un modèle SHS sans avoir démontré en quoi le modèle informatique était conforme au modèle original. Dans le cadre de ces travaux, nous avons donc veillé à parler en général de modèles informatiques *inspirés* de modèles SHS. En effet, nous ne nous sommes pas livrés à ce travail de validation. En réalité, ce travail de validation revête une difficulté majeure. La majorité des modèles SHS ne sont pas ou sont mal formalisés. Ils reposent sur des descriptions en langage naturel ou sur des représentations schématiques ad hoc qui ne répondent pas à des règles précises. Dans ces conditions, il est difficile de faire des comparaisons puisque les éléments à comparer eux-mêmes sont difficiles à déterminer. Dans le cas où ces éléments de comparaison, des observables, seraient disponibles, il resterait difficile de les mesurer et de déterminer à quel point un modèle informatique est fidèle au modèle qu'il implémente. La méthode qui paraît la plus pertinente serait de montrer que le comportement du modèle informatique est similaire au comportement du modèle SHS. Ici encore, il réside une difficulté dans la capacité à caractériser le comportement du modèle SHS et à traduire l'un et l'autre dans un référentiel commun pour les comparer.

Dans le cas particulier de cette thèse, nous avons notamment opérationnalisé des modèles inspirés de la Zone Proximale de Développement de Vygotsky, de l'espace des situations didactiques de Brousseau, et des sémiologues structuralistes. Pour le premier, la mise en œuvre d'une validation nous paraît difficile mais il y a une piste. Pour prouver la conformité de la notion de ZPD avec l'espace-zpd, il faudrait prouver que toutes situations-problèmes répondant à la définition de la ZPD au sens Vygotskien — à savoir des situations-problèmes qui peuvent être résolues grâce à autrui — appartiennent à la ZPD tel que décrite dans le chapitre 7. Il faudrait donc évaluer la capacité des situations générées par notre approche à être résolues au sens vygostkien.

Les possibilités de validation semblent plus prometteuses dans le cas de l'opérationnalisation des théories narratives. Tout d'abord, les travaux sur lesquels nous nous sommes appuyés sont justement formalisés. De surcroît, ces travaux ont certes une visée explicative mais également une visée générative en ce sens qu'ils définissent un certain nombre de règles pour guider la création d'un *bon* récit. Il est donc possible de comparer la conformité du contenu généré informatiquement avec les méthodes d'analyses en narratologie. Si le modèle informatique est conforme au modèle dont il s'inspire, alors le contenu généré pourra être analysé.

De manière générale, nous pensons qu'une perspective de recherche intéressante serait de déterminer un protocole de validation de l'opérationnalisation d'un modèle SHS qui, idéalement, permettrait de mesurer la distance d'un modèle à l'autre.

2. C'est justement cette faiblesse dans nos travaux qui motive notre réflexion.

Quatrième partie

Discussion et conclusions

Chapitre 12

Discussion

“ If you were to take a plastic bag and place it inside a large bowl, and then, using a wooden spoon, stir the bag around, you could use the expression 'a mixed bag' to describe what you had in front of you, but you would not be using the expression in the same way I am about to use it now. Although 'a mixed bag' sometimes refers to a plastic bag that has been stirred in a bowl, more often, it is used to describe a situation that has both good parts and bad parts. An afternoon movie theater, for example, would be a mixed bag if your favorite movie were showing, but if you had to eat gravel instead of popcorn. A trip to the zoo would be a very mixed bag if the weather were beautiful, but all the man and woman-eating lions were running around loose. ”
The Ersatz Elevator, A Serie Of Unfortunate Events, VI , Lemony Snicket

Sommaire

12.1 Atouts	208
12.1.1 Production des environnements virtuels pour l'apprentissage humain	208
12.1.2 Pertinence des scénarios	208
12.1.3 Mise en œuvre d'un apprentissage expérientiel	209
12.1.4 Robustesse de l'approche	210
12.2 Limites	210
12.2.1 Elicitation des connaissances	210
12.2.2 Faiblesse du caractère dynamique	211
12.2.3 La difficile définition du profil de l'apprenant	211
12.2.4 La porosité des frontières entre le domaine et l'indépendant du domaine	212
12.2.5 Modèles pédagogiques	212
12.2.6 La temporalité pour la diégétisation	213
12.3 Perspectives	213
12.3.1 Ingénierie dirigée par les modèles et cycle de vie des produits	214
12.3.2 Réflexion sur les outils d'accompagnements	214
12.3.3 Coordination avec un tuteur intelligent	214
12.3.4 Intégration du dispositif dans les formations	215
12.3.5 Modèle de progression reposant sur le <i>Périple de l'Apprenant</i>	215

La mise en œuvre de nos propositions et leur mise à l'épreuve présentées dans les chapitres 10 et 11 ont permis de mettre en évidence les apports que constituaient nos travaux à l'état de l'art de même que les limites de ces derniers. Nous dresserons ici ces atouts et ces limites, tout en proposant des

pistes de réflexion pour dépasser ces limites. Ensuite, nous présenterons quelques perspectives intéressantes dans le cadre de la poursuite de ces travaux.

12.1 Atouts

L'originalité de notre proposition réside dans l'utilisation de modèles de connaissances décrits par des experts pour permettre de produire des environnements virtuels destinés à l'apprentissage et à l'entraînement dans des domaines complexes sans fournir un effort de création de contenus rédhibitoire. Ces modèles permettent à la fois de faciliter le processus de conception et servent de support à la génération procédurale de contenu scénaristique. En outre, l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle numérique a rendu possible l'opérationnalisation en temps interactif des modèles issus de sciences humaines et sociales dans le contexte des domaines complexes.

Nous considérons que les atouts majeurs de notre approche sont les suivants :

- facilitation de la production des environnements virtuels pour l'apprentissage humain ;
- la liberté d'action de l'utilisateur ;
- la pertinence des scénarios ;
- la variabilité des scénarios ;

12.1.1 Production des environnements virtuels pour l'apprentissage humain

Le métamodèle de description du monde WORLD-DL présente un intérêt majeur pour la production et l'exploitation des environnements virtuels. Tout d'abord, le formalisme de représentation choisi est intelligible, en grande partie, par des non-informaticiens, ce qui permet à des experts du domaine considéré de produire du contenu sans connaissances préalables en programmation.

En outre, la facilité avec laquelle il est possible de modifier le modèle du monde rend l'édition des contenus accessibles à des formateurs. Non seulement, grâce à un outil auteur adéquat, il n'est pas nécessaire de disposer de connaissances en programmation, mais en plus, l'utilisation d'un modèle sémantique permet de s'abstraire de la scène 3D et de ne considérer que ce qui est porteur de sens du point de vue de l'apprentissage (ou de toute autre valeur d'importance).

Un intérêt majeur de l'approche est la rapidité avec laquelle il permet de faire évoluer les contenus pour créer de toutes nouvelles applications à partir d'une application initiale. Notamment, un même modèle du monde pourra servir à former plusieurs types d'opérateurs sur un même site. Il suffira alors de décrire des modèles d'activité et de causalité adaptés à ces nouveaux cas d'usage. Cet effort de création des nouveaux contenus pourra en grande partie **réutiliser** des portions de représentation des modèles précédents.

D'ailleurs, le formalisme du modèle du monde n'est pas dédié spécifiquement aux environnements virtuels pour la formation. On pourra ainsi s'intéresser à un même domaine mais pour des publics différents (scolaire pour la découverte d'un métier, ingénieurs pour l'amélioration des process, responsables d'achats pour la vente d'installation, etc.). Mais on pourra également s'intéresser à des contextes radicalement différents tels que pour l'aide à la décision, la conception de produit collaborative, voire pour créer et piloter le contenu d'environnements ludiques.

La base de connaissances et le modèle duquel elle dérive peuvent par ailleurs bénéficier à des moteurs décisionnels tiers. Notamment, un modèle du monde décrit en WORLD-DL sert de support à la reconnaissance d'intention pour la manipulation en interaction naturelle dans le cadre du projet NIKITA. Dans le cadre du module REPLICANTS, le modèle et l'état du monde constituent des bases de connaissances pour le raisonnement de personnages autonomes dotés d'émotions.

12.1.2 Pertinence des scénarios

Grâce à notre approche, les scénarios proposés à l'utilisateur sont pertinents à plusieurs égards :

- adapté au regard du profil de l'apprenant ;
- valides sur le plan écologique ;
- suscitant l'intérêt de l'utilisateur ;

La modélisation de l'espace de classes de situations et les règles pédagogiques associées au modèle de contrôle multiniveaux permettent de modéliser la sélection dans la zone proximale de développement. La scénarisation qui en résulte est donc propice à susciter un apprentissage situé. La prise en compte de différents niveaux d'agrégation dans la prise de décision permet d'assurer que le système s'adapte à l'apprenant à tout moment. Ainsi, le système s'adapte à l'utilisateur sur le plan microscénaristique par la modification de la situation courante. Il adapte également le scénario de la session en fonction du profil de l'apprenant pour générer des situations d'apprentissage qui sont pertinentes pour cet apprenant particulier. En outre, la capacité du moteur TAILOR à réagir dans des délais raisonnables du point de vue de la scénarisation permet d'affirmer que l'adaptation est toujours pertinente lorsqu'elle se produit. En effet, la décision prise par TAILOR repose sur des observations qui sont toujours vraies lorsque la décision est prise. Enfin, la mise en place d'une modulation du contenu des sessions au niveau macroscénaristique assure que l'apprenant progresse à son rythme au sein du parcours d'apprentissage global.

Le processus d'instanciation des situations que nous avons décrit dans le chapitre 8 s'appuie exclusivement sur des connaissances qui ont été décrites par des experts du domaine dans des modèles sémantiques. Ainsi, bien que le contenu proposé à l'apprenant ne soit pas produit de la main humaine, sa production intègre les connaissances nécessaires pour qu'il soit valide sur le plan écologique. Les situations qui seront proposées à l'apprenant par le moteur de scénarisation ne peuvent être que des situations qui ont un sens dans le contexte d'application considérée. Il faut toutefois nuancer l'importance de cette contribution par le fait que la validité écologique n'a pas été prouvée expérimentalement. En outre, le contenu proposé sera valide *au regard de ce qui a été décrit*, et non pas nécessairement valide par rapport à la réalité du terrain. C'est aux modélisateurs de s'assurer que leurs descriptions sont écologiquement valides. Nous avons pour cela fourni des langages de représentation intelligibles et expressifs pour rendre cela possible.

Enfin, la création d'un récit au cours du scénario doit permettre l'apprentissage en supportant les activités cognitives de l'apprenant, mais, de surcroît, favorise également l'intérêt de l'apprenant. Cependant, la qualité du contenu proposé reste fortement dépendante de ce que l'auteur a renseigné dans le modèle diégétique, mais également de la manière dont le monde a été modélisé.

12.1.3 Mise en œuvre d'un apprentissage expérientiel

La mise en œuvre d'une stratégie d'apprentissage expérientielle requiert de pouvoir fournir un large panel de scénarios dans lesquels l'apprenant pourra expérimenter pour construire sa connaissance. Il s'agit donc ici de satisfaire les objectifs de variabilité et de liberté d'action.

Grâce à une approche reposant sur des modèles disposant d'un fort pouvoir génératif, on assure une large variabilité des situations d'apprentissage. En premier lieu, le profil de l'apprenant et la représentation de l'espace de classes de situations assurent que l'apprenant rencontrera un large panel de classes de situations. L'instanciation des situations se fait en conservant un certain niveau d'abstraction par rapport au modèle du monde. De fait, une même situation peut donner lieu à différentes instanciations dans la simulation. Enfin, le processus de diégétisation permet de générer de multiples variations à partir d'un même enchaînement de situations. A ce titre, nous considérons que l'objectif de variabilité des situations est pleinement atteint. Il permet à un utilisateur de rencontrer des scénarios toujours inédits, ce qui permet de maintenir à la fois son intérêt pour l'environnement et sa motivation globale.

L'approche de modélisation pour laquelle nous avons opté dans le cadre du formalisme WORLD-DL repose sur des descriptions sémantiques. Ainsi, les actions et leurs paramètres sont représentés comme des concepts à un niveau abstrait. Ils peuvent être instanciés sur le modèle du monde courant pour permettre de mettre en œuvre dynamiquement toute la combinatoire des actions possibles sans qu'elles aient été décrites. Le fonctionnement des comportements qui régissent les changements d'état s'opérant dans la simulation adopte également ce type de représentation. Ainsi, il n'est pas nécessaire de spécifier explicitement toutes les séquences d'actions possibles et le comportement du système global en fonction de ces actions. Cette approche permet donc de garantir une **grande liberté d'action** à l'utilisateur, mais aussi de conforter le sentiment d'**agentivité** puisque ces actions sont toutes potentiellement effectives selon l'état du monde.

Pour maintenir cette liberté tout en offrant du contrôle pédagogique, nous avons proposé de nous reposer sur l'état courant de la simulation et de l'orienter vers des situations d'apprentissage. L'apprenant est libre de prendre en considération les situations d'apprentissage proposées. Dans tous les cas, l'activité qu'il réalisera sera tracée et intégrée à son profil pour permettre la scénarisation des activités ultérieures.

12.1.4 Robustesse de l'approche

Au sein de l'architecture TAILOR nous avons veillé à ce qu'il soit possible de déployer un environnement virtuel pour la formation très rapidement avec un effort minimal de conception. En effet chacun des modèles indépendants du domaine intègre des primitives pour un fonctionnement minimal des moteurs décisionnels. Il s'agit notamment des règles pédagogiques pour la sélection de classes de situations dans la zone proximale de développement et des situations dramatiques de Polti pour le modèle diégétique. L'approche sera effectivement fonctionnelle dans ce contexte minimal mais comme nous l'avons évoqué plus haut, la pertinence des scénarios ne pourra pas être garantie que dans la mesure où les modèles de domaines ont été correctement décrits.

L'intérêt d'avoir un noyau de primitives est de permettre le prototypage rapide et itératif d'une application. Ce processus a d'ailleurs été mis en œuvre au cours du développement du démonstrateur NIKITA. Le modèle du monde et le modèle d'activité ont été peu à peu étoffés pour rendre compte de situations de plus en plus fidèle à la réalité du terrain.

12.2 Limites

Au sein de l'architecture TAILOR nous avons tenté de distinguer d'une part les connaissances liées au domaine (monde, activité, causalité) et d'autre part, la manière dont ces connaissances sont utilisées au cours de processus décisionnels (diagnostic, instanciation, diégétisation). Les retours d'expériences et les expérimentations ont mis en exergue des limites liées à la description des connaissances et à leur utilisation par les modèles décisionnels. Ces limites découlent en partie de cette distinction entre la connaissance et la décision.

12.2.1 Elicitation des connaissances

Lors de l'appropriation du métamodèle WORLD-DL par les différents experts, nous nous sommes rapidement rendu compte que la description de la partie dynamique du modèle du monde, au travers de règles JENA était **inadaptée pour des non-informaticiens**. Le formalisme lui-même était mis en cause en partie. Ce défaut pourrait être rapidement corrigé en offrant aux experts un outil auteur utilisant des métaphores pour la représentation des règles. Cependant, le véritable problème était plutôt lié à l'**effort d'élicitation** lui-même. En effet, les auteurs faisaient finalement trop confiance au système et lui attribuaient une certaine sens commun. Ainsi, ce qui paraissait "implicite" ou "évident"

n'était pas toujours renseigné dans les règles. Cette lacune est en fait vraie pour les trois modèles de domaine que nous utilisons. Elle est d'autant plus limitante que les processus décisionnels que nous avons proposés s'appuient sur ces connaissances. En effet, ces processus reposent sur deux postulats implicites quant aux modèles. D'une part, que les modèles sont complets, c'est-à-dire qu'ils contiennent l'ensemble de la connaissance nécessaire à la génération d'un contenu valide sur le plan écologique. D'autre part, un autre postulat est que les modèles utilisés pour la scénarisation sont cohérents les uns avec les autres. Or, formellement, cette cohérence n'est pas assurée par les méta-modèles eux-mêmes.

Le problème de l'élicitation de la connaissance sur les domaines est en fait un problème général dans la représentation et la gestion des connaissances. Pour tenter de résoudre ce problème dans notre contexte particulier, une approche serait de proposer des formalismes qui imposent une certaine élicitation, ce qui peut s'avérer complexe et qui surtout forcerait les experts à adopter une posture de modélisation qui n'est pas la leur. L'approche opposée serait de **s'appuyer sur la sémantique** du domaine et sur des règles de sens communs pour doter les processus décisionnels des mêmes raisonnements implicites que font les experts.

Les différents modèles de connaissances en jeu dans l'architecture TAILOR (WORLD-DL, ACTIVITY-DL, CAUSALITY-DL) partagent des éléments communs (événements, actions, objets), mais ne sont pas formellement unifiés au sein d'un système formel. Une formalisation de ces métamodèles à un niveau supérieur nous paraît indispensable pour mettre en œuvre des algorithmes de vérification de la cohérence des modèles entre eux. Cette approche unifiée permettrait en outre de faciliter le transfert de connaissance d'un modèle à un autre. En effet, si un événement est défini dans le langage CAUSALITY-DL, il serait intéressant que cet événement soit automatiquement référencé dans un modèle WORLD-DL.

12.2.2 Faiblesse du caractère dynamique

Les implémentations courantes des structures de données pour les représentations sémantiques telles que les ontologies OWL ne sont pas faites pour manipuler des données en temps réel. Les possibilités d'interaction avec la base de faits, et donc de synchronisation entre le monde des connaissances et la simulation, sont limitées par ces structures et ne sont **pas exécutables en temps réel**. Dans les cas de nos démonstrateurs, l'interaction de l'utilisateur dans l'environnement peut toutefois se faire en temps interactif. Cette limitation est un problème qui nuit à l'approche dans les cas où l'on cherche à obtenir une interaction naturelle. En effet, bien que nous ayons pu prouver la faisabilité du couplage entre une représentation sémantique et un moteur physique pour la reconnaissance d'intention, nous avons vu que dans des cas complexes, la latence rendait impossible la mise en œuvre d'un apprentissage situé.

Nous attirons toutefois l'attention sur le fait que notre travail ne s'est pas concentré sur l'optimisation de l'implémentation. En effet, celle-ci pourrait largement tirer profit de nombreuses améliorations (moteur de règle spécifique aux représentations WORLD-DL, indexation des triplets, mise en cache). Nous sommes donc très optimistes sur la possibilité d'appliquer l'approche avec de grands modèles de connaissances.

12.2.3 La difficile définition du profil de l'apprenant

L'espace-zpd repose sur des descripteurs qui forment ses différentes dimensions. Une contrainte forte et relativement restrictive est que ces descripteurs prennent des valeurs qui doivent être partiellement ordonnées. En outre, **la définition de ces descripteurs est un véritable problème**. Il est difficile, pour un concepteur, qu'il soit informaticien, expert du domaine ou didacticien, de détermi-

ner les descripteurs adéquats ainsi que les distances séparant réellement deux classes de situations. Dans le cadre de notre démarche de réduction de l'effort de production de contenu, la définition des descripteurs est une étape qu'il faudrait automatiser. Idéalement, l'espace-zpd et l'ensemble des descripteurs qui le composent devraient être générés à partir des modèles de connaissances. En effet, il est possible d'utiliser ces modèles pour générer l'ensemble de situations possibles et de les classer au travers d'un certains nombres de paramètres. Dans le cadre des travaux de [Wang, 2013], nous avons utilisé des méthodes d'analyses de données [Escofier and Pagès, 2008] pour générer les descripteurs pour une application très restreinte. Les recherches dans cette direction devraient être poursuivies pour permettre la génération de l'espace-zpd directement à partir des modèles de connaissances à disposition et ainsi alléger encore l'effort de contenu auteur à fournir.

12.2.4 La porosité des frontières entre le domaine et l'indépendant du domaine

Pour permettre de faciliter la production des environnements virtuels pour l'apprentissage humain, nous avons privilégié une approche dirigée par les modèles de connaissances dans laquelle les processus décisionnels étaient complètement indépendants du contexte (a-domaine). Cette approche montre certaines limites lorsque la prise de décision elle-même devrait être guidée par le domaine.

Nous proposons ici deux exemples d'intersection entre les connaissances liées au domaine et la manière dont celles-ci doivent être utilisées par le moteur de scénarisation. Dans le cadre de l'application SIMADVF, l'un des critères de performance, qui a été utilisée en tant que descripteur pour l'espace-zpd est *l'organisation de l'intervention*. Ce critère permet d'évaluer la capacité de l'apprenant à planifier son activité. Dans notre application, le marqueur correspondant à ce critère a été appliqué aux tâches dans lesquelles une préparation de la tâche était prévue. Or, en réalité, ce critère relève d'un niveau supérieur d'organisation de l'activité, et non pas de l'activité elle-même, ce qu'il n'est ni possible de représenter dans nos modèles de connaissances, ni de prendre en compte dans nos modèles décisionnels.

Un autre exemple résulte des relations ambiguës entre la partie diégétique et la partie pédagogique. Dans le contexte de l'application SIMADVF, une situation qui peut être générée procéduralement est la *perte du doudou*. Il s'agit d'une situation d'apprentissage dans laquelle l'apprenant assistant de vie doit rassurer un enfant suite à la perte de son jouet fétiche. A partir des modèles de situations dramatiques de Polti, une diégétisation possible de cette situation est *l'enlèvement* : un motif instancié dans lequel le frère de l'enfant à voler l'objet fétiche. On comprend aisément que la situation de la perte du doudou et la situation du vol du doudou par l'enfant constituent deux situations d'apprentissage de difficultés différentes et mettant en jeu des compétences différentes. Elles sont pourtant traitées de manière égale, car la diégétisation ne prend pas en compte les considérations pédagogiques. L'ajout au modèle de lien entre le modèle du domaine d'apprentissage et le modèle diégétique permettrait de prévenir ce genre de cas. La nature de ces liens reste à définir, mais il faudra veiller à conserver la propriété de généralité de nos modèles.

12.2.5 Modèles pédagogiques

Nous sommes conscient que le formalisme de règles pédagogiques que nous avons proposé (voir la section 7.3.1 n'est pas du tout adapté à une utilisation par des non-informaticiens. A vrai dire, la représentation proposée ne pouvait même pas être évaluée par des utilisateurs. Cependant, le modèle de diagnostic que nous proposons intègre déjà des règles simples dont le rôle est de sélectionner des classes de sélection dans la zone proximale de développement de l'apprenant en parcourant l'espace. Dans un premier temps, dans une perspective toujours indépendante du contexte, le modèle de diagnostic pourrait être enrichi. Notamment, il serait pertinent de décrire des règles de sélection à

partir de la valeur de conflit pour sélectionner des classes de situations dans lesquelles il peut y avoir *misconception*.

Dans un second temps, l'approche de génération à partir des modèles de connaissances pourrait être étendue à la génération du modèle pédagogique dans les cas où une élicitation du domaine d'apprentissage est possible. En effet, il existe des méthodes de représentation des contenus pédagogiques qui peuvent servir de support à une génération de règles pédagogiques. Nous avons évoqué dans l'état de l'art (chapitre 3) les espaces de connaissances qui formalisent des réseaux de pré-requis entre des connaissances (ou compétences, selon les travaux). Un tel réseau pourrait permettre la génération automatique des règles de sélection donnant des préférences sur certains descripteurs (considéré alors comme des connaissances/compétences). L'approche pourrait également largement bénéficier des langages de modélisation pédagogiques tels que IMS-LD [Koper and Olivier, 2003] qui organise l'orchestration des contenus pédagogiques (quelques éléments d'état de l'art sur les langages de scénarisation pédagogiques sont fournis dans l'annexe B). En effet, la description de l'agencement logique des activités, des objectifs d'apprentissage et des pré-requis pourrait permettre de générer le modèle pédagogique. Par ailleurs, un langage de modélisation pédagogique pourra également permettre d'adapter la scénarisation à un contexte donné en laissant l'opportunité au formateur de décrire des séquences particulières. Il faudrait alors modifier notre approche générale pour qu'elle intègre les préférences liées à ces modèles dans la prise de décision.

12.2.6 La temporalité pour la diégétisation

Nos travaux sur la diégétisation ne constituent qu'une première piste de recherche et mériteraient d'être poursuivis. La proposition n'a pas pu être évaluée dans le cadre de cette thèse, mais nous pouvons tout de même apercevoir un certain nombre de limites dans l'approche utilisée. L'une des limites réside dans le pilotage de la charge émotionnelle qui pourrait bénéficier d'une mise en exergue des antagonismes pour susciter une réelle *tension* (sous quelques formes que ce soit).

La limite qui nous paraît la plus réhibitoire est le manque de prise en compte de la dynamique des contenus narratifs. En effet, l'approche adoptée est une approche discrétisée qui n'agit que sur des états du monde. Les changements d'état sont certes pris en compte dans le calcul de la charge émotionnelle, il ne sont pas pris en compte dans les cadrages. Ainsi, tout comme il existe des motifs diégétiques qui sont des configurations particulières des éléments de la diégèse, il pourrait y avoir des *événements diégétiques* qui seraient des changements d'états particuliers au sein de la diégèse. D'autres travaux pourraient également être réalisés sur la manière de contrôler les personnages au sein de la simulation pour qu'ils correspondent aux rôles qui leur sont affectés (ou à l'inverse, leur affecter des rôles qui correspondent à leur personnalité), tout en veillant à la cohérence de leurs comportements. Ces questions ont d'ailleurs donné lieu à une proposition de thèse qui sera réalisée par Mélody Laurent à partir de décembre 2014.

12.3 Perspectives

En plus des améliorations que nous avons évoquées pour pallier les limites de l'approche. Nous avons envisagé différentes pistes de réflexion pour poursuivre les travaux de cette thèse. Celles-ci concernent notamment l'intégration de l'approche au sein d'un contexte réel que ce soit pendant la conception, l'adaptation ou l'exécution de l'environnement virtuel.

12.3.1 Ingénierie dirigée par les modèles et cycle de vie des produits

Nous avons proposé une approche de scénarisation s'appuyant sur des modèles de connaissances pour automatiser certains processus tout en restant indépendants du contexte. Cependant, l'intervention d'experts pour renseigner les modèles de connaissances est toujours nécessaire. Bien que la posture ontologique permette de faciliter la réutilisation de contenu déjà produit, il existe toujours un gap entre la conception des systèmes techniques (sur lesquels on cherche à former des apprenants) et la production d'un environnement virtuel qui va les simuler. Or, dans les méthodes de conception actuelle, un énorme effort de création de contenu est fourni, mais celui-ci n'est pas directement réutilisable pour la production de l'environnement virtuel. La tendance nouvelle à concevoir les systèmes en adoptant une approche d'ingénierie dirigée par les modèles offre une opportunité de réutilisation des contenus créés. Dans une perspective à long terme, il serait intéressant de questionner l'intégration des besoins spécifiques aux formations en environnement virtuel dans la gestion du cycle de vie du produit (Product Lifecycle Management).

12.3.2 Réflexion sur les outils d'accompagnements

Dans cette thèse, nous avons proposé des modèles de représentation des connaissances pour la production d'environnements virtuels offrant des possibilités de scénarisation personnalisée. Bien que nous ayons veillé à offrir des moyens de représentation qui soient intelligibles, il n'en reste pas moins que la manipulation de ces modèles nécessiterait des outils dédiés. Idéalement, une suite complète pour la création des contenus devrait permettre de créer chaque modèle séparément et d'établir les liens entre ces modèles. Une telle suite devrait offrir des interfaces utilisateurs riches et innovantes pour permettre de rendre compte de la complexité des domaines traités tout en offrant des vues accessibles à l'humain. En outre, des fonctionnalités de vérification devraient permettre de valider les modèles et, surtout, de mettre à jour leurs incomplétudes et les incohérences par rapport aux autres modèles.

Des outils dédiés aux formateurs doivent également être mis en place pour permettre l'utilisation de l'architecture proposée. En effet, la structure de profil de l'apprenant n'est pas nécessairement adaptée à une manipulation par un non-informaticien. Il est nécessaire de fournir un outil permettant aux formateurs de donner des informations pour le profil de l'apprenant, ou d'en retirer, sans qu'il lui soit nécessaire de manipuler un espace multidimensionnel comprendre la structure de l'espace-zpd. Une vraie réflexion doit être menée sur les possibilités d'intervention du formateur. En l'état, l'approche que nous proposons prévoit que le formateur puisse influencer sur les décisions du système de scénarisation en lui donnant des consignes. Il faudra dans un premier temps définir quelles sont les consignes réellement pertinentes du point de vue du formateur. En effet, il ne s'agit pas de donner aux formateurs un ensemble de fonctionnalités dont ils n'auraient pas usage. Une fois les fonctionnalités pertinentes définies, il faudra réfléchir à la manière de présenter les informations et les interfaces.

12.3.3 Coordination avec un tuteur intelligent

Nous avons proposé une approche de scénarisation personnalisée qui visent à produire un contenu intradiégétique, qui donc, ne relève que du contenu relatif au domaine simulé. Cette scénarisation permet de produire les situations susceptibles d'être pertinentes d'un point de vue pédagogique. Cependant, le manque de connaissances de l'apprenant ne peut pas toujours être comblé par la scénarisation. La mise en œuvre d'un tutorat capable de fournir des assistances à l'apprenant est donc indispensable. Ces assistances pourraient être intradiégétiques ou extradiégétiques selon qu'elle relève, ou non, du contenu de la simulation. La relation entre la scénarisation personnalisée et le tutorat nécessite d'être clairement définie. En effet, l'un produit du contenu scénaristique en

vertu de ses propres règles d'adaptation, l'autre utilise son propre modèle de décision pour assister l'apprenant. Ainsi, la scénarisation pourrait prescrire une situation difficile pour créer une certaine tension chez l'apprenant, mais l'effet serait rendu caduque si le tutorat assistait l'apprenant à ce moment. En outre, il faut considérer le niveau diégétique des assistances d'un tuteur. Les assistances intradiégétiques peuvent constituer des ingérences dans le processus de diégétisation au cours de la scénarisation. Pour résoudre ces conflits qui peuvent être sources d'incohérences, il est nécessaire d'adjoindre une supervision à plus haut niveau entre la scénarisation et le tutorat. Ce niveau supérieur devrait contenir un modèle de l'apprenant et un modèle de progression pour piloter à la fois le tutorat et la scénarisation.

12.3.4 Intégration du dispositif dans les formations

La question doit être posée de savoir comment l'environnement virtuel, et sa scénarisation, doivent s'intégrer dans un contexte réel de formation. Cette thèse considère la problématique de la scénarisation uniquement d'un point de vue informatique et uniquement en ce qui concerne le contenu proposé au sein d'un environnement virtuel. Cependant, dans une formation, plusieurs ressources (dont l'environnement virtuel fait partie) sont mises en jeu pour permettre l'acquisition de connaissances et de compétences différentes. Il est important de déterminer quelle est la place du dispositif au sein de cette formation. Cette question est loin d'être triviale et doit être posée pour chaque domaine et chaque type de formation. La réponse pourra notamment être trouvée par l'intégration du dispositif au sein des parcours d'apprentissage décrit par des langages de scénarisation pédagogiques.

12.3.5 Modèle de progression reposant sur le *Périple de l'Apprenant*

Le *flow* permet de maintenir la motivation sur le court terme, c'est à dire au niveau microscénaristique et au niveau mésoscénaristique. Un modèle de progression reposant sur le *flow*, et donc sur le fait d'être au sein de la ZPD, constitue un bon modèle pour ces deux niveaux scénaristiques. En revanche, celui-ci peut s'avérer trop pauvre pour la progression au niveau macrosénaristique. A l'instar de [Delmas, 2009], nous proposons de moduler les objectifs pédagogiques pour la prise de décision au cours du parcours d'apprentissage en nous inspirant du **Périple du Héros** [Campbell, 2008]. Il s'agit d'un schéma narratif archétypique dans lequel un héros est appelé à l'aventure, il y rencontre un certain nombre d'épreuves au cours desquelles il évolue jusqu'à une épreuve décisive. A l'issue de cette épreuve, le héros victorieux détient un *pouvoir* qui lui permettra d'améliorer le monde.

L'adaptation de ce schéma en tant que modèle de contrôle multiniveaux, que nous proposons d'appeler le *Périple de l'Apprenant*, offrirait des modes de prise de décision différents au cours de la progression au sein du parcours d'apprentissage. Notamment, celui-ci propose de produire une classe de situation très difficile (complètement en dehors de la ZPD) en début d'utilisation du dispositif. On pourrait penser que cela *frustre* l'apprenant, et c'est le cas à court terme. Cependant, à long terme, après plusieurs moments d'apprentissage, l'apprenant sera invité à retrouver une situation du même type et aura donc le plaisir de se rendre véritablement compte de sa progression.

Chapitre 13

Conclusions

“ *This story is about the Baudelaires. And they are the sort of people who know that there's always something. Something to invent, something to read, something to bite, and something to do, to make a sanctuary, no matter how small. And for this reason, I am happy to say, the Baudelaires were very fortunate indeed.* ”
The Bad Beginning, A Serie Of Unfortunate Events I, Lemony Snicket

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent de la problématique de la scénarisation, en tant qu'étape de spécification, des environnements virtuels à des fins de formation au travers d'objectifs tant sur la production de l'environnement virtuel que sur le contenu du scénario.

Sur le plan de la production de l'environnement virtuel, l'ambition est de faciliter leur conception et leur appropriation par les utilisateurs. Pour cela, nous avons identifié trois objectifs principaux : le passage à l'échelle pour produire des environnements virtuels simulant des environnements de plus en plus complexes, la réutilisabilité des ressources et enfin la maintenabilité du dispositif. Ces objectifs entrent en conflit avec les ambitions liées à l'utilisation du dispositif en lui-même. En effet, celui-ci doit permettre une large liberté d'action dans une grande variabilité de scénario présentant à la fois un intérêt pédagogique et narratif. Afin de respecter le paradigme d'apprentissage que nous avons choisi, à savoir le paradigme constructiviste, le contenu proposé doit être valide sur le plan écologique : il doit correspondre à des situations réellement observables sur le terrain.

Pour permettre la conciliation de ces objectifs, nous avons proposé une approche générale de détermination d'objectifs scénaristiques explicites, à la fois pédagogiques et narratifs dans les environnements virtuels pour la formation en accord avec un profil de l'apprenant. L'originalité de l'approche est de permettre la génération procédurale du scénario à partir d'éléments de connaissance sur le domaine renseignés par des non-informaticiens.

Cette approche est mise en œuvre dans l'architecture TAILOR et le moteur du même nom. Les connaissances sur le domaine y sont distinguées en trois aspects : l'activité reposant sur le métamodèle ACTIVITY-DL, la causalité reposant sur le métamodèle CAUSALITY-DL et le monde reposant sur le métamodèle que nous avons proposé WORLD-DL. Ces métamodèles sont inspirés de différents travaux issus de différentes disciplines des sciences humaines. À la différence des formalismes informatiques usuels, ils permettent d'intégrer les facteurs humains dans les représentations et peuvent être renseignés par des experts non-informaticiens (ergonomes, didacticiens, etc.) en utilisant des outils d'éditions graphiques notamment.

Nous avons proposé une approche de modélisation générique d'un profil de l'apprenant à partir des types de situations que celui-ci peut rencontrer dans l'environnement. L'association de cette modé-

lisation sous forme d'espace de classes de situations avec un modèle de l'incertain permet d'inférer la capacité de l'apprenant à gérer des situations particulières et donc de dessiner la zone proximale de développement. A partir de règles de sélection pédagogiques en accord avec un modèle de progression, il est possible de sélectionner en temps interactif des points d'intérêt pour la génération de situation. Ces points d'intérêt sont instanciés en tant que situations d'apprentissage en raisonnant sur les modèles de domaine à disposition. C'est donc avec un coût minimal par rapport à la modélisation du domaine d'apprentissage que l'approche TAILOR construit un scénario pédagogique adapté à l'apprenant. Afin d'apporter de l'intérêt narratif au contenu des objectifs scénaristiques pédagogiques, ceux-ci sont diégétisés en accord avec un modèle de situations dramatiques décrites dans le métamodèle DIEGETIC.

Afin de faciliter la production de l'environnement virtuel, nous faisons également reposer son exécution sur une base de faits en accord avec le modèle du monde. Il est ainsi possible de modifier le contenu de l'environnement virtuel, de manière interactive ou prédéterminée, en modifiant le modèle du monde.

Nos propositions ont été implémentées et appliquées dans différents contextes de formation dans des domaines complexes. Nous avons, par ailleurs, validé informatiquement un certain nombre de propriétés de notre approche. Bien que présentant certaines limites, naissant justement de la distinction entre les connaissances sur le domaine et les modèles décisionnels, nous pensons que l'approche consistant à générer le contenu scénaristique procéduralement à partir de modèles de connaissances permet de s'affranchir grandement du goulet d'étranglement liés à la description manuelle des scénarios. Par ailleurs, le couplage de la simulation avec une base de connaissances sémantique offre des perspectives intéressantes qui méritent d'être investiguées (raisonnement des personnages virtuels autonomes, couplage avec un moteur physique pour reconnaissance d'intention).

Une grande limite de notre approche est que, bien qu'elle utilise des modèles de connaissances qui permettent la réutilisation des ressources décrites dans les mêmes langages, il n'est pas possible d'utiliser des connaissances déjà élicitées par ailleurs. Notamment dans les domaines auxquels nous nous intéressons, les connaissances sur le domaine peuvent avoir été déjà largement décrites dans le cadre des processus liés à la gestion du cycle de vie des produits. Afin de pouvoir capitaliser sur ces connaissances, il serait nécessaire d'adopter une posture ancrée dans le paradigme de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles. Il serait ainsi possible de dériver les modèles du domaine nécessaires à l'environnement virtuel à partir des modèles décrits en amont. Egalement, il pourrait éventuellement être pertinent d'utiliser des méthodes de fouilles de données pour générer une partie des modèles du domaine à partir de différentes sources d'informations telque des plans d'installations, des descriptions de procédures, des règles formelles, etc.

Cinquième partie

Annexes

Annexe A

Glossaire

“ *I know that having a good vocabulary doesn't guarantee that I'm a good person, but it does mean I've read a great deal. And in my experience, well-read people are less likely to be evil.* ”
The Slippery Slope, A Serie Of Unfortunate Events X, Lemony Snicket

action	Une action est un processus physique ou cognitif, pouvant être mis en œuvre par un agent à l'issue d'une décision. Une action peut être ponctuelle ou durable.
agent	Un agent est un objet capable d'interagir de manière autonome avec son environnement, c'est à dire à la fois de le percevoir et d'effectuer des actions dessus. Un agent peut être un utilisateur humain ou un personnage virtuel autonome.
comportement	Un comportement correspond à une manière d'évoluer de l'objet ou du système qui en est doté. Un comportement peut être ponctuel ou durable.
diégèse	La diégèse est l'univers d'une œuvre, elle correspond au monde simulé.
diégétisation	La diégétisation est le processus de création progressif de l'univers d'une œuvre.
endogène	Un événement endogène est la résultante de comportements du domaine, que ceux-ci relèvent d'actions de l'utilisateur, d'actions des personnages virtuels ou de comportements propres au système lui-même.
état	Un état est une condition instantanée dans laquelle se trouve un objet ou un système.
événement	Un événement est un fait marquant, qui survient à un moment donné. Un événement correspond à une agrégation de changements d'états liés de manière causale, signifiante du point de vue de l'observateur. Un événement peut être ponctuel ou durable.
exogène	Un événement exogène est un événement déclenché de manière externe au système.

extradiégétique	Un événement extradiégétique est un événement qui n'appartient pas au domaine simulé, se situant donc en dehors de la diégèse.
histoire	L'histoire, ou <i>fabula</i> , est la séquence d'événements prenant place dans le monde, dans un ordre chronologique.
intradiegétique	Un événement intradiégétique est un événement qui appartient au domaine simulé et se situe donc dans la diégèse.
méta-modèle	Un méta-modèle est un modèle qui a pour particularité de modéliser d'autres modèles.
modèle	Un modèle est un objet permettant de décrire la complexité inhérente à un phénomène, un système, une situation, un domaine, etc., dans un but particulier. Un modèle est écrit dans un langage de modélisation. Un langage de modélisation se concentre sur certains aspects de ce qu'il modélise.
objet	Un objet est une entité, concrète ou abstraite, ayant une existence propre, c'est-à-dire pouvant être décrite ou manipulée sans qu'il soit nécessaire de connaître d'autres objets.
récit	Le récit, ou <i>sjuzet</i> , est une séquence d'événement extraite de l'histoire, d'après un point de vue particulier et dans un ordre particulier.
scénario	Un scénario est un ensemble d'événements particuliers, partiellement ordonnés et instanciés dans un environnement virtuel.
scénarisation	La scénarisation est un processus comprenant à la fois la spécification du ou des déroulements possibles ou souhaitables de la simulation, et le contrôle (exécution et/ou suivi et correction) du déroulement des événements en temps-réel.
situation	Une situation correspond à une agrégation d'états.
trame scénaristique	Une trame scénaristique, ou <i>plot</i> , est un ensemble de points clés partiellement ordonnés et non instanciés.

Annexe B

Langages de modélisation pédagogique

Nous avons volontairement fait le choix de ne pas intégrer l'état de l'art sur les langages de scénarisation pédagogique dans notre mémoire. En effet, ces langages sont destinés à la scénarisation des parcours d'apprentissage en général et ne sont pas adaptés à la scénarisation d'un contenu lié à un domaine particulier au sein d'un environnement virtuel. Toutefois, comme nous le précisons dans notre discussion 12, de tels langages, utilisés par des experts pédagogues, pourraient permettre de générer des règles pédagogiques pour la sélection dans l'espace-zpd.

Dans la communauté des EIAH, les langages de scénarisation pédagogique ont l'appellation plus générale de **langage de modélisation pédagogique** (LMP). D'après la définition de [Schneider,], les LMP servent "*à concevoir, implémenter, décrire, etc. des scénarios pédagogiques*". Cette modélisation peut se faire sous plusieurs angles : le concepteur, l'enseignant, le dispositif informatique, et dans plusieurs optiques : la conception, l'exécution, la mise en œuvre, etc. Elle peut également se faire à différents niveaux de granularité selon qu'elle considère les activités d'apprentissage, l'organisation des activités ou le parcours d'apprentissage.

Alors que la communauté des EIAH commençait à foisonner de langages de scénarisation, IMS-LD [Koper and Olivier, 2003] a été proposé afin d'apporter un standard permettant la **réutilisabilité** et **l'interopérabilité** des scénarios d'apprentissage. Celui-ci a fait l'objet de nombreuses itérations et l'ensemble de ses spécifications est disponible sur [Learning, 2003]. La représentation des connaissances dans IMS-LD repose sur la **métaphore théâtrale**. Les unités d'apprentissage sont des *pièces* organisées en **actes** dans lesquels interviennent des ACTEURS qui jouent des *rôles*. Les rôles, *tuteurs* ou *apprenant* se voient attribués des *activités* (lire un document, débattre un sujet, résoudre un problème, etc.). La phase de conception du scénario donne lieu à la production d'un diagramme d'activité UML qui est ensuite transformé en un document XML conforme à la spécification IMS-LD et interprétable par des systèmes informatiques.

D'autres langages tels que LDL [Martel et al., 2006], CPM [Laforcade et al., 2005] ou LAMS [Dalziel, 2003] adoptent la même approche de modélisation par la description des activités d'apprentissage. Les connaissances décrites par les LMP relèvent de la stratégie d'apprentissage. Ainsi, il est en théorie possible de décrire n'importe quel type de stratégie pédagogique avec IMS-LD. Cependant, pour rendre possible un apprentissage expérientiel, il faudrait décrire toutes les activités sources d'expérience. En effet, ces langages ne permettent finalement pas de décrire les connaissances sur le domaine considéré et donc n'ont pas de pouvoir génératif par rapports au contenu des activités en elle-même.

La description des connaissances par les LMP pour notre contexte d'étude paraît impossible. Les domaines sont complexes parfois mal définis et surtout, notre contrainte est le manque d'une élicitation du domaine d'apprentissage. Malgré tout, nous pensons que ces langages présentent un intérêt majeur et qu'ils doivent être utilisés à plus haut niveau. Notamment, un langage tel que IMS-LD permet de coordonner l'utilisation de l'EVAH en tant qu'activité d'apprentissage avec les autres activités d'apprentissage (cours, évaluations, etc.), mais également il peut servir de support à la prise en compte des préférences du formateur dans les décisions du système.

Annexe C

Les couches de modélisation pour la représentation du monde

La figure C.1 permet de comprendre comment s'articulent les différentes couches de modélisation pour la représentation du monde avec WORLD-DL :

- Les couches RDF et RDF-S/OWL (en vert) correspondent à des langages standards ;
- la couche WORLD-DL (en bleu) constitue notre contribution sur un langage de modélisation du monde ;
- les couches MODÈLE DU MONDE et ETAT DU MONDE constitue un exemple connaissances structurelles et opérationnelles que peuvent renseigner et faire évoluer les experts.

RDF définit un modèle de graphe étiqueté pour représenter l'information. Un modèle est constitué d'assertion (*statement*) reliant trois ressources entre elles : un sujet, un prédicat et un objet.

RDF-Schema est un vocabulaire de RDF. Il fournit les mécanismes pour décrire des ressources liées entre eux et les relations qui les lient. Notamment, RDF-S permet de décrire le *domain* et le *range* d'une relation, c'est-à-dire qui peut être le sujet, respectivement l'objet, d'une relation.

OWL-DL est une extension de RDFS-S. Il permet d'avoir beaucoup plus d'expressivité dans la description sémantique. Notamment, il permet de décrire des cardinalités sur les relations et de distinguer les concepts et les instances.

Le métamodèle que nous proposons repose sur deux couches. La première permet de définir à plus haut niveau un ensemble d'éléments utilisé dans le métamodèle. Notamment, elle définit la notion de *Component* et la sémantique qui y est associée : une entité *hérite* des propriétés des *composants* qui la composent.

WORLD-DL permet de décrire particulièrement des connaissances liées à un monde donné. Il définit une typologie d'objet à haut niveau, des moyens d'interaction (actions, événement) et l'aspect dynamique par la notion de comportement.

Les experts peuvent décrire un modèle de monde à partir des éléments fournis dans WORLD-DL. Celui-ci est structurel : il informe de la structure et du fonctionnement indépendamment d'une réelle mise en œuvre.

L'état du monde courant est sauvegardé dans une base sous-tendue par le métamodèle WORLD donc, en réalité, un graphe RDF, constitué d'assertions, dans lequel toute la sémantique des niveaux supérieurs est présente

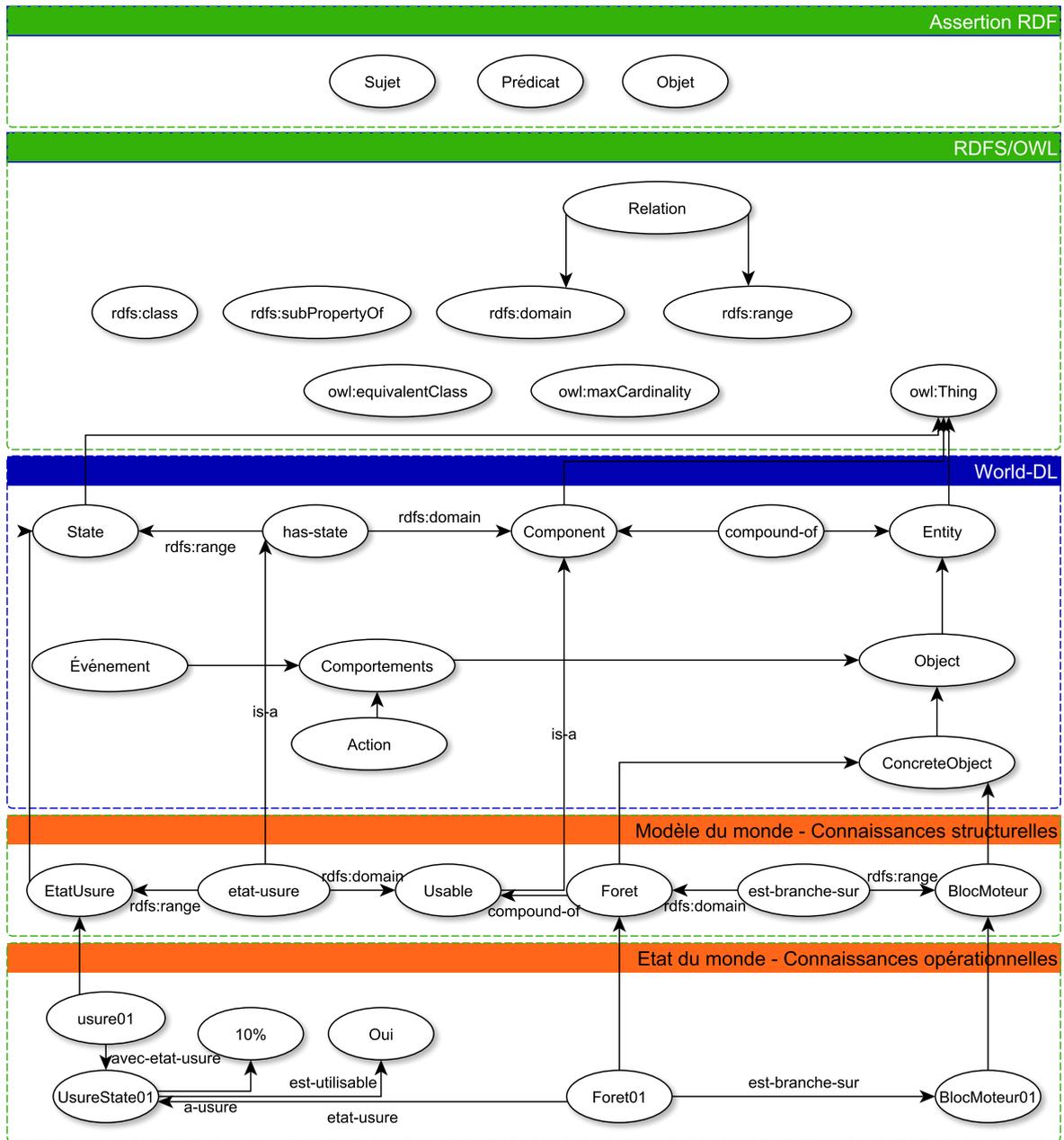


FIGURE C.1 – Les différentes couches de modélisation en jeu pour la représentation du monde

Annexe D

Cas d'application

Sommaire

D.1 Démonstrateur NIKITA	227
D.1.1 Modèle d'activité	227
D.1.2 Modèle du monde	227
D.2 Cas d'application SIMADV	227
D.2.1 Modèle du monde	227
D.2.2 Modèle d'activité	227
D.2.3 Modèle de causalité	227

D.1 Démonstrateur NIKITA

D.1.1 Modèle d'activité

D.1.2 Modèle du monde

D.2 Cas d'application SIMADV

D.2.1 Modèle du monde

D.2.2 Modèle d'activité

D.2.3 Modèle de causalité

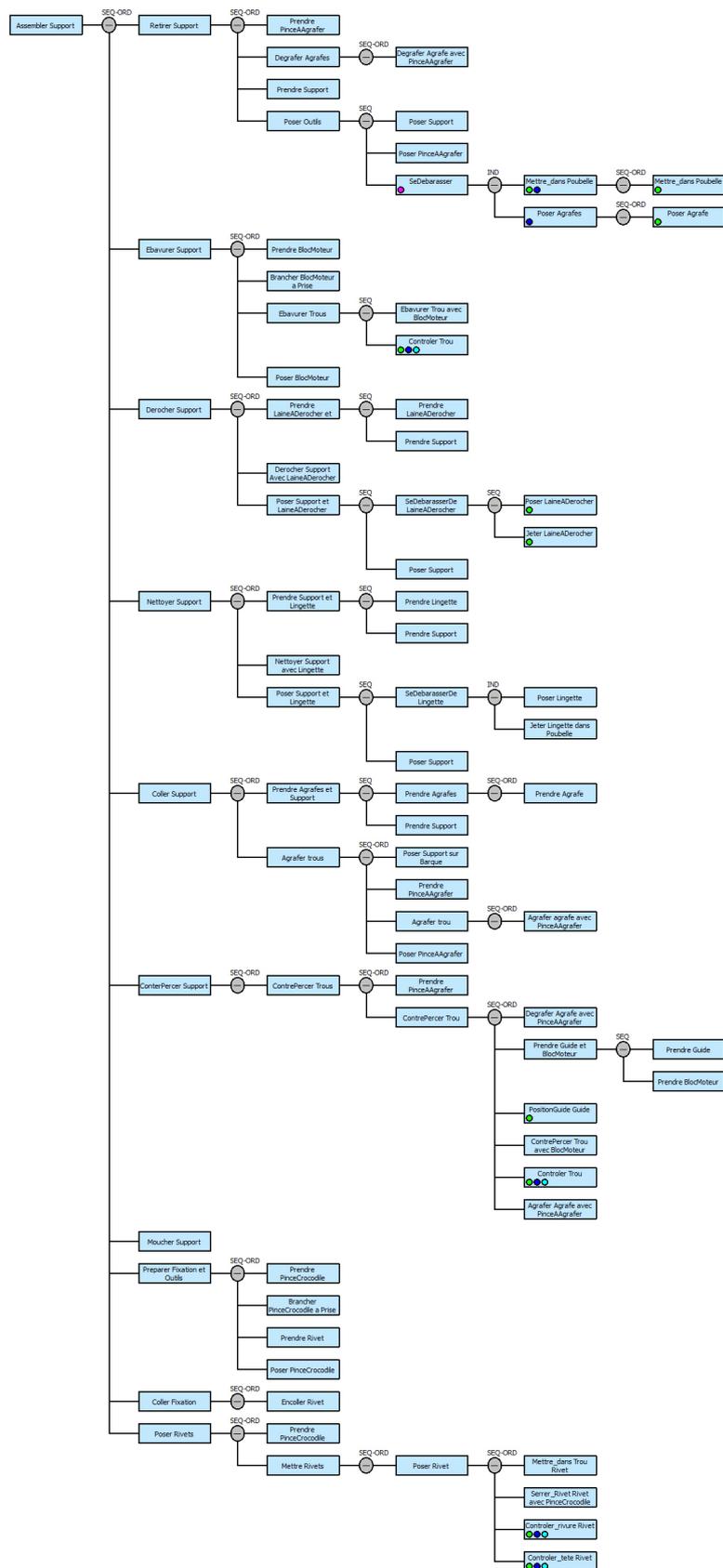


FIGURE D.1 – Modèle d'activité pour le démonstrateur NIKITA

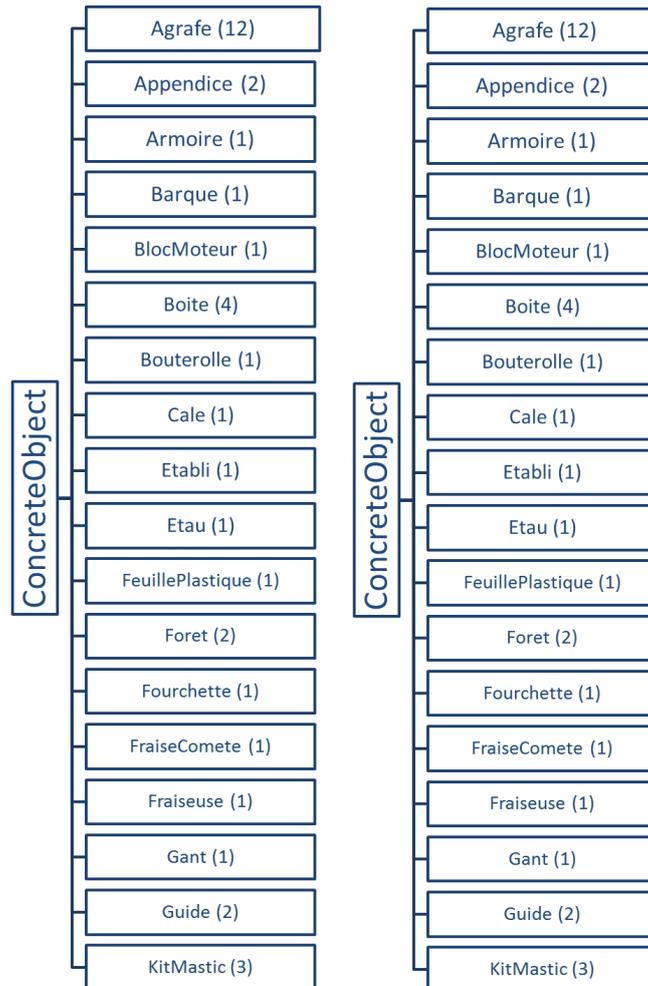


FIGURE D.2 – Classes d'objets définies pour le démonstrateur NIKITA (le nombre entre parenthèses indique le nombre d'instances de cette classe)

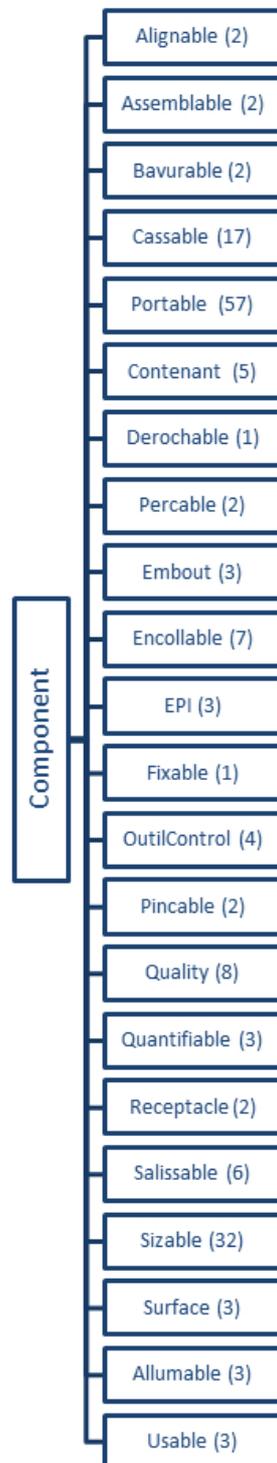


FIGURE D.3 – Composants définis pour le démonstrateur NIKITA (le nombre entre parenthèses indique le nombre d’instances héritant de ce composant)

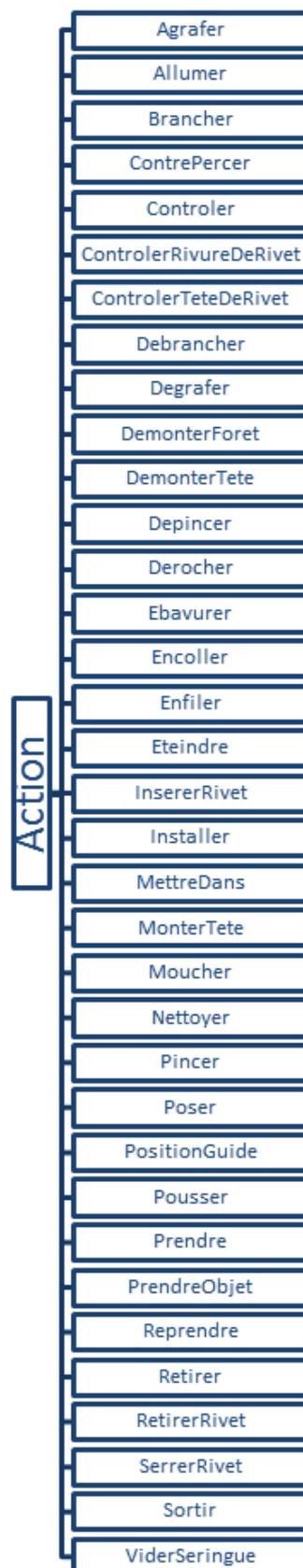


FIGURE D.4 – Actions définies pour le démonstrateur NIKITA

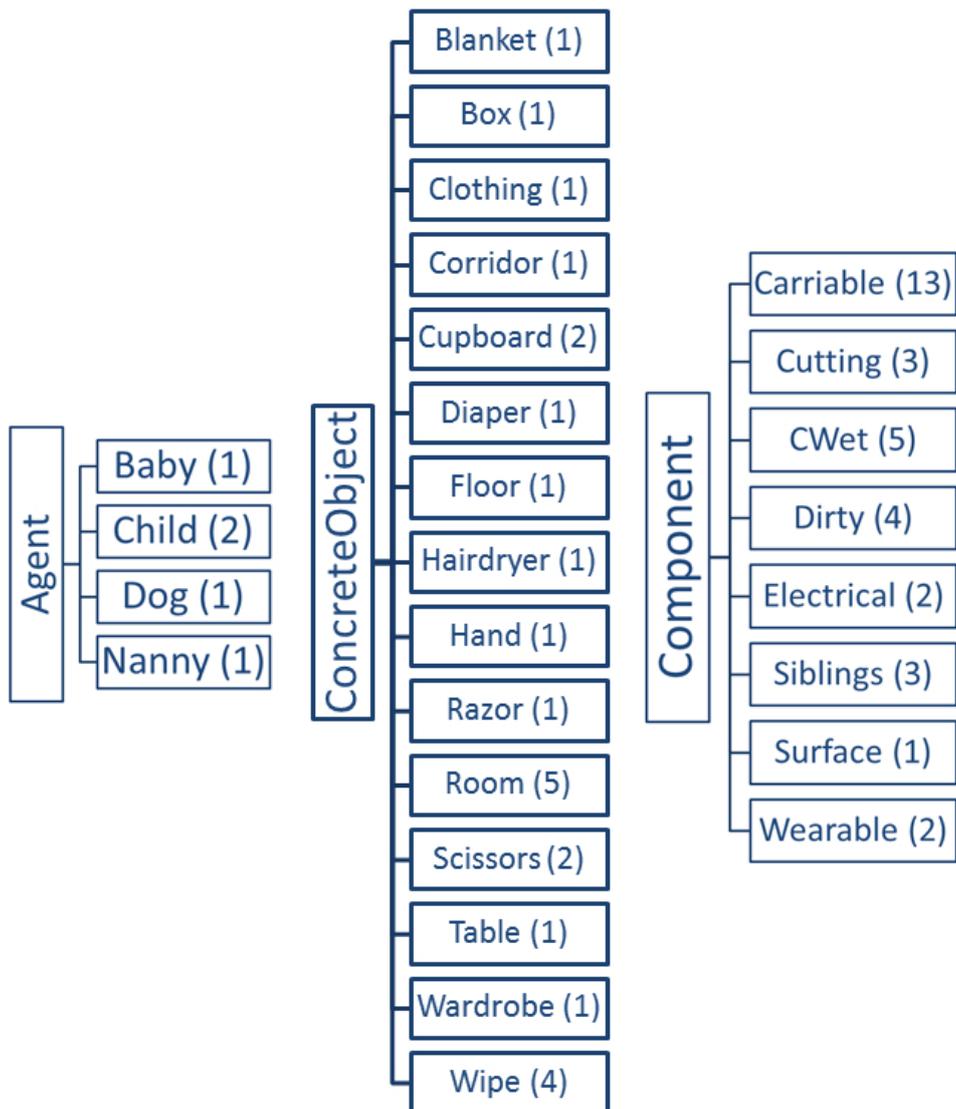


FIGURE D.5 – Agents, objets et composants définis pour le scénario SIMADVF (les nombres entre parenthèses indiquent le nombre d'instances).

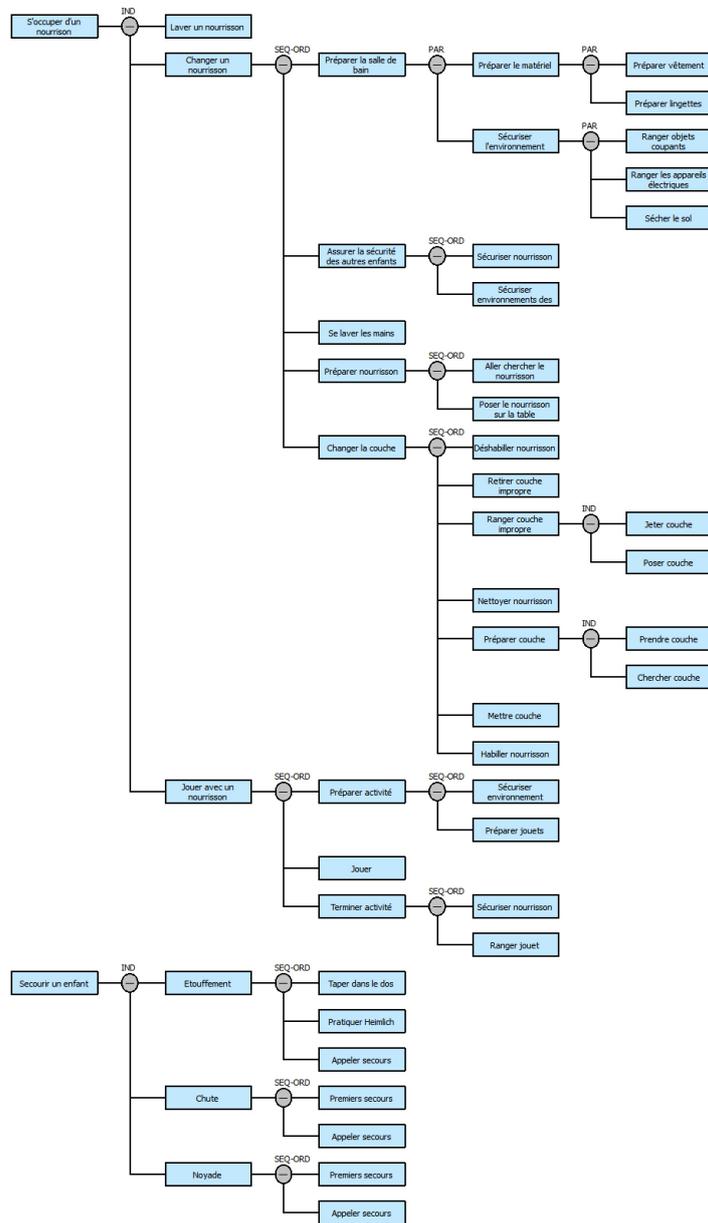


FIGURE D.6 – Modèle d'activité pour SIMADV

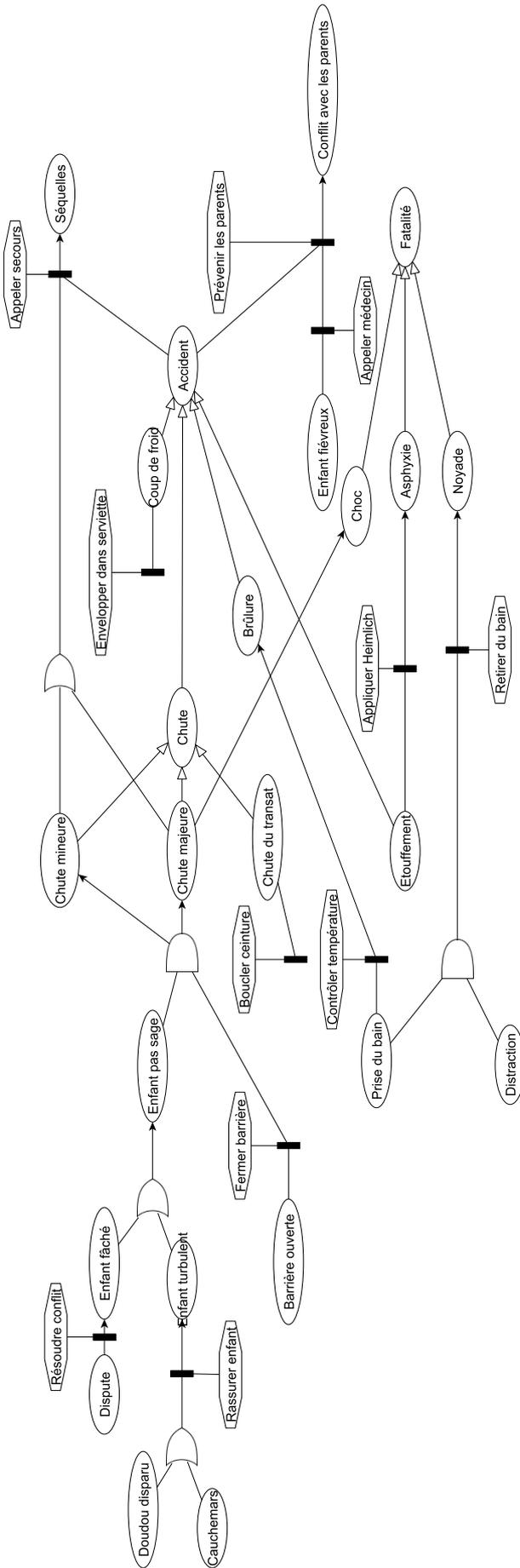


FIGURE D.7 – Modèle de causalité pour SIMADVF

Annexe E

Diagrammes UML

Sommaire

E.1 Diagramme UML de la librairie ZPDSPACE	235
E.2 Diagramme UML de l'algo génétique	235
E.3 Diagramme UML du WORLDMANAGER	235

E.1 Diagramme UML de la librairie ZPDSPACE

E.2 Diagramme UML de l'algo génétique

E.3 Diagramme UML du WORLDMANAGER

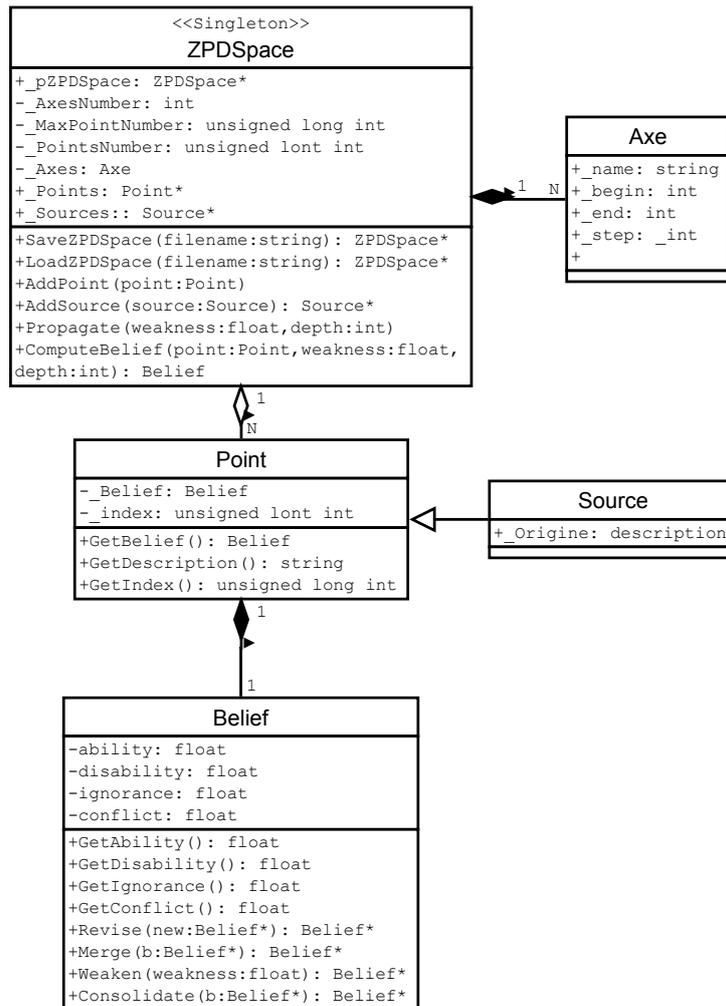


FIGURE E.1 – Modèle UML de la librairie ZPDspace

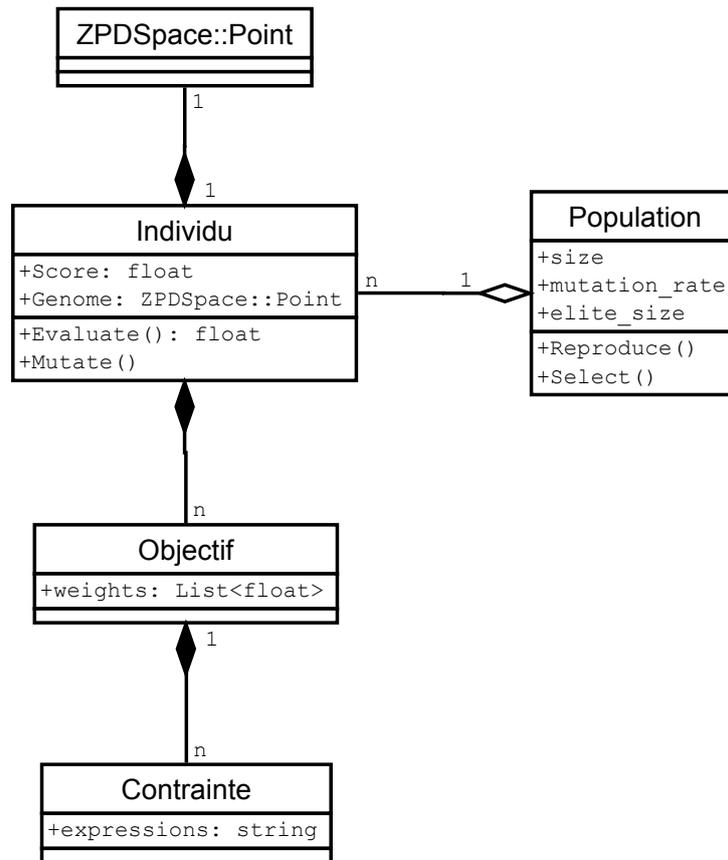


FIGURE E.2 – Modèle UML pour l’algorithme génétique

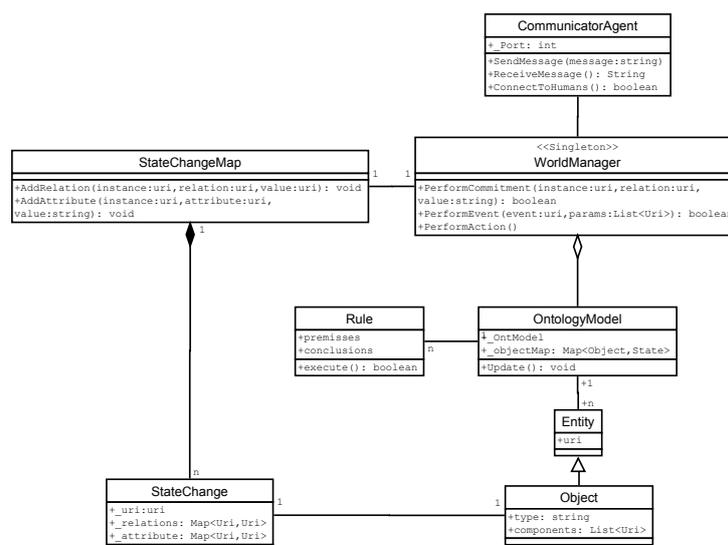


FIGURE E.3 – Modèle UML du WORLDMANAGER

Annexe F

Protocole de communication avec le WORLDMANAGER

Requêtes		
Requête	Description	Réponse
REQUEST_ASK	Demander si un agrégat d'assertions est vrai	INFORM_ASK
REQUEST_SELECT	Demander pour quelles variables un agrégat d'assertions est vrai	INFORM_SELECT
REQUEST_WORLDSTATE	Demander l'état du monde complet	INFORM_WORLDSTATE
REQUEST_ACTIONS	Demander les actions disponibles sur une instance d'objet	INFORM_ACTIONS
REQUEST_ACTION_PARAMETERS	Demander les paramètres d'une action	INFORM_ACTION_PARAMETERS
REQUEST_HAPPENINGS	Demander la liste des événements exogènes	INFORM_HAPPENINGS
REQUEST_COMMITMENTS	Demander la liste des attributs <i>commitmentables</i>	INFORM_COMMITMENTS
REQUEST_EVENTS	Demander la liste des événements endogènes	INFORM_EVENTS
Performatives		
Type	Description	Notification
PERFORM_COMMITMENT	Demander l'exécution d'un commitment	INFORM_ACK_COMMITMENT
PERFORM_ACTION	Demander l'exécution d'une action par un agent, ou par l'utilisateur	INFORM_ACK_ACTION
PERFORM_EVENT	Demander l'exécution d'un événement	INFORM_ACK_EVENT
Notifications		
Type	Description	
INFORM_STATECHANGE	Notifie automatiquement les changements d'états du monde	
Messages de contrôle		
Type	Description	
WM_CONTROL	Réinitialiser, recharger les règles, mettre en pause, pas à pas	

TABLE F.1 – Protocole de communication avec le WORLDMANAGER

Annexe G

Représentation XML d'un profil d'apprenant

Profil de l'apprenant sérialisé sous forme XML

```
<ZPDSpace>
  <axesNumber>8</axesNumber>
  <sourcesNumber>1</sourcesNumber>
  <pointsNumber>0</pointsNumber>
  <axes>
    <axe>
      <name>Caracteristiques_des_enfants</name>
      <begin>0</begin>
      <end>3</end>
      <step>1</step>
      <unit>x</unit>
    </axe>
    <axe>
      <name>Relation_professionnelle</name>
      <begin>0</begin>
      <end>3</end>
      <step>1</step>
      <unit>y</unit>
    </axe>
    <axe>
      <name>Climat_de_confiance</name>
      <begin>0</begin>
      <end>3</end>
      <step>1</step>
      <unit>y</unit>
    </axe>
    <axe>
      <name>Langage_adapte</name>
      <begin>0</begin>
      <end>3</end>
      <step>1</step>
      <unit>y</unit>
  </axes>
</ZPDSpace>
```

```

    </axe>
    <axe>
        <name>Sensibilisation_a_la_prevention</name>
        <begin>0</begin>
        <end>3</end>
        <step>1</step>
        <unit>y</unit>
    </axe>
    <axe>
        <name>Pratiques_Securitaires</name>
        <begin>0</begin>
        <end>3</end>
        <step>1</step>
        <unit>y</unit>
    </axe>
    <axe>
        <name>Attentes_des_Parents</name>
        <begin>0</begin>
        <end>3</end>
        <step>1</step>
        <unit>y</unit>
    </axe>
    <axe>
        <name>Organisation_de_l_intervention</name>
        <begin>0</begin>
        <end>3</end>
        <step>1</step>
        <unit>y</unit>
    </axe>
</axes>
<source>
    <description>FROM_TRACE</description>
    <position>36507</position>
    <vector>[1;1;1;1;1;1;0;1]</vector>
    <usesNumber>1</usesNumber>
    <belief>
        <hability>0.2</hability>
        <dishability>0</dishability>
        <ignorance>0.8</ignorance>
        <conflict>0</conflict>
    </belief>
</source>
<source>
</sources>
</ZPDSpace>

```

Annexe H

Evaluation de la métaheuristique pour le diagnostic

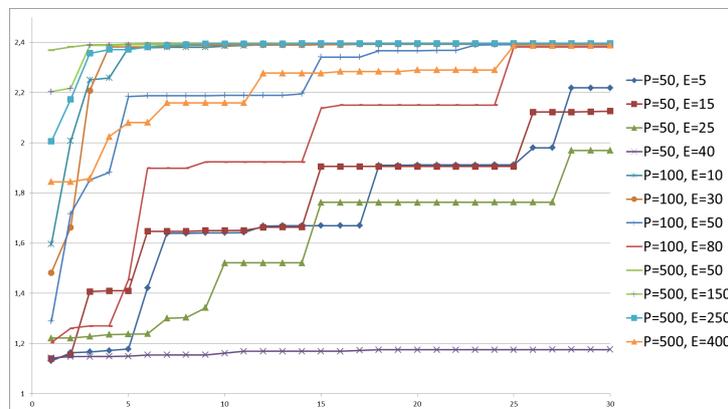


FIGURE H.1 – Evolution de la meilleure valeur de fitness pour le scénario *simple* avec différents paramètres pour les 30 premières itérations

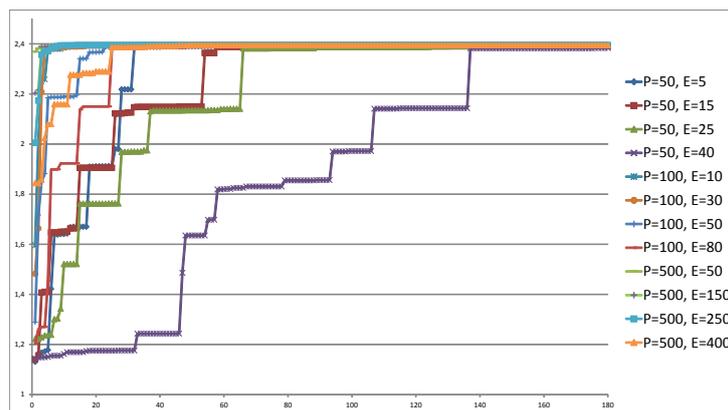


FIGURE H.2 – Evolution de la meilleure valeur de fitness pour le scénario *simple* avec différents paramètres pour les 180 premières itérations

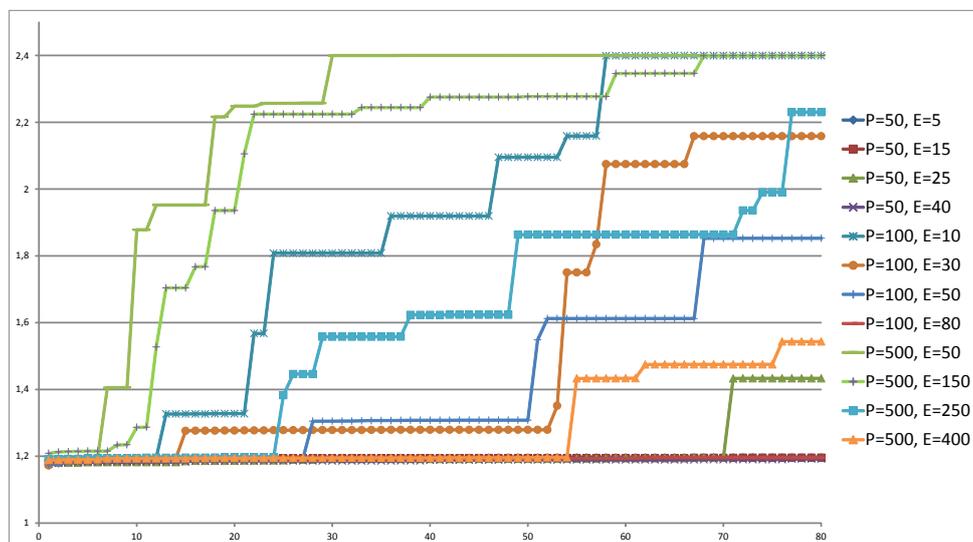


FIGURE H.3 – Evolution de la meilleure valeur de fitness pour le scénario *complexe* avec différents paramétrages pour les 80 premières itérations

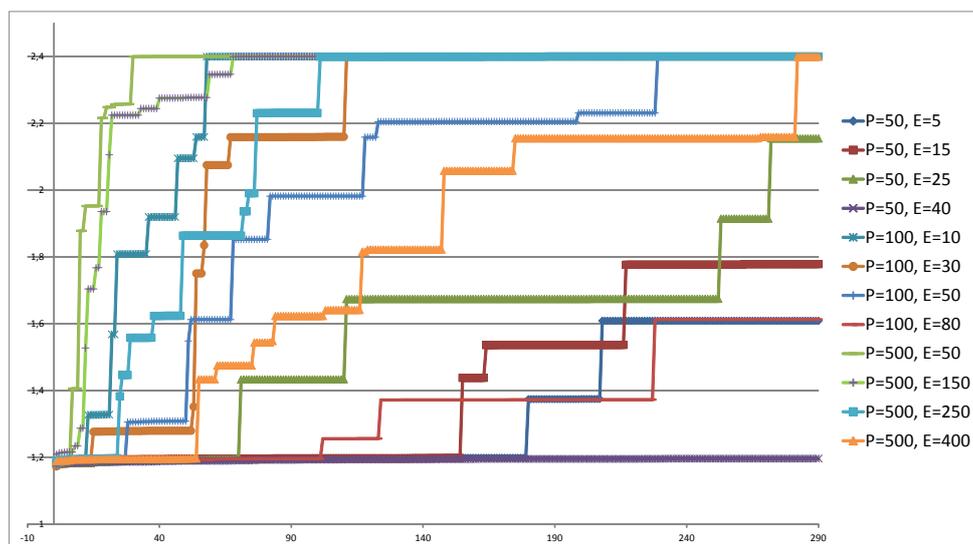


FIGURE H.4 – Evolution de la meilleure valeur de fitness pour le scénario *complexe* avec différents paramétrages pour les 290 premières itérations

Conditions	Exécution						Moyenne	Ecart-type	Ecart-type en pourcentage à la moyenne
	Exécution 1	Exécution 2	Exécution 3	Exécution 4	Exécution 5	Exécution 6			
P=50, E=5	85	89	89	94	87	85	88,17	3,37	4%
P=50, E=15	80	85	84	94	83	81	84,50	5,01	6%
P=50, E=25	75	81	81	85	80	76	79,67	3,67	5%
P=50, E=40	71	167	75	77	73	69	88,67	38,48	43%
P=100, E=10	843	1107	905	950	856	871	922,00	98,48	11%
P=100, E=30	814	1064	869	888	807	845	881,17	94,81	11%
P=100, E=50	887	776	831	854	774	808	821,67	44,60	5%
P=100, E=80	1022	721	770	767	710	742	788,67	116,80	15%
P=500, E=50	4857	4797	5051	4560	4400	4241	4651,00	304,35	7%
P=500, E=150	5859	4120	4866	4807	4355	5456	4910,50	654,73	13%
P=500, E=250	4085	3886	4997	4578	4621	3981	4358,00	439,39	10%
P=500, E=400	4128	4141	3751	4503	3975	3716	4035,67	291,52	7%

TABLE H.1 – Temps d'exécution de la métaheuristique pour le diagnostic dans le scénario simple.

Conditions	Exécution 1	Exécution 2	Exécution 3	Exécution 4	Exécution 5	Exécution 6	Moyenne	Ecart-type	Ecart-type en pourcentage à la moyenne
P=50, E=5	90	91	103	91	99	96	95,00	5,25	6%
P=50, E=15	181	84	90	86	92	82	102,50	38,64	38%
P=50, E=25	81	80	88	81	85	79	82,33	3,44	4%
P=50, E=40	70	73	81	75	77	72	74,67	3,93	5%
P=100, E=10	910	896	1044	902	960	864	929,33	64,17	7%
P=100, E=30	841	859	915	861	898	848	870,33	29,45	3%
P=100, E=50	786	819	853	823	851	782	819,00	30,51	4%
P=100, E=80	727	751	776	764	778	727	753,83	22,92	3%
P=500, E=50	4305	4568	4550	4500	4582	4299	4467,33	131,05	3%
P=500, E=150	6028	4321	4398	4312	4447	4959	4744,17	673,55	14%
P=500, E=250	4182	3969	4099	4181	4291	4267	4164,83	117,98	3%
P=500, E=400	3926	3688	3823	4079	3925	4166	3934,50	171,95	4%

TABLE H.2 – Temps d'exécution en millisecondes de la métaheuristique pour le diagnostic dans le scénario complexe.

Annexe I

Exemples de classes générées à partir du modèle du monde

Génération d'une classe pour un composant Switchable

```
1 using UnityEngine;
2 using System.Collections;
3 using System.Collections.Generic;
4 using Humans;
5 using nikita;
6 namespace nikita
7 {
8     public class Switchable: MonoBehaviour
9     {
10         public Humans.Client network;
11         public string uri;
12         public bool s_has_switch_state__plugged;
13         public GameObject frame;
14         void Start ()
15         {
16             /*Initialize here */
17             uri = null;
18             network = null;
19         }
20         void Update ()
21         {
22
23             if (network == null) {
24                 network = GameObject.Find ("Network").GetComponent<Client> ();
25                 network.InformStateChangeEvent += InformStateChange;
26                 network.InformWorldstateEvent += InformWorldState;
27             }
28
29             /*Insert your code here */
30         }
31         void InformWorldState (Humans.Message.InformWorldState msg)
32         {
33             if (uri == null) {
34                 uri = GetComponent<ClickedScript> ().worldManagerName;
35             }
36
37
38             foreach (Humans.Message.InformWorldState.State state in msg.statechange) {
39                 if (state.uri == this.uri) {
40                     foreach (Humans.Message.InformWorldState.State.Pair relation in state.relations) {
41                         }
42                     foreach (Humans.Message.InformWorldState.State.Pair attribute in state.attributes) {
43                         if (attribute.name == "nikita:has-switch-state$nikita:plugged") {
44                             /* Insert your code here */
45                             s_has_switch_state__plugged = Convert.GetBool (attribute.val);
46                         }
47                     }
48                 }
49             }
50         }
51     }
52 }
```

```

47     }
48     }
49     }
50     }
51     }
52     void InformStateChange (Humans.Message.InformStateChange msg)
53     {
54         if (uri == null) {
55             uri = GetComponent<ClickedScript> ().worldManagerName;
56         }
57
58
59         foreach (Humans.Message.InformStateChange.State state in msg.statechange) {
60             if (state.uri == this.uri) {
61                 foreach (Humans.Message.InformStateChange
62                     .State.ModifiedValue modifiedValue in state.relations) {
63                     /* Insert your code here */
64                 }
65                 foreach (Humans.Message.InformStateChange
66                     .State.ModifiedValue attribute in state.attributes) {
67                     if (attribute.name == "nikita:has-switch-state$nikita:plugged") {
68                         /* Insert your code here */
69                         s_has_switch_state__plugged = Convert.GetBool (attribute.newValue);
70                     }
71                 }
72             }
73         }
74     }
75 }
76 }

```

Génération d'une classe pour la classe d'objet BlocMoteur

```

1 using UnityEngine;
2 using Humans;
3 using nikita;
4 using System.Collections.Generic;
5
6 namespace nikita
7 {
8     [RequireComponent (typeof(nikita.Switchable))]
9     [RequireComponent (typeof(nikita.Carriable))]
10    [RequireComponent (typeof(Humans.ClickedScript))]
11    public class BlocMoteur: MonoBehaviour
12    {
13        public Humans.Client network;
14        public string uri;
15        public string m_a_tete;
16
17        void Start ()
18        {
19            /*Initialize here */
20            uri = null;
21            network = null;
22        }
23
24        void Update ()
25        {
26
27            if (network == null) {
28                network = GameObject.Find ("Network").GetComponent<Client> ();
29                network.InformStateChangeEvent += InformStateChange;
30                network.InformWorldstateEvent += InformWorldState;
31            }
32
33            /*Insert your code here */
34        }
35
36        void InformStateChange (Humans.Message.InformStateChange msg)

```

```
37 {
38     if (uri == null) {
39         uri = GetComponent<ClickedScript> ().worldManagerName;
40     }
41
42
43     foreach (Humans.Message.InformStateChange.State state in msg.statechange) {
44         if (state.uri == this.uri) {
45             foreach (Humans.Message.InformStateChange
46                 .State.ModifiedValue modifiedValue in state.relations) {
47                 if (modifiedValue.name == "nikita:a-tete") {
48                     if (modifiedValue.newValue != "null") {
49                         /*Insert Code Here */
50                     } else if (modifiedValue.oldValue != "null") {
51                         /*Insert code here */
52                     }
53                 }
54             }
55         }
56     }
57 }
58
59 void InformWorldState (Humans.Message.InformWorldState msg)
60 {
61     if (uri == null) {
62         uri = GetComponent<ClickedScript> ().worldManagerName;
63     }
64
65
66     foreach (Humans.Message.InformWorldState.State state in msg.statechange) {
67         if (state.uri == this.uri) {
68             foreach (Humans.Message.InformWorldState.State.Pair relation in state.relations) {
69                 if (relation.name == "nikita:a-tete") {
70
71                     m_a_tete = relation.val;
72                 }
73             }
74         }
75     }
76 }
77
78
79
80
81 }
82 }
```


Annexe J

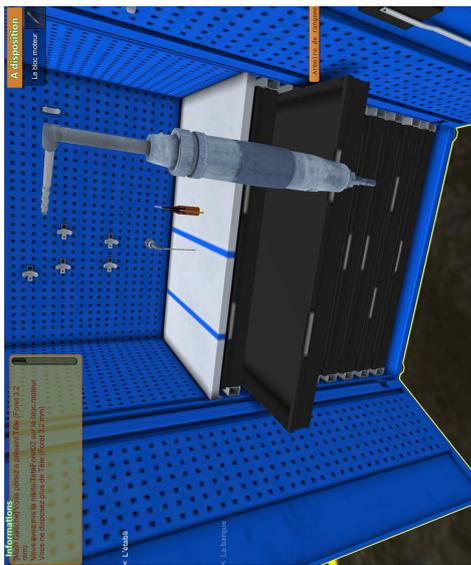
Démonstrateur NIKITA



(c) Mise en surbrillance



(b) Message d'indication



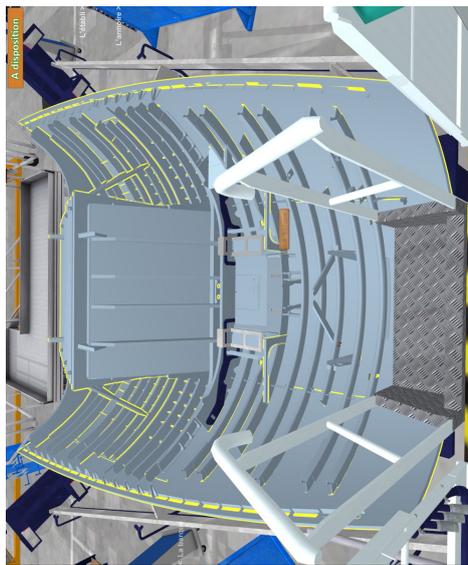
(a) Inventaire (à droite)



(f) Informations contextuelles



(e) Dégrafage



(d) Vue de la barque

FIGURE J.2 – Captures d'écran du démonstrateur NIKITA II



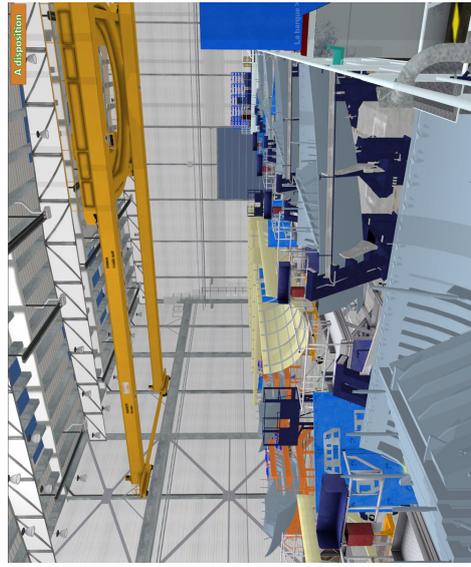
(a) Informations



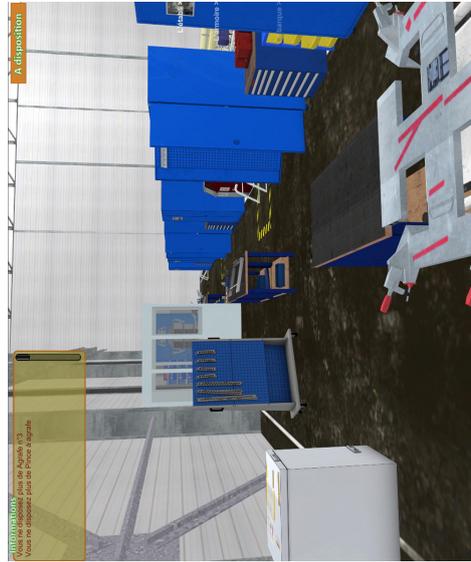
(b) Contrôle qualité en échec



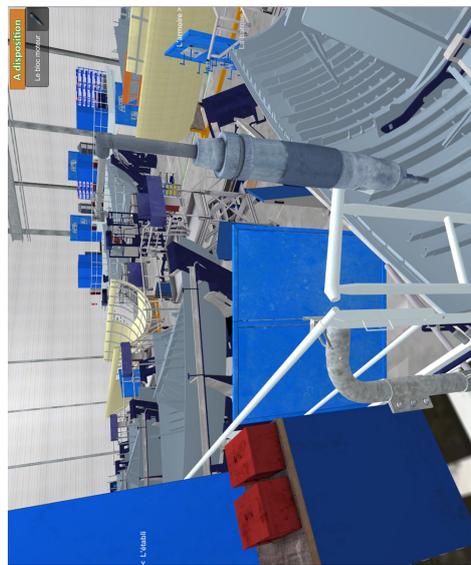
(c) Contrôle qualité réussi



(d) Vue environnement I



(e) Vue environnement II



(f) Vue environnement III

FIGURE J.3 – Captures d'écran du démonstrateur NIKITA III

Liste des figures

1.1	La plateforme HUMANS	27
1.2	Dispositif immersif pour le projet NIKITA	27
1.3	Capture d'écran du démonstrateur SIMADV	28
2.1	Situation initiale et situation finale explicites [Riedl and Young, 2010]	35
2.2	Prise de décision à partir d'une fonction d'évaluation [Weyrauch, 1997]	35
2.3	Description d'un <i>Teaching Moment</i> [Rodhod, 2010]	37
2.4	Gestion de l'agentivité dans AEINS	38
2.5	Raffinement de plan dans à partir d'un modèle du domaine [Niehaus et al., 2011]	38
2.6	Autonomie et contrôle dans différents travaux sur la scénarisation	39
2.7	Exemples d'objectifs scénaristiques sur différents niveaux diégétiques	43
3.1	La Zone Proximale de Développement	48
3.2	Le cycle de l'apprentissage expérientiel de Kolb	49
3.3	Le modèle OKEI pour la description des compétences [Petersen and Heikura, 2010]	54
3.4	Réseaux bayésiens pour le diagnostic [Mufti-Alchawafa, 2008]	55
3.5	Diagramme de prérequis pour un CbKST [Doignon and Falmagne, 1985]	57
4.1	Description de comportements dans un Smart Object [Kallmann and Thalmann, 1999b]	62
4.2	Automate pour la représentation des comportements dans STARFISH [Badawi and Donikian, 2004]	63
4.3	Représentation de la visserie dans STORM [Mollet, 2005]	63
4.4	Interaction avec un objet dans <i>The Sims 2</i>	64
4.5	Description d'un domaine dans le méta-modèle VEHA [Chevaillier et al., 2009]	65
4.6	Représentation d'un comportement dans VEHA grâce à une machine à état [Chevaillier et al., 2009]	65
4.7	Schéma de l'architecture générale de VR-Wise [Kleinermann et al., 2005]	67
4.8	Représentation d'une action et d'un objet dans [Lugrin and Cavazza, 2006]	67
4.9	Extrait d'une ontologie COLOMBO [Edward et al., 2010]	68
4.10	Comportement décrit par des règles de production en langage MOSS [Edward, 2011]	69
4.11	Représentation d'une tâche complexe [Burkhardt et al., 2009]	71
4.12	Exemple d'arbre d'activité dans HAWAI-DL [Amokrane, 2010]	72
5.1	Modèles experts pour la scénarisation	80
5.2	Approche générale de scénarisation	80
5.3	TAILOR une mise en œuvre particulière de l'approche au sein de la plate HUMANS	81
5.4	Graphe de situation	83
5.5	Fragment d'un modèle d'activité	84
5.6	Graphe de causalité [Barot, 2014]	85
5.7	Exemple de profil de l'apprenant	85
5.8	Exemple de diagnostic pour la sélection de classes de situations	87
5.9	Instanciation d'une classe de situation	88

5.10	Diégétisation d'une situation	89
5.11	Architecture de la plateforme HUMANS	92
6.1	Légende pour la visualisation des modèles décrits dans WORLD-DL	99
6.2	Modèle conceptuel d'une entité dans WORLD-DL	100
6.3	Exemple d'entité au niveau opérationnel	100
6.4	Modèle conceptuel de l'état dans WORLD-DL	100
6.5	Exemple d'états au niveau opérationnel	101
6.6	Modèle conceptuel des composants dans WORLD-DL	101
6.7	Exemple de composants au niveau opérationnel	102
6.8	Composant primitifs intégrés au métamodèle WORLD-DL	102
6.9	Hierarchie des objets dans WORLD-DL	103
6.10	Les actions dans WORLD-DL	105
6.11	La dynamique dans WORLD-DL	108
6.12	Mécanisme de <i>late commitment</i>	109
6.13	Inférence pour la saturation de la base de faits	110
6.14	Instanciation d'une action	111
6.15	Instanciation et vie d'un comportement	111
6.16	Déroulement du comportement	111
6.17	Application d'une règle d'intégrité	112
7.1	Exemple d'espace de classes de situations	120
7.2	Comportement de l'opérateur de fusion	124
7.3	Comportement de l'opérateur de révision	127
7.4	Mécanisme d'inférence pour un point S à partir de ses voisins	127
7.5	Propagation des croyances en fonction de la distance	129
7.6	Comportement de l'opérateur de fusion	130
7.7	Mécanisme d'inférence dans l'espace-zpd	132
7.8	Exemples de modélisation de satisfaction de contraintes	132
7.9	Algorithme génétique multi-objectifs	135
7.10	Exemple d'individu pour l'algorithme évolutionnaire	136
7.11	Exemple de génome d'un individu	136
7.12	Espace-zpd sur deux descripteurs.	138
7.13	Exemple d'objectif stratégique	138
7.14	Exemple de calcul de score pour la prise de décision	138
7.15	Maintien du flow et ZPD	139
8.1	Schéma générale de l'instanciation d'une classe de situations	143
8.2	Exemple de modèle décrit avec ACTIVITY-DL	144
8.3	Modèle de causalité pour le domaine de la formation des assistantes de vie	147
8.4	Évaluation des activités par rapport aux critères pédagogiques	150
8.5	Activités sélectionnées	151
8.6	Situations générées pour les activités A4, A6 et A8	153
8.7	Exemples de préconditions et de conditions de satisfaction dans la formation aux assistantes de vie	154
8.8	Instanciation d'une situation liée à l'événement <i>Perte du doudou</i> . Le lien rouge permet de représenter une absence de relation entre deux instances.	155
9.1	Schéma actanciel de Greimas	161
9.2	Description du métamodèle DIEGETIC	164
9.3	Illustration d'un motif de trahison décrit dans le formalisme DIEGETIC	165
9.4	Illustration du passage entre deux motifs décrit dans le formalisme DIEGETIC	166

9.5	Exemple de trame scénaristique	167
9.6	Schéma général du processus de diégétisation automatique dans l'architecture TAILOR	168
9.7	Alignement d'ontologie pour l'inférence des connaissances diégétiques	169
9.8	Visualisation de trames possibles après la vérification de la continuité diégétique	171
9.9	Exemple d'une de graphe diégétique pour le calcul des importances relatives. La valuation des arcs reflète les valeurs d'importance intrinsèques des fonctions diégétiques en jeu.	173
10.1	Interface de visualisation de la base de connaissances	180
10.2	Architecture logicielle du moteur TAILOR	181
10.3	Interface de contrôle du module TAILOR	184
10.4	Demande d'assistance par l'intermédiaire de l'interface formateur	184
10.5	Manipulation des objets via un menu dans l'environnement NIKITA	186
10.6	Processus de détection d'intention à base de modèles sémantiques	188
10.7	Utilisation d'interactions naturelles dans l'environnement NIKITA	188
10.8	Capture d'écran du démonstrateur SIMADVF	189
11.1	Différentes instanciations d'une classe de situations	199
11.2	Démonstrateur pour la plateforme HUMANS	200
C.1	Les différentes couches de modélisation en jeu pour la représentation du monde	226
D.1	Modèle d'activité pour le démonstrateur NIKITA	228
D.2	Classes d'objets définies pour le démonstrateur NIKITA (le nombre entre parenthèses indique le nombre d'instances de cette classe)	229
D.3	Composants définis pour le démonstrateur NIKITA (le nombre entre parenthèses indique le nombre d'instances héritant de ce composant)	230
D.4	Actions définies pour le démonstrateur NIKITA	231
D.5	Agents, objets et composants définis pour le scénario SIMADVF (les nombres entre parenthèses indiquent le nombre d'instances).	232
D.6	Modèle d'activité pour SIMADVF	233
D.7	Modèle de causalité pour SIMADVF	234
E.1	Modèle UML de la librairie ZPDSpace	236
E.2	Modèle UML pour l'algorithme génétique	237
E.3	Modèle UML du WORLDMANAGER	237
H.1	Evolution de la meilleure valeur de fitness pour le scénario <i>simple</i> avec différents paramètres pour les 30 premières itérations	243
H.2	Evolution de la meilleure valeur de fitness pour le scénario <i>simple</i> avec différents paramètres pour les 180 premières itérations	243
H.3	Evolution de la meilleure valeur de fitness pour le scénario <i>complexe</i> avec différents paramètres pour les 80 premières itérations	244
H.4	Evolution de la meilleure valeur de fitness pour le scénario <i>complexe</i> avec différents paramètres pour les 290 premières itérations	244
J.1	Captures d'écran du démonstrateur NIKITA I	252
J.2	Captures d'écran du démonstrateur NIKITA II	253
J.3	Captures d'écran du démonstrateur NIKITA III	254

Liste des tableaux

4.1	Récapitulatif de l'état de l'art sur la représentation des connaissances sur le monde . . .	69
4.2	Récapitulatif de l'état de l'art sur les modèles d'activité	73
6.1	Exemple de règle d'intégrité liant les valeurs des attributs d'un même état	101
6.2	Exemple de règle initialisant l'état d'ouverture de toutes les portes de la scène	104
6.3	Exemple de règle pour gérer la dynamique de l'action <code>Unlock</code>	105
6.4	Exemple de règle pour gérer la dynamique du comportement <code>LockBehavior</code>	106
6.5	Exemple de règle pour la détection du début de l'événement <code>TankOverflow</code>	107
6.6	Exemple de règle pour la détection de la fin de l'événement <code>TankOverflow</code>	107
6.7	Exemple de règles sémantiques utilisées pour la saturation de la base de connaissances	110
7.1	Objectif stratégique pour la mise en œuvre d'une classe de situations inédite, difficile et mettant en jeu le descripteur <i>Taille</i> avec la valeur <i>2.8mm</i>	133
8.1	Préconditions définies dans <code>ACTIVITY-DL</code>	144
8.2	Exemple de tâche partageant un contexte avec ses sous-tâches	145
8.3	Extraction des assertions pour les différents types de barrières	154
9.1	Exemple de règle d'alignement entre le modèle du monde et le modèle diégétique . . .	169
11.1	Evaluation de la latence du <code>WORLDMANAGER</code> dans différents contextes	193
11.2	Résultat de l'évaluation de l'algorithme évolutionnaire pour le scénario simple	195
11.3	Résultat de l'évaluation de l'algorithme évolutionnaire pour le scénario complexe . . .	195
11.4	Temps de génération pour deux modèles d'activité	197
E.1	Protocole de communication avec le <code>WORLDMANAGER</code>	240
H.1	Temps d'exécution de la métaheuristique pour le diagnostic dans le scénario <i>simple</i> . . .	245
H.2	Temps d'exécution en millisecondes de la métaheuristique pour le diagnostic dans le scénario <i>complexe</i>	246

Publications

- [Barot et al., 2013] Barot, C., Carpentier, K., Collet, M., Cuella-Martin, A., Lanquepin, V., Muller, M., Pasquier, E., Picavet, L., Van Ceulen, A., and Wagrez, K. (2013). The wonderland builder: Using storytelling to guide dream-like interaction. In *2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 201–202.
- [Carpentier and Lourdeaux, 2013] Carpentier, K. and Lourdeaux, D. (2013). Sélection dynamique de situations d'apprentissage en environnement virtuel. In *Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain-Actes de conférence*, volume 1, pages 129–140.
- [Carpentier and Lourdeaux, 2014a] Carpentier, K. and Lourdeaux, D. (2014a). Diegetization: An approach for narrative scaffolding in open-world simulations for training. In *Interactive Storytelling*, number 8832 in Lecture Notes in Computer Science, pages 25–36.
- [Carpentier and Lourdeaux, 2014b] Carpentier, K. and Lourdeaux, D. (2014b). Generation of learning situations according to the learner's profile within a virtual environment. In *Agents and Artificial Intelligence*, number 449 in Communications in Computer and Information Science, pages 245–260.
- [Carpentier et al., 2013] Carpentier, K., Lourdeaux, D., and Thouvenin, I. (2013). Dynamic selection of learning situations in virtual environment. In *Proceedings of ICAART'13: International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, volume 2, pages 101–110, Barcelona, Spain.
- [Lanquepin et al., 2013] Lanquepin, V., Carpentier, K., Lourdeaux, D., Barot, C., Lhommet, M., and Amokrane, K. (2013). HUMANS: a HUman models based artificial eNvironments software platform. In *Proceedings of the Virtual Reality International Conference (VRIC 2013)*, Laval, France.
- [Wagrez et al., 2013] Wagrez, K., Carpentier, K., Lourdeaux, D., Thouvenin, I., and Andriot, C. (2013). Semantic modelling as a support for natural interaction within a virtual environment. In *Proceedings of JVRC13: Joint Virtual Reality Conference of EGVE - EuroVR*.

Bibliographie

- [Abaci et al., 2005] Abaci, T., Ciger, J., and Thalmann, D. (2005). Planning with smart objects. In *WSCG'2005*.
- [Albert and Held, 1999] Albert, D. and Held, T. (1999). Component based knowledge spaces in problem solving and inductive reasoning. *Knowledge spaces : theories, empirical research, applications*, pages 15–40.
- [Allen, 1983] Allen, J. F. (1983). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*, 26(11) :832–843.
- [Amokrane, 2010] Amokrane, K. (2010). *Suivi de l'apprenant en environnement virtuel pour la formation à la prévention des risques sur des sites SEVESO*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne.
- [Amokrane et al., 2008] Amokrane, K., Lourdeaux, D., and Burkhardt, J. M. (2008). HERA : Learner tracking in a virtual environment. *The International Journal of Virtual Reality*, 7(3) :23–30.
- [Amokrane et al., 2014] Amokrane, K., Lourdeaux, D., and Michel, G. (2014). Serious game based on virtual reality and artificial intelligence. In *Proceedings of ICAART'14 : International Conference on Agents and Artificial Intelligence*.
- [Anderson and Pelletier, 1991] Anderson, J. and Pelletier, R. (1991). A development system for model-tracing tutors. In *Department of Psychology*, pages 1–8, Association for the Advancement of Computing in Education. Charlottesville, Virginia. Lawrence Birnbaum (Eds.).
- [Aristote, 335 av. J.-C.,] Aristote, 335 av. J.-C. *La Poétique*.
- [Arroyo et al., 2006] Arroyo, I., Woolf, B. P., and Beal, C. R. (2006). Addressing cognitive differences and gender during problem solving. *Technology, Instruction, Cognition & Learning*, 4 :31–63.
- [Augustin et al., 2011] Augustin, T., Hockemeyer, C., Kickmeier-Rust, M., and Albert, D. (2011). Individualized skill assessment in digital learning games : Basic definitions and mathematical formalism. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 4(2) :138–148.
- [Aylett, 1999] Aylett, R. (1999). Narrative in virtual environments-towards emergent narrative. In *Working notes of the Narrative Intelligence Symposium*.
- [Aylett et al., 2006] Aylett, R., Figueiredo, R., Louchart, S., Dias, J., and Paiva, A. (2006). Making it up as you go along-improvising stories for pedagogical purposes. In *Intelligent Virtual Agents*, pages 304–315.
- [Badawi and Donikian, 2004] Badawi, M. and Donikian, S. (2004). Autonomous agents interacting with their virtual environments through synoptic objects. In *Proceedings of CASA 2004*, pages 179–187.
- [Balacheff, 1995] Balacheff, N. (1995). Conception, connaissance et concept. *Séminaire Didactique et Technologies cognitives en mathématiques*, pages 219–244.
- [Baroni, 2007] Baroni, R. (2007). *La tension narrative : suspense, curiosité et surprise*. Seuil.
- [Barot, 2014] Barot, C. (2014). *Scénarisation d'environnement virtuel. Vers un équilibre entre contrôle, cohérence et adaptabilité*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne.

- [Barot et al., 2013] Barot, C., Lourdeaux, D., Burkhardt, J.-M., Amokrane, K., and Lenne, D. (2013). V3s : A virtual environment for risk-management training based on human-activity models. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 22(1) :1–19.
- [Barthès, 2011] Barthès, J.-P. (2011). OMAS - a flexible multi-agent environment for CSCWD. *Future Generation Computer Systems*, 27 :78–87.
- [Bechhofer et al., 2004] Bechhofer, S., Harmelen, F. v., Hendler, J., Horrocks, I., McGuinness, D. L., Patel-Schneider, P. F., and Stein, L. A. (2004). OWL web ontology language reference. Technical report, W3C.
- [Beck, 1976] Beck, U. (1976). *La linguistique historique et son ouverture vers la typologie*. Editions L'Harmattan.
- [Bednar et al., 1992] Bednar, A. K., Cunningham, D., Duffy, T. M., and Perry, J. D. (1992). Theory into practice : How do we link? In Duffy, T. M. and Jonassen, D. H., editors, *Constructivism and the technology of instruction : a conversation*, pages 17–34. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah NJ.
- [Bibin et al., 2008] Bibin, L., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Delbos, A., and Bonnet, M. (2008). SAILOR : a 3-d medical simulator of loco-regional anaesthesia based on desktop virtual reality and pseudo-haptic feedback. In Feiner, S., Thalmann, D., Guitton, P., Fröhlich, B., Kruijff, E., and Hachet, M., editors, *VRST*, pages 97–100. ACM.
- [Bicici and Amant, 2003] Bicici, E. and Amant, R. S. (2003). Reasoning about the functionality of tools and physical artifacts. Technical Report TR-2003-22, Department of Computer Science, North Carolina State.
- [Bille et al., 2004] Bille, W., De Troyer, O., Kleineremann, F., Pellens, B., and Romero, R. (2004). Using ontologies to build virtual worlds for the web. In *ICWI*, pages 683–690.
- [Bourdeau and Grandbastien, 2010] Bourdeau, J. and Grandbastien, M. (2010). Modeling tutoring knowledge. In *Advances in intelligent tutoring systems*, pages 123–143. Springer.
- [Brachman and Levesque, 2004] Brachman, R. and Levesque, H. (2004). *Knowledge representation and reasoning*. Elsevier.
- [Brémond, 1973] Brémond, C. (1973). *Logique du récit*. Éditions du Seuil.
- [Brousseau, 2011] Brousseau, G. (2011). *La théorie des situations didactiques en mathématiques*, volume 5. Presses univ. de Rennes.
- [Bruner, 1990] Bruner, J. S. (1990). *Acts of meaning*. Harvard University Press.
- [Bruner, 2003] Bruner, J. S. (2003). *Making stories : Law, literature, life*. Harvard University Press.
- [Burkhardt et al., 2009] Burkhardt, J., Lourdeaux, D., Couix, S., and Rouillé, M. (2009). La modélisation de l'activité humaine finalisée. In *Le traité de la réalité virtuelle : Volume 5, L'humain virtuel*. Les Presses-Mines Paris.
- [Burkhardt, 2003] Burkhardt, J.-M. (2003). Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels. *Psychologie française*, 48(2) :35–42.
- [Burkhardt et al., 2006] Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., and Mellet-d'Huart, D. (2006). La réalité virtuelle pour l'apprentissage humain. *G. Moreau (Coord.), B. Arnaldi & P. Guitton (Coords). Le Traité de la réalité virtuelle*, 4 :43–100.
- [Buttussi et al., 2013] Buttussi, F., Pellis, T., Cabas Vidani, A., Pausler, D., Carchietti, E., and Chittaro, L. (2013). Evaluation of a 3d serious game for advanced life support retraining. *International Journal of Medical Informatics*, 82(9) :798–809.
- [Campbell, 2008] Campbell, J. (2008). *The Hero With a Thousand Faces*. New World Library.
- [Camus, 2010] Camus, F. (2010). *Conception d'environnements virtuels dédiés à la maîtrise des risques : l'approche MELISSA*. PhD thesis, Compiègne.
- [Carr and Goldstein, 1977] Carr, B. and Goldstein, I. P. (1977). *Overlays : A theory of modelling for computer aided instruction*.

- [Carron and Marty, 2009] Carron, T. and Marty, J.-C. (2009). User modelling in learning games. In *3rd European Conference on Games Based Learning*.
- [Cavazza et al., 2002] Cavazza, M., Charles, F., and Mead, S. J. (2002). Character-based interactive storytelling. *IEEE Intelligent Systems*, 17(4) :17–24.
- [Charles et al., 2002] Charles, F., Mead, S. J., and Cavazza, M. (2002). Generating dynamic storylines through characters' interactions. *Int. J. Intell. Games & Simulation*, 1(1) :5–11.
- [Charlet, 2002] Charlet, J. (2002). *L'ingénierie des connaissances : développements, résultats et perspectives pour la gestion des connaissances médicales*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- [Chateau, 1983] Chateau, D. (1983). Diégèse et énonciation. *Communications*, 38(1) :121–154.
- [Chen, 2007] Chen, J. (2007). Flow in games (and everything else). *Communications of the ACM*, 50(4) :31–34.
- [Chevaillier et al., 2009] Chevaillier, P., Querrec, R., and Septseault, C. (2009). VEHA, un métamodèle d'environnement virtuel informé et structuré. *Techniques et sciences informatiques*, 28(6-7) :715–740.
- [Chevaillier et al., 2012] Chevaillier, P., Trinh, T.-H., Barange, M., De Loor, P., Devillers, F., Soler, J., and Querrec, R. (2012). Semantic modeling of virtual environments using mascaret. In *Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems (SEARIS), 2012 5th Workshop on*, pages 1–8. IEEE.
- [Chieu et al., 2010] Chieu, V. M., Luengo, V., Vadcard, L., and Tonetti, J. (2010). Student modeling in orthopedic surgery training : Exploiting symbiosis between temporal bayesian networks and fine-grained didactic analysis. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 20(3) :269–301.
- [Chrysafiadi and Virvou, 2013] Chrysafiadi, K. and Virvou, M. (2013). Student modeling approaches : A literature review for the last decade. *Expert Systems with Applications*, 40(11) :4715–4729.
- [Conati et al., 2002] Conati, C., Gertner, A., and Vanlehn, K. (2002). Using bayesian networks to manage uncertainty in student modeling. *User modeling and user-adapted interaction*, 12(4) :371–417.
- [Corbett and Derson, 1995] Corbett, A. T. and Derson, J. R. (1995). Knowledge tracing : Modeling the acquisition of procedural knowledge. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 4 :253–278.
- [Cowley et al., 2012] Cowley, B., Bedek, M., Ribeiro, C. S., Heikura, T., and Petersen, S. A. (2012). The QUARTIC process model to support serious games development for contextualized competence-based learning and assessment. *Handbook of Research on Serious Games as Educational, Business, and Research Tools : Development and Design*. IGI Global Publishers, Hershey.
- [Crison et al., 2005] Crison, F., Lecuyer, A., d'Huart, D. M., Burkhardt, J.-M., Michel, G., and Dautin, J.-L. (2005). Virtual technical trainer : Learning how to use milling machines with multi-sensory feedback in virtual reality. In *Virtual Reality, 2005. Proceedings. VR 2005. IEEE*, pages 139–145. IEEE.
- [Csikszentmihalyi, 1991] Csikszentmihalyi, M. (1991). *Flow : The psychology of optimal experience*. Harper Perennial.
- [Da Dalto, 2004] Da Dalto, L. (2004). CS WAVE : la réalité virtuelle pour la formation au soudage.
- [Dalziel, 2003] Dalziel, J. (2003). *Implementing learning design : The learning activity management system (LAMS)*. December.
- [Dalziel, 2008] Dalziel, J. (2008). Using LAMS version 2 for a game-based learning design. *Journal of Interactive Media in Education*, 2008(2).
- [De Troyer et al., 2003] De Troyer, O., Bille, W., Romero, R., and Stuer, P. (2003). On generating virtual worlds from domain ontologies. In *MMM*, pages 279–294.

- [De Troyer et al., 2007] De Troyer, O., Kleinermann, F., Mansouri, H., Pellens, B., Bille, W., and Fomenko, V. (2007). Developing semantic VR-shops for e-commerce. *Virtual Reality*, 11(2-3) :89–106.
- [Dede et al., 1996] Dede, C., Salzman, M. C., and Loftin, R. B. (1996). ScienceSpace : Virtual realities for learning complex and abstract scientific concepts. In *Virtual Reality Annual International Symposium, 1996., Proceedings of the IEEE 1996*, pages 246–252. IEEE.
- [Degiovanni et al., 2014] Degiovanni, J.-B., Morel, A., and Begault, T. (2014). DOUG - humans framework for unity. Technical report.
- [Delgoulet and Boccara, 2012] Delgoulet, C. and Boccara, V. (2012). Analyse du travail des monteurs – ajusteurs de l’aéronautique en production et en formation pour la conception d’un environnement virtuel de formation. Livrable ANR.
- [Delmas, 2009] Delmas, G. (2009). *Pilotage de récits interactifs et mise en oeuvre de formes narratives dans le contexte du jeu video*. PhD thesis, Univeristé de la Rochelle.
- [Dempster, 1967] Dempster, A. P. (1967). Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *The annals of mathematical statistics*, pages 325–339.
- [Dempster, 1968] Dempster, A. P. (1968). A generalization of bayesian inference. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, pages 205–247.
- [Deterding et al., 2011] Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., and Nacke, L. (2011). From game design elements to gamefulness : defining gamification. In *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference : Envisioning Future Media Environments*, pages 9–15. ACM.
- [Dettori and Paiva, 2009] Dettori, G. and Paiva, A. (2009). Narrative learning in technology-enhanced environments. In Balacheff, D. N., Ludvigsen, D. S., Jong, D. T. d., Lazonder, D. A., and Barnes, D. S., editors, *Technology-Enhanced Learning*, pages 55–69. Springer Netherlands.
- [Doignon, 1994] Doignon, J.-P. (1994). Knowledge spaces and skill assignments. In *Contributions to mathematical psychology, psychometrics, and methodology*, pages 111–121. Springer.
- [Doignon and Falmagne, 1985] Doignon, J.-P. and Falmagne, J.-C. (1985). Spaces for the assessment of knowledge. *International Journal of Man-Machine Studies*, 23(2) :175–196.
- [Donikian, 2001] Donikian, S. (2001). HPTS : a behaviour modelling language for autonomous agents. In *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*, AGENTS ’01, pages 401–408, New York, NY, USA. ACM.
- [Doyle, 2004] Doyle, P. O. (2004). *Annotated worlds for animate characters*. PhD thesis, Stanford University.
- [Dubois and Prade, 1988] Dubois, D. and Prade, H. (1988). *Possibility theory : An approach to computerized processing of uncertainty*. Plenum Press, New York.
- [Edward, 2011] Edward, L. (2011). *Modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes évoluant dans un environnement pour la présentation des risques sur les sites SEVESO*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne.
- [Edward et al., 2010] Edward, L., Amokrane, K., Lourdeaux, D., and Barthès, J.-P. (2010). An ontology for managing a virtual environment for risk prevention. In *2010 First International Conference on Integrated Intelligent Computing*, pages 62–67, Bangalore, India.
- [Escofier and Pagès, 2008] Escofier, B. and Pagès, J. (2008). *Analyses factorielles simples et multiples : objectifs, méthodes et interprétation*. Dunod.
- [Fabre et al., 2006] Fabre, D., Couix, S., Burkhardt, J., Gounelle, C., and Cabon, P. (2006). Virtual reality to support human factors for safety : where we are and where we (aim to) go. In *Esrel-safety and reliability annual conference*.
- [Felleisen, 1990] Felleisen, M. (1990). On the expressive power of programming languages. In *ESOP’90*, pages 134–151. Springer.

- [Fikes and Nilsson, 1972] Fikes, R. E. and Nilsson, N. J. (1972). STRIPS : A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial intelligence*, 2(3) :189–208.
- [Fillatreau et al., 2013] Fillatreau, P., Fourquet, J. Y., Le Bolloc’h, R., Cailhol, S., Datas, A., and Puel, B. (2013). Using virtual reality and 3d industrial numerical models for immersive interactive checklists. *Computers in Industry*, 64(9) :1253–1262.
- [Fricoteaux, 2012] Fricoteaux, L. (2012). *Interaction informée par un système décisionnel pour un retour multimodal en environnement virtuel : application à la formation au transport fluvial*.
- [Fuchs et al., 2006] Fuchs, P., Moreau, G., Arnaldi, B., Berthoz, A., Bourdot, P., Vercher, J. L., Burkhardt, J. M., and Auvray, M. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle : Volume 1, L’homme et l’environnement virtuel*. Les Presses-Mines Paris.
- [Gerbaud, 2008] Gerbaud, S. (2008). *Contribution à la formation en réalité virtuelle : Scénarios collaboratifs et intégration d’humains virtuels collaborant avec des utilisateurs réels*.
- [Gerbaud et al., 2008] Gerbaud, S., Mollet, N., Ganier, F., Arnaldi, B., and Tisseau, J. (2008). GVT : a platform to create virtual environments for procedural training. In *IEEE Virtual Reality*, pages 225–232, Reno, États-Unis.
- [Gertner et al., 1998] Gertner, A. S., Conati, C., and Vanlehn, K. (1998). Procedural help in andes : Generating hints using a bayesian network student model. *AAAI/IAAI*, 1998 :106–11.
- [Gervás, 2013] Gervás, P. (2013). Propp’s morphology of the folk tale as a grammar for generation. In *OASIS-OpenAccess Series in Informatics*, volume 32. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik.
- [Gibson, 1977] Gibson, J. J. (1977). *The theory of affordances*. Hilldale, USA.
- [Gogvadze et al., 2011] Gogvadze, G., Sosnovsky, S., Isotani, S., and McLaren, B. M. (2011). Towards a bayesian student model for detecting decimal misconceptions. In *Proceedings of the 19th International Conference on Computers in Education, Chiang Mai, Thailand*, pages 6–8.
- [Gordon et al., 2004] Gordon, A., Van Lent, M., Van Velsen, M., Carpenter, P., and Jhala, A. (2004). Branching storylines in virtual reality environments for leadership development. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, pages 844–851. Menlo Park, CA ; Cambridge, MA ; London ; AAAI Press ; MIT Press ; 1999.
- [Gratch and Marsella, 2003] Gratch, J. and Marsella, S. (2003). Fight the way you train : The role and limits of emotions in training for combat. *Brown J. World Aff.*, 10 :63.
- [Greimas, 1966] Greimas, A. J. (1966). *Sémantique structurale : recherche et méthode*. Larousse edition.
- [Gruber, 1993] Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5 :199–220.
- [Guha and Brickley, 2014] Guha, R. and Brickley, D. (2014). RDF schema 1.1. W3c recommendation, W3C. <http://www.w3.org/TR/2014/REC-rdf-schema-20140225/>.
- [Gutiérrez Alonso, 2005] Gutiérrez Alonso, M. A. (2005). Semantic virtual environments.
- [Heller et al., 2006] Heller, J., Steiner, C., Hockemeyer, C., and Albert, D. (2006). Competence-based knowledge structures for personalised learning. *International Journal on E-learning*, 5(1) :75–88.
- [Hill et al., 2001] Hill, R., Gratch, J., Johnson, W. L., Kyriakakis, C., LaBore, C., Lindheim, R., Marsella, S., Miraglia, D., Moore, B., Morie, J., Rickel, J., Thiébaux, M., Tuch, L., Whitney, R., Douglas, J., and Swartout, W. (2001). Toward the holodeck : integrating graphics, sound, character and story. In *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*, AGENTS ’01, pages 409–416, New York, NY, USA. ACM.
- [Horrocks, 2002] Horrocks, I. (2002). DAML+OIL : a description logic for the semantic web. *IEEE Data Eng. Bull.*, 25(1) :4–9.

- [Kallmann and Thalmann, 1999a] Kallmann, M. and Thalmann, D. (1999a). Direct 3d interaction with smart objects. In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 124–130.
- [Kallmann and Thalmann, 1999b] Kallmann, M. and Thalmann, D. (1999b). Modeling objects for interaction tasks. In *Computer animation and simulation'98 : proceedings of the Eurographics Workshop in Lisbon, Portugal, August 31-September 1, 1998*, page 73.
- [Karweit, 1998] Karweit, N. (1998). Contextual learning : A review and synthesis.
- [Kickmeier-Rust et al., 2011] Kickmeier-Rust, M., Augustin, T., and Albert, D. (2011). Personalized storytelling for educational computer games. In Ma, M., Fradinho Oliveira, M., and Madeiras Pereira, J., editors, *Serious Games Development and Applications*, volume 6944 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 13–22. Springer Berlin / Heidelberg. 10.1007/978-3-642-23834-5_2.
- [Kickmeier-Rust and Albert, 2008] Kickmeier-Rust, M. D. and Albert, D. (2008). The ELEKTRA ontology model : A learner-centered approach to resource description. In Leung, H., Li, F., Lau, R., and Li, Q., editors, *Advances in Web Based Learning – ICWL 2007*, number 4823 in *Lecture Notes in Computer Science*, pages 78–89. Springer Berlin Heidelberg.
- [Kickmeier-Rust et al., 2006] Kickmeier-Rust, M. D., Schwarz, D., Albert, D., Verpoorten, D., Castaigne, J.-L., and Bopp, M. (2006). The ELEKTRA project : Towards a new learning experience. In *Interdisciplinary Aspects On Digital Media & Education*, Vienne, Autriche.
- [Kleinermann et al., 2005] Kleinermann, F., De Troyer, O., Mansouri, H., Romero, R., Pellens, B., and Bille, W. (2005). Designing semantic virtual reality applications. In *Proceedings of the 2nd INTUITION International Workshop, Senlis, France*, volume 61. Citeseer.
- [Klinger et al., 2013] Klinger, E., Kadri, A., Le Guiet, J., Coignard, P., Du Lac, N., Joseph, P., Sorita, E., Fuchs, P., Leroy, L., and Servant, F. (2013). AGATHE : A tool for personalized rehabilitation of cognitive functions. pages 214–215.
- [Klyne and Carroll, 2006] Klyne, G. and Carroll, J. J. (2006). Resource description framework (RDF) : Concepts and abstract syntax.
- [Kolb, 1984] Kolb, D. A. (1984). *Experiential learning : Experience as the source of learning and development*, volume 1. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- [Konak et al., 2006] Konak, A., Coit, D. W., and Smith, A. E. (2006). Multi-objective optimization using genetic algorithms : A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(9) :992–1007.
- [Koper and Olivier, 2003] Koper, R. and Olivier, B. (2003). Representing the learning design of units of learning.
- [Laforcade et al., 2005] Laforcade, P., Nodenot, T., Sallaberry, C., and others (2005). Un langage de modélisation pédagogique basé sur UML. *Sciences et Techniques de l'information et de la Communication pour l'Education et la Formation (STICEF)*, pages 89–116.
- [Lamarche and Donikian, 2002] Lamarche, F. and Donikian, S. (2002). Automatic orchestration of behaviours through the management of resources and priority levels. In *In Proc. of Autonomous Agents and Multi Agent Systems AAMAS'02*, pages 15–19. ACM.
- [Lave and Wenger, 1991] Lave, J. and Wenger, E. (1991). *Situated learning : Legitimate peripheral participation*. Cambridge university press.
- [Learning, 2003] Learning, I. G. (2003). IMS global - learning consortium.
- [Lhomme, 2012] Lhomme, M. (2012). *Replicants : humains virtuels cognitifs, émotionnels et sociaux : de l'empathie cognitive à l'empathie affective*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne.
- [Lourdeaux, 2001] Lourdeaux, D. (2001). *Réalité virtuelle et formation : conception d'environnements virtuels pédagogiques*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

- [Luengo, 2009] Luengo, V. (2009). *Les rétroactions épistémiques dans les Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain*. Habilitation à diriger la recherche, Université Joseph Fourier - Grenoble I.
- [Luengo et al., 2006] Luengo, V., Vadcard, L., Dubois, M., and Mufti-Alchawafa, D. (2006). TELEOS : de l'analyse de l'activité professionnelle à la formalisation des connaissances pour un environnement d'apprentissage. In *Actes d'IC*, pages 101–110.
- [Lugrin and Cavazza, 2006] Lugrin, J.-L. and Cavazza, M. (2006). AI-based world behaviour for emergent narratives. In *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI international conference on Advances in computer entertainment technology*, page 25. ACM.
- [Ma et al., 2011] Ma, J., Liu, W., Dubois, D., and Prade, H. (2011). Bridging jeffrey's rule, agm revision and dempster conditioning in the theory of evidence. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 20(04) :691–720.
- [Magerko et al., 2006] Magerko, B., Stensrud, B. S., and Holt, L. S. (2006). Bringing the schoolhouse inside the box-a tool for engaging, individualized training. Technical report, DTIC Document.
- [Magerko et al., 2005] Magerko, B., Wray, R. E., Holt, L. S., and Stensrud, B. (2005). Improving interactive training through individualized content and increased engagement. In *The Interservice/Industry Training, Simulation & Education Conference (IITSEC)*, volume 2005.
- [Malec, 2010] Malec, S. (2010). AutoPropp : Toward the automatic markup, classification, and annotation of russian magic tales. In *Proceedings of the First International AMICUS Workshop on Automated Motif Discovery in Cultural Heritage and Scientific Communication Texts*, pages 112–115.
- [Malone and Lepper, 1987] Malone, T. W. and Lepper, M. R. (1987). Making learning fun : A taxonomy of intrinsic motivations for learning | mendeley. *Aptitude learning and instruction*, 3(3) :223–253.
- [Marc and Gardeux, 2007] Marc, J. and Gardeux, F. (2007). Contribution d'un environnement virtuel de formation pour la prevention des risques chimiques en entreprise. In *Proceedings of VRIC' 07*, Laval, France.
- [Marc Erich Latoschik, 2005] Marc Erich Latoschik, P. B. (2005). Knowledge in the loop : Semantics representation for multimodal simulative environments. pages 25–39.
- [Marion, 2010] Marion, N. (2010). *Modélisation de scénarios pédagogiques pour les environnements de réalité virtuelle d'apprentissage humain*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale.
- [Martel et al., 2006] Martel, C., Vignollet, L., Ferraris, C., David, J.-P., Lejeune, A., and others (2006). Modeling collaborative learning activities on e-learning platforms. In *ICALT*, pages 707–709.
- [Mateas and Stern, 2003] Mateas, M. and Stern, A. (2003). Façade : An experiment in building a fully-realized interactive drama. In *Game Developers Conference (GDC'03)*.
- [Mayo, 2001] Mayo, M. J. (2001). Bayesian student modelling and decision-theoretic selection of tutorial actions in intelligent tutoring systems.
- [McBride, 2002] McBride, B. (2002). Jena : A semantic web toolkit. *Internet Computing, IEEE*, 6(6) :55–59.
- [Meehan, 1977] Meehan, J. R. (1977). TALE-SPIN, an interactive program that writes stories. In *IJCAI*, pages 91–98.
- [Megard et al., 2011] Megard, C., Bouchigny, S., and Gosselin, F. (2011). Experimental evaluation of training accelerators for surgical drilling. In *BIO Web of Conferences*, volume 1, page 00061. EDP Sciences.
- [Mellet-d'Huart and Michel, 2006] Mellet-d'Huart, D. and Michel, G. (2006). Réalité virtuelle et apprentissage. In *Traité de la réalité virtuelle*, volume 4. Les Presses-Mines Paris.
- [Millán and Pérez-De-La-Cruz, 2002] Millán, E. and Pérez-De-La-Cruz, J. L. (2002). A bayesian diagnostic algorithm for student modeling and its evaluation. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 12(2-3) :281–330.

- [Mollet, 2005] Mollet, N. (2005). *De l'Objet-Relation au Construire en Faisant : application à la spécification de scénarios de formation à la maintenance en réalité virtuelle*. PhD thesis.
- [Mollet and Arnaldi, 2006] Mollet, N. and Arnaldi, B. (2006). Storytelling in virtual reality for training. In Pan, Z., Aylett, R., Diener, H., Jin, X., Göbel, S., and Li, L., editors, *Technologies for E-Learning and Digital Entertainment*, volume 3942, pages 334–347. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Mott and Lester, 2006a] Mott, B. W. and Lester, J. C. (2006a). *Narrative-Centered Tutorial Planning for Inquiry-Based Learning Environments*.
- [Mott and Lester, 2006b] Mott, B. W. and Lester, J. C. (2006b). U-director : a decision-theoretic narrative planning architecture for storytelling environments. In *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, AAMAS '06, pages 977–984, New York, NY, USA. ACM.
- [Mufti-Alchawafa, 2008] Mufti-Alchawafa, D. (2008). *Modélisation et représentation de la connaissance pour la conception d'un système décisionnel dans un environnement informatique d'apprentissage en chirurgie*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- [Niehaus and Riedl, 2009] Niehaus, J. and Riedl, M. O. (2009). Scenario adaptation : An approach to customizing computer-based training games and simulations. In *Proceedings of the AIED 2009 Workshop on Intelligent Educational Games*, pages 89–98.
- [Niehaus et al., 2011] Niehaus, J. M., Li, B., and Riedl, M. O. (2011). Automated scenario adaptation in support of intelligent tutoring systems. In *Proceedings of the Twenty-Fourth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference*.
- [Noy and Mcguinness, 2001] Noy, N. F. and Mcguinness, D. L. (2001). *Ontology development 101 : A guide to creating your first ontology*. Technical report.
- [Odin, 2000] Odin, R. (2000). *De la fiction*. De Boeck Supérieur.
- [Ohlsson, 1994] Ohlsson, S. (1994). Constraint-based student modeling. In *Student modelling : the key to individualized knowledge-based instruction*, pages 167–189. Springer.
- [OMG, 2014] OMG (2014). *OMG systems modeling language*.
- [Pearl, 1988] Pearl, J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems : networks of plausible inference*. Morgan Kaufmann.
- [Petersen and Heikura, 2010] Petersen, S. A. and Heikura, T. (2010). Modelling project management and innovation competences for technology enhanced learning. In *eChallenges, 2010*, pages 1–9. IEEE.
- [Piaget, 1948] Piaget, J. (1948). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Delachaux et Niestlé.
- [Pizzi and Cavazza, 2007] Pizzi, D. and Cavazza, M. (2007). Affective storytelling based on characters' feelings. In *Proceedings of the AAAI Fall Symposium on Intelligent Narrative Technologies*.
- [Polanyi, 1979] Polanyi, L. (1979). So what's the point? *Semiotica*, 25(3-4) :207–242.
- [Polti, 1895] Polti, G. (1895). *Les 36 situations dramatiques*. Éd. DV" Mercure de France".
- [Porteous et al., 2010] Porteous, J., Cavazza, M., and Charles, F. (2010). Applying planning to interactive storytelling : Narrative control using state constraints. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 1(2) :10.
- [Propp, 1968] Propp, V. I. (1968). *Morphology of the Folktale*. University of Texas Press.
- [Prud'hommeaux and Seaborne, 2008] Prud'hommeaux, E. and Seaborne, A. (2008). SPARQL query language for RDF. W3c recommendation, W3C. <http://www.w3.org/TR/2008/REC-rdf-sparql-query-20080115/>.
- [Quarles et al., 2009] Quarles, J., Lampotang, S., Fischler, I., Fishwick, P., and Lok, B. (2009). Scaffolded learning with mixed reality. *Computers & Graphics*, 33(1) :34–46.

- [Rempulski, 2013] Rempulski, N. (2013). *Synthèse dynamique de superviseurs pour l'exécution interactive d'application adaptatives*. PhD thesis, Univeristé de la Rochelle.
- [Rich, 1979] Rich, E. (1979). User modeling via stereotypes. *Cognitive science*, 3(4) :329–354.
- [Riedl et al., 2003] Riedl, M., Saretto, C. J., and Young, R. M. (2003). Managing interaction between users and agents in a multi-agent storytelling environment. In *Proceedings of the second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems - AAMAS '03*, page 741, Melbourne, Australia.
- [Riedl et al., 2008] Riedl, M. O., Stern, A., Dini, D. M., Alderman, J. M., and Rey, M. D. (2008). Dynamic experience management in virtual worlds for entertainment , education , and training. *International Transactions on Systems Science and Applications*, 3(1) :23–42.
- [Riedl and Young, 2010] Riedl, M. O. and Young, R. M. (2010). Narrative planning : balancing plot and character. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 39(1) :217–268.
- [Rodhod, 2010] Rodhod, R. (2010). *Interactive Narrative for Adaptive Educational Games*. PhD thesis.
- [Rouillé et al., 2008] Rouillé, M., Bilavarn, J., Burkhardt, J.-M., Couix, S., Lourdeaux, D., and Amokrane, K. (2008). Prototype du langage de modélisation de l'activité humaine. Technical report.
- [Schaefer et al., 2001] Schaefer, D., Borgmann, C., and Scheffter, D. (2001). Factory planning and the potential of virtual reality. *Proceedings of AVRII & CONVR*, pages 92–98.
- [Schank, 1995] Schank, R. C. (1995). *Tell me a story : Narrative and intelligence*. Northwestern University Press.
- [Schneider,] Schneider, D. K. Langage de modélisation pédagogique.
- [Sebillotte and Scapin, 1994] Sebillotte, S. and Scapin, D. L. (1994). From users' task knowledge to high-level interface specification. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 6(1) :1–15.
- [Self, 1998] Self, J. (1998). The defining characteristics of intelligent tutoring systems research : ITSs care, precisely. *International Journal of Artificial Intelligence in Education (IJAIED)*, 10 :350–364.
- [Shafer, 1976] Shafer, G. (1976). *A mathematical theory of evidence*, volume 1. Princeton university press Princeton.
- [Shawver, 1997] Shawver, D. (1997). Virtual actors and avatars in a flexible user-determined-scenario environment. In *Virtual Reality Annual International Symposium, 1997., IEEE 1997*, pages 170 – 177, 218.
- [Simpson, 2005] Simpson, J. (2005). Scripting and sims 2 : Coding the psychology of little people.
- [Slater and Usoh, 1993] Slater, M. and Usoh, M. (1993). Representations systems, perceptual position, and presence in immersive virtual environments. *Presence : Teleoperators and virtual environments*, 2(3) :221–233.
- [Smets and Kennes, 1994] Smets, P. and Kennes, R. (1994). The transferable belief model. *Artificial Intelligence*, 66(2) :191 – 234.
- [Souriau and Souriau, 1990] Souriau, t. and Souriau, A. (1990). *Vocabulaire d'esthétique*. Presses universitaires de France.
- [Southey and Linders, 2001] Southey, F. and Linders, J. G. (2001). Ossa-a conceptual modelling system for virtual realities. In *Conceptual Structures : Broadening the Base : 9th International Conference on Conceptual Structures, ICCS 2001, Stanford, CA, USA, July 30-August 3, 2001, Proceedings*, volume 9, page 333. Springer.
- [Spierling and Szilas, 2009] Spierling, U. and Szilas, N. (2009). Authoring issues beyond tools. In *Interactive Storytelling*, pages 50–61. Springer.
- [Stansfield et al., 1976] Stansfield, J. L., Carr, B. P., and Goldstein, I. P. (1976). Wumpus advisor 1 : A first implementation program that tutors logical and probabilistic reasoning skills.

- [Swartjes, 2010] Swartjes, I. (2010). *Whose Story Is It Anyway*. PhD thesis, University of Twente.
- [Swartjes et al., 2008] Swartjes, I., Kruizinga, E., and Theune, M. (2008). Let's pretend i had a sword. In *Proceedings of the 1st Joint International Conference on Interactive Digital Storytelling : Interactive Storytelling*, pages 264–267. Springer-Verlag.
- [Swartout et al., 2001] Swartout, W., Hill, R., Gratch, J., Johnson, W. L., Kyriakakis, C., LaBore, C., Lindheim, R., and al, e. (2001). *Toward the Holodeck : Integrating Graphics, Sound, Character and Story*.
- [Szilas, 2003] Szilas, N. (2003). IDtension : a narrative engine for interactive drama. In *Proceedings of the Technologies for Interactive Digital Storytelling and Entertainment (TIDSE) Conference*, volume 3, pages 187–203.
- [Szilas, 2007] Szilas, N. (2007). A computational model of an intelligent narrator for interactive narratives. *Applied Artificial Intelligence*, 21(8) :753–801.
- [Szilas et al., 2012] Szilas, N., Richle, U., and Dumas, J. E. (2012). Structural writing, a design principle for interactive drama. In *Interactive Storytelling*, pages 72–83. Springer.
- [Thorndyke, 1977] Thorndyke, P. W. (1977). Cognitive structures in comprehension and memory of narrative discourse. *Cognitive psychology*, 9(1) :77–110.
- [Thouvenin, 2009] Thouvenin, I. (2009). *Interaction et connaissance : construction d'une expérience dans le monde virtuel*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne.
- [Thue et al., 2010] Thue, D., Bulitko, V., Spetch, M., and Romanuik, T. (2010). Player agency and the relevance of decisions. *Interactive Storytelling*, pages 210–215.
- [Tutenel et al., 2009] Tutenel, T., Smelik, R. M., Bidarra, R., and de Kraker, K. J. (2009). Using semantics to improve the design of game worlds. In *AIIDE*.
- [Uschold et al., 1996] Uschold, M., Gruninger, M., Uschold, M., and Gruninger, M. (1996). Ontologies : Principles, methods and applications. *Knowledge Engineering Review*, 11 :93–136.
- [Vadcard et al., 2004] Vadcard, L., Luengo, V., and others (2004). Embedding knowledge in the design of an orthopaedic surgery learning environment. In *Proceedings of the CALIE04 International Conference on Computer Aided Learning in Engineering Education, Grenoble, February 16-18, 2004*.
- [Van Der Veer et al., 1996] Van Der Veer, G. C., Lenting, B. F., and Bergevoet, B. A. J. (1996). GTA : Groupware task analysis - modeling complexity. *Acta Psychologica*, 91 :297–322.
- [Vanlehn, 2006] Vanlehn, K. (2006). The behavior of tutoring systems. *Int. J. Artif. Intell. Ed.*, 16(3) :227–265.
- [Vergnaud, 1996] Vergnaud, G. (1996). Au fond de l'action, la conceptualisation. *Savoirs théoriques et savoirs d'action*, pages 275–292.
- [Vicari et al., 2008] Vicari, R., Flores, C. D., Seixas, L., Gluz, J. C., and Coelho, H. (2008). AMPLIA : A probabilistic learning environment. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 18(4) :347–373.
- [Vidani and Chittaro, 2009] Vidani, A. and Chittaro, L. (2009). Using a task modeling formalism in the design of serious games for emergency medical procedures. In *Games and Virtual Worlds for Serious Applications, 2009. VS-GAMES '09. Conference in*, pages 95–102.
- [Villano, 1992] Villano, M. (1992). Probabilistic student models : Bayesian belief networks and knowledge space theory. In *Intelligent Tutoring Systems*, pages 491–498. Springer.
- [Vygotsky, 1978] Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in Society*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- [Wagrez et al., 2013] Wagrez, K., Carpentier, K., Lourdeaux, D., Thouvenin, I., and Andriot, C. (2013). Semantic modelling as a support for natural interaction within a virtual environment. In *Proceedings of JVRC13 : Joint Virtual Reality Conference of EGVE - EuroVR*.

- [Wama and Nakatsu, 2008] Wama, T. and Nakatsu, R. (2008). Analysis and generation of japanese folktales based on vladimir propp's methodology. In Ciancarini, P., Nakatsu, R., Rauterberg, M., and Rocchetti, M., editors, *New Frontiers for Entertainment Computing*, number 279 in IFIP International Federation for Information Processing, pages 129–137. Springer US.
- [Wang, 2013] Wang, N. (2013). Modélisation des connaissances pour la scénarisation d'un environnement virtuel de formation à la maîtrise des risques.
- [Webb et al., 2001] Webb, G. I., Pazzani, M. J., and Billsus, D. (2001). Machine learning for user modeling. *User modeling and user-adapted interaction*, 11(1-2) :19–29.
- [Wenger, 1987] Wenger, E. (1987). Artificial intelligence and tutoring systems.
- [Weyrauch, 1997] Weyrauch, P. W. (1997). *Guiding Interactive Drama*. PhD thesis, Carnegie Mellon University.
- [Wiet et al., 2002] Wiet, G. J., Stredney, D., Sessanna, D., Bryan, J. A., Welling, D. B., and Schmalbrock, P. (2002). Virtual temporal bone dissection : an interactive surgical simulator. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*, 127(1) :79–83.
- [Winn, 2003] Winn, W. (2003). Learning in artificial environments : Embodiment, embeddedness and dynamic adaptation. *Technology, Instruction, Cognition and Learning*, 1(1) :87–114.
- [Woolf, 2010] Woolf, B. P. (2010). *Building intelligent interactive tutors : Student-centered strategies for revolutionizing e-learning*. Morgan Kaufmann.
- [Zadeh, 1965] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3) :338–353.
- [Zadeh, 1978] Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, 1 :3–28.
- [Zeltzer, 1992] Zeltzer, D. (1992). Autonomy, interaction, and presence. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 1(1) :127–132.
- [Zook et al., 2012] Zook, A., Lee-Urban, S., Riedl, M. O., Holden, H. K., Sottolare, R. A., and Brawner, K. W. (2012). Automated scenario generation : Toward tailored and optimized military training in virtual environments. In *Proceedings of the International Conference on the Foundations of Digital Games*, FDG '12, pages 164–171, New York, NY, USA. ACM.