Université de Technologie Compiègne

N° attribué par la bibliothèque
978-2-913923-28-7

Mémoire présenté pour obtenir une

Habilitation à Diriger des Recherches

par

Madame Indira Mouttapa Thouvenin

le 05/02/2009

Titre:

Interaction et connaissance : construction d'une expérience dans le monde virtuel

Jury

M. Bruno Arnaldi,	Rapporteur
Mme. Catherine Garbay,	Rapporteur
M. Jacques Tisseau,	Rapporteur
M. Bruno Bachimont,	Examinateur
M. Philippe Fuchs,	Examinateur
M. Rajesh Kasturirangan,	Examinateur
M. Charles Lenay,	Examinateur
M. Thierry Voillequin,	Examinateur

Remerciements

Mon premier remerciement est destiné à l'institution qui m'a accueillie et fait confiance, l'Université de Technologie Compiègne, dans laquelle j'ai trouvé à la fois le terrain propice, la dynamique, la rigueur et la créativité nécessaires à cet exercice délicat d'entreprendre l'obtention d'une habilitation à diriger des recherches. La diversité des recherches menées à l'UTC et l'ambiance chaleureuse que j'y ai trouvées m'ont donné la motivation de relire mes travaux de recherche et de tenter de construire sur cette base un programme de recherche cohérent, interdisciplinaire, en lien avec l'industrie. Jean Paul Barthès, chercheur de renommée internationale en gestion des connaissances, m'a accueillie dès mon arrivée à l'UTC, m'a toujours soutenue et guidée dans mes choix : qu'il sache à quel point je lui en suis reconnaissante.

Je remercie aussi Bruno Arnaldi, professeur, Directeur du laboratoire Informatique de l'INSA de Rennes, qui a dirigé l'équipe SIAMES de l'INRIA, et a contribué à clarifier le positionnement de la réalité virtuelle, par rapport aux domaines de l'animation et de l'intelligence artificielle. Ses conseils et sa patiente attention m'ont aidée à solidifier ce mémoire.

Catherine Garbay, directrice de recherche du CNRS, spécialiste de l'ingénierie des connaissances, a accepté aussi de relire ce mémoire : ses questions sur la complexité, et le rôle du corps dans l'interaction avec l'environnement virtuel, par rapport à l'ingénierie des connaissances, ont donné un éclairage très précis à ce travail.

Je voudrais remercier ici également le professeur Jacques Tisseau, directeur de l'ENIB et ancien directeur du CERV, centre européen de réalité virtuelle (Brest). Son approche de l'autonomie et des environnements virtuels est accompagnée d'une réflexion épistémologique éclairante. Au cours de cette période de rédaction, ses conseils bienveillants et sa critique constructive du mémoire ont été déterminants aussi bien dans le contenu que dans la structure.

Bruno Bachimont est enseignant-chercheur HDR, directeur à la recherche à l'UTC. Il s'intéresse entre autres au statut épistémologique de l'ingénierie des connaissances. Par son discernement et son humour toujours chaleureux, il a m'a accompagnée dans mes réflexions tout au long de la rédaction.

Philippe Fuchs, responsable de l'équipe de recherche en Réalité Virtuelle et en réalité augmentée, connait depuis longtemps ce projet d'obtenir une HDR et a répondu affirmativement sans hésiter pour participer au jury : je n'oublierai jamais ce mail reçu depuis Oulan Bator, Sibérie, lors de son périple en course à pied de Paris à Pékin pour les jeux olympiques de 2008.

Rajesh Kasturirangan est un ami et collègue chercheur en Inde, au National Institute of Advanced Studies, qui se trouve sur le campus de l'Indian Institute of Sciences, une très ancienne et prestigieuse université de Bangalore : son intérêt pour

l' « embodied cognition » et sa vaste culture à la fois occidentale et indienne, me rapprochent de mes sources.

Charles Lenay, professeur, directeur du laboratoire Costech de l'UTC, m'a patiemment sensibilisée aux sciences cognitives, à travers le réseau européen d'excellence « Enactive », les écoles d'été Enaction, et surtout nos nombreuses discussions. Son travail très intéressant sur la perception et son ouverture aux possibilités de la réalité virtuelle m'ont peu à peu conduite à une coloration essentielle, le lien entre le paradigme de l'énaction et les environnements virtuels.

Thierry Voillequin, longtemps directeur du centre de réalité virtuelle chez PSA, et ayant rejoint récemment le groupe St Gobain, a su donner énergie et clarté dans les orientations de développement et de recherche de l'industrie automobile en France : ses projets et sa façon de diriger ce centre m'ont inspirée et marquée, il représente à mon sens le lien par excellence entre recherche et industrie, et je suis heureuse de sa participation à ce jury d'HDR. D'autres personnes ont également beaucoup contribué à ce travail, par des discussions amicales et fécondes. Domitile Lourdeaux, arrivée récemment dans le laboratoire pour renforcer l'activité en réalité virtuelle a beaucoup apporté par son dynamisme et ses compétences.

Juliette Lenoir, directrice des bibliothèques de Compiègne, avec qui j'ai des échanges passionnants et réguliers sur la bibliothèque numérique de demain, m'a apporté sa confiance inconditionnelle et a contribué à la relecture de ce mémoire de façon décisive.

Thierry Wipff, directeur de l'usine Continental Timisoara (Roumanie), et ancien directeur de l'usine de Clairoix (Picardie) est un industriel ayant à la fois la vision de l'usine du futur et le souci de réalisations court et moyen terme efficaces. Le simulateur RVPI que nous avons conçu et réalisé reste une très belle aventure qui a aboutit à la création de la société Reviatech en octobre 2008. Sa motivation et son jugement solide m'ont énormément aidée toutes ces années et je mesure aujourd'hui l'impact de cette application industrielle dans mes travaux de recherche.

Enfin, je voudrais témoigner ma reconnaissance aux membres du laboratoire Heudiasyc, en citant le domaine ICI dans lequel je mène mes activités de recherche, ainsi qu'au département des systèmes mécaniques, qui accueille mes activités d'enseignement.

Les personnes qui ont été les plus proches de moi durant cette période sont bien évidemment mes doctorants, Stéphane Aubry, Jérôme Olive et Atman Kendira : leur enthousiasme et leur créativité ont été essentiels pour construire ce thème de recherche, et je n'oublierai pas ces moments importants.

Table des matières

Remerciements **3**

Table des matières **5**

Table des figures **9**

Liste des tableaux **11**

1 Enjeux et positionnement du thème de recherche **13**
1 Interaction, modélisation et connaissance 13
2 Complexité des interactions 15
3 Capitaliser l'activité humaine en environnement virtuel 16
4 Un cadre théorique pluri-disciplinaire 18
5 Plan du mémoire 19

2 Contexte et concepts principaux **21**
1 Contexte général 21
2 Les EVI et l'interaction avec les EVI 22
2.1 Un monde virtuel pour vivre une expérience 22
2.2 Expérience et expérimentation 23
2.3 Réalité Virtuelle et Multimédia 23
2.4 Interaction en environnement virtuel 24
2.5 Métaphore d'interaction 24
2.6 Représenter les connaissances en EV : les EVI ou environnements virtuels informés 26
3 Construire la connaissance en EVI : un processus enactif 27
3.1 Concept d'énaction 27
3.2 Bref historique du courant de pensée de l'énaction 28
3.3 Réalité virtuelle et énaction 29
3.4 Construction de connaissance comme processus énactif 29
4 Simulation, connaissance et phénoménologie 30
4.1 Simuler pour calculer et simuler pour comprendre 30
4.2 Perception et interaction 31
4.3 Expérience dans les EVI comme objet de recherche 32

3 Interagir pour connaître **35**
1 Introduction 35
2 Conception et création collaborative en EVI : projet MATRICS . . . 35

2.1 Une ontologie pour la collaboration : l'exemple d'une conception mécanique . . . 36
2.2 Ce qui se conçoit bien se modélise en 3D . . . 37
2.3 L'intégration d'annotations 3D dans un EVI . . . 38
2.4 Le Modèle de gestion des connaissances associé aux annotations 3D . . . 39
2.5 L' environnement MATRICS . . . 39
2.6 Architecture de l'environnement MATRICS . . . 41
2.7 Conclusion . . . 43
3 Se former par l'interaction en EVI : le projet RVPI . . . 43
3.1 Expérience et formation par la réalité virtuelle . . . 43
3.2 Enjeux du projet industriel RVPI . . . 44
3.3 Apport scientifiques et techniques du projet RVPI . . . 45
3.4 Gestion de l'interaction dans RVPI . . . 46
3.5 Conclusion . . . 46
3.6 Création de la start-up Reviatech . . . 47
4 L'apprentissage par la capitalisation des connaissances gestuelles : projet PTOLEMEE . . . 48
4.1 Objectif . . . 48
4.2 Vers un modèle d'annotation gestuelle . . . 49
4.3 Processus d'annotation . . . 49
4.4 Capitalisation de l'annotation gestuelle . . . 50
5 Conclusion . . . 50

4 Connaissance pour interagir en EV 51
1 Introduction . . . 51
2 Connaissance pour communiquer en environnement virtuel . . . 51
2.1 Collaborer et participer à l'aide de la réalité virtuelle . . . 51
2.2 Métavers, avatars et EVC . . . 52
2.3 Communiquer à distance : de la voix au comportement non verbal . . . 53
2.4 Transmettre des informations à distance sur le geste et l'attitude 54
2.5 Une approche bayésienne . . . 55
2.6 L'application Virstoria . . . 56
2.7 Un environnement informatique : Baybe (bayesian behavior) . 56
2.8 Conclusion . . . 57
3 Crédibilité versus réalisme : navigation temps-espace dans une abbaye disparue . . . 58
3.1 L'abbaye St Corneille, première version . . . 58
3.2 Toujours plus de réalisme : un germe d'échec . . . 60
3.3 Apporter de la crédibilité : l'abbaye St Corneille - deuxième version . . . 60
3.4 Un imaginaire nourri par la connaissance en EVI . . . 63
4 Conclusion . . . 63
4.1 Réalisme, complexité et temps de calcul . . . 63
4.2 Enaction et expérience . . . 64

5 Conclusion **65**
1 Bilan 65
1.1 Environnements virtuels informés 65
1.2 Interaction avec les EVI 66
1.3 Enaction 67
2 Perspectives 67
2.1 Deux axes de recherche 68
2.2 Axes applicatifs 69

Bibliographie **71**

Table des figures

2.1 Taxonomies simplifiées des métaphores d'interaction 3D [Bowman, 1999] 25
2.2 Interaction et connaissance 34

3.1 Le cadre de vélo annoté en affichant le texte des annotations (à gauche) et en ne montrant que les ancres (à droite) 39
3.2 Suggestion automatique de concepts dans l'éditeur d'annotations . . . 40
3.3 Deck 2D - Le Concept Browser 40
3.4 L'environnement d'annotations 3D MATRICS 41
3.5 Contenu d'une annotation 3D dans l'environnement Matrics 41
3.6 Architecture de l'environnement Matrics 42
3.7 Le simulateur RVPI 45
3.8 Visite virtuelle passive et interactive 46
3.9 Visite virtuelle dans le simulateur RVPI 47
3.10 Méthodologie de conception [Olive *et al.*, 2006] 47
3.11 VR manufacturing tool 48
3.12 Processus d'annotation 3D [Olive et Thouvenin, 2008] 49
3.13 Création des annotation 3D [Olive et Thouvenin, 2008] 49
3.14 Lecture des annotations gestuelles [Olive et Thouvenin, 2008] 50

4.1 Le CAT [Hachet *et al.*, 2003b] 52
4.2 Utilisation du CAVE. 52
4.3 Interaction collaborative et directe avec un mur d'images sous le système HoloWall [Matsushita et Rekimoto, 1997]. 53
4.4 Évolution des environnements virtuels collaboratifs (Atman Kendira, thèse de Doctorat 2009) 54
4.5 Les catégories de gestes en comportement non verbal (Atman Kendira, Laurence Perron, Orange Labs [Kendira *et al.*, 2006c]) 55
4.6 L'environnement virtuel Virstoria, thèse Atman Kendira en collaboration avec Orange Labs 56
4.7 Architecture de Virstoria [Kendira *et al.*, 2008] 57
4.8 Modélisation du cloitre de l'abbaye à l'aide du logiciel 3Dstudiomax . 59
4.9 Modélisation du cloitre de l'abbaye à l'aide du logiciel 3Dstudiomax . 59
4.10 Images de l'abbaye St Corneille en réalité augmentée. 61
4.11 Plan de la ville de Compiègne et emplacement de l'abbaye. 62
4.12 Positionnement de l'abbaye St Corneille au centre de la ville de Compiègne. 62
4.13 Connaissance pour interagir en EV. 64

5.1 Interaction avec les EVI. 68

5.2 Shéma illustrant la zone de recouvrement entre le jeu vidéo et le serious game. [Alvarez *et al.*, 2007]. 69

Liste des tableaux

1.1 Apport scientifique par domaine. 18

3.1 Exemple des réactions de l'utilisateur et de l'agent sur un problème spécifique de consultation en conception collaborative [Thouvenin *et al.*, 2002] 37

Chapitre 1

Enjeux et positionnement du thème de recherche

1 Interaction, modélisation et connaissance

Le cadre général de nos travaux de recherche porte sur la réalité virtuelle. Cette discipline, dialogue entre disciplines scientifiques [Tisseau, 2001], a pour objectif la création de mondes virtuels et leur exploitation par l'homme. Elle s'intéresse à leur modélisation, c'est-à-dire aux modèles de simulation permettant de donner de la vie aux objets et êtres virtuels [Arnaldi, 1994] représentés à l'intérieur de ces mondes. De plus, elle étudie les interfaces de réalité virtuelle [Fuchs *et al.*, 2006] , c'est-à-dire les interfaces motrices et sensorielles donnant à l'utilisateur une perception de ses actions.

Dans les années 80-90, les recherches ont porté principalement sur les aspects calcul d'image en temps réel car la difficulté principale était d'afficher des images de synthèse à une grande vitesse avec des calculateurs encore peu puissants ou limités dans les capacités d'accélération graphique [1]. Après la difficile conquête du calcul graphique en temps réel, les recherches [Burdea et Coiffet, 2003] ont porté ensuite sur une meilleure compréhension de l'interaction, de ses modalités et de ses interfaces . Les recherches en réalité virtuelle se sont ainsi orientées vers les interfaces à retour d'effort et retour tactile (systèmes permettant de « toucher » un objet virtuel ou systèmes haptiques [2]), les interfaces visuelles de grande taille comme les CAVE©[Cruz-Neira *et al.*, 1993] ou encore les systèmes de capture de mouvement. Lorsque ces aspects « modélisation du monde » et « interaction entre utilisateur et monde virtuel » ont été étudiés, s'est posée la question de « la vie dans le monde » : humanoïde virtuel se comportant avec des niveaux plus ou moins complexes de perception et de compréhension du monde, comportements réalistes des objets avec des simulations physiques, et des interactions « crédibles ».

Cependant nous constatons que les environnements virtuels sont encore aujour-

1. L'évolution du calcul d'images de synthèse est liée aux possibilités technologiques très largement poussées par le jeu vidéo et son marché : en effet, les cartes graphiques de plus en plus performantes ont permis dans les quinze dernières années des sauts spectaculaires dans le calcul des images en temps réel.

2. Un système haptique permet de toucher un objet virtuel. C'est une interface à retour d'effort ou retour tactile qui est constituée soit d'un bras robot soit d'un système permettant de recréer artificiellement la sensation du toucher.

d'hui pensés pour une navigation, une exploration et une interaction dans lesquels la connaissance est représentée de façon réduite ou rigide, et n'offre pas suffisamment de latitude aux utilisateurs [3].

Se pose également la question de l'efficacité d'un système de réalité virtuelle : il ne s'agit pas de s'intéresser à la technologie prise isolément, mais de considérer le triplet « machines-personnes-environnements ». Il ne s'agit pas uniquement d'exploiter au mieux les ressources, ou de donner des comportements déterministes aux objets (en incluant les personnages virtuels) mais plutôt de proposer des modèles d'interaction entre utilisateur et monde virtuel ou entre objets du monde de façon à permettre de vivre une expérience en rendant le système transparent.

Par exemple lors d'une formation par la réalité virtuelle, l'apprenant peut se former grâce à un système guidé et contraint, mais son apprentissage sera plus efficace s'il se trouve face à des choix dans des situations complexes, et s'il se sent immergé dans ces situations. Les interactions qu'il pourra avoir seront d'autant plus riches et complexes que les modélisations du monde à explorer le seront, optimisant le bénéfice. Si la formation concerne un système industriel simplement représenté, l'utilisateur observera et pourra interrompre un processus, revenir en arrière, détailler une procédure de maintenance.Mais si la modélisation possède un niveau de granularité plus fine, alors l'utilisateur pourra décomposer et recomposer le processus, changer la procédure, observer des pannes et suivre les conséquences de ses actions. C'est ce que nous appelons une croissance du niveau d'interaction couplée à une croissance du niveau de modélisation. Pour l'utilisateur, le système technique doit être oublié au profit de l'expérience vécue qu'il permet.

La difficulté apparaît lorsque le nombre d'interactions complexes devient élevé, et que les points d'arrivée ne sont plus connus. L'enjeu est d'être capable de modéliser les interactions sans modéliser l'état final du monde, et d'utiliser à chaque étape le niveau d'interaction le plus efficace pour permettre une perception optimale. Comme dans la conception d'une œuvre d'art le monde virtuel induit du sens, et permet de percevoir sans qu'il soit besoin de disposer d'une représentation complète et fidèle du monde réel. Un autre exemple est celui du chirurgien : en cours d'opération il a besoin de connaître l'emplacement de son outil de travail dans le corps humain virtuel, mais pas forcément l'élasticité des membranes, s'il travaille sur le squelette, ou la nature microscopique des cellules qui composent les organes, alors qu'un chercheur en médecine pourrait en avoir besoin sans s'intéresser au geste du praticien.

L'important est que la représentation corresponde à une logique sensorielle. Cette stratégie renvoie à un critère d'efficacité du calcul : il est inutile de représenter les objets avec tous les détails géométriques, et tous les comportements qu'ils peuvent avoir alors que seul un aspect est pertinent. Autrement dit, alors que l'art classique explore la description et la fidélité de la « copie » du monde réel ou imaginaire collectif, l'art contemporain s'appuie sur l'évocation. C'est la notion de « crédibilité » opposée au réalisme qui s'impose ainsi.

3. Si l'on fait un parallèle entre réalité virtuelle et chimie organique, on peut comparer vanille naturelle et vanille de synthèse comme ayant des propriétés communes mais des différences de structure dans le détail. La vanille naturelle aura ainsi une grande richesse dans son parfum alors que la molécule de synthèse sera encore incomplète à ce niveau. Il s'agit bien d'une copie de la réalité, suffisante selon un point de vue (le goût d'un gâteau à la vanille artificielle) mais ne donnant pas entière satisfaction à un gourmet.

2 Complexité des interactions

Ces interactions sont habituellement organisées autour des objets : par exemple sélection, ou manipulation des objets virtuels comme des pièces mécaniques dans un système industriel. Mais les environnements ne permettent pas de capitaliser cette activité ou de manipuler les objets avec un point de vue spécifique. Par exemple pour manipuler une pièce mécanique dans un scénario de maintenance, il faut à la fois connaître l'ordonnancement de la procédure de maintenance, accéder à la pièce, et manipuler en ayant la connaissance technique nécessaire. Lors de la visualisation et de l'interaction, l'environnement doit « comprendre », c'est-à-dire capturer l'activité de l'utilisateur et « proposer » des actions ou des interactions.

Le problème est qu'aujourd'hui les comportements et les interactions sont souvent prédéterminés dans le système. Par exemple, si des utilisateurs collaborent autour d'une machine modélisée en 3D dans un système immersif (communément appelée maquette virtuelle), ils peuvent voir en relief la machine, tourner autour d'elle, lui attribuer des rotations et des translations, déplacer des parties de cet objet 3D. Pendant toute la durée de la session de collaboration, les échanges et les modifications proposées sont capitalisés au moyen de supports classiques 2D (papier, ou interfaces de gestion cycle de vie du produit) mais rien n'est en fait modifié sur la maquette.

Si les utilisateurs veulent indiquer des modifications à faire sur la machine, ils doivent sortir du système de réalité virtuelle et utiliser d'autres modes de capitalisation des connaissances [Barthès et Tacla, 2002]. On perd ainsi la qualité essentielle du travail réalisé en environnement virtuel : la vision partagée et l'interaction. Il nous faut donc modifier un objet virtuel en temps réel et sans revenir à sa conception, c'est-à-dire autoriser un nouveau mode d'interprétation ou « objet intermédiaire » comme support de connaissance. L'objet lui -même n'est pas central, mais ce sont les interactions qu'il permet qui comptent. Dans le cas de la maquette physique, le résultat final est le fruit d'un long processus et il aura fallu des maquettes intermédiaires pour l'atteindre. C'est cette interaction nécessaire que nous souhaitons renforcer, capitaliser et exploiter en environnement virtuel : d'une part le monde virtuel est susceptible d'être « informé », d'autre part les interactions dans ce monde vont permettre de construire la connaissance. Nous obtenons donc deux niveaux de complexité :

- un niveau de complexité entre utilisateur et monde virtuel,
- un niveau de complexité des interactions à l'intérieur du monde virtuel (entre objets).

Un autre exemple est le simulateur de formation : si un opérateur expert veut améliorer la simulation, il ne peut le faire par lui même. Il faut revenir en amont de la conception et modifier le simulateur ce qui engendre une perte de temps et un effort considérable de conception et de développement. Notre objectif est donc d'intégrer la part de connaissance experte ou les échanges entre utilisateurs de façon quasi automatique dans l'environnement virtuel. Pour cela il nous faut analyser les modes d'inscription et d'exploitation des connaissances en environnement virtuel pour que ce soit l'interaction qui construise la connaissance.

Inversement, lorsque des humanoïdes virtuels doivent interagir dans l'environnement, ils doivent avoir des informations en temps réel sur les évènements et sur les incidences pour leur comportement. Nous parlons dans ce cas de « l'état

du monde » avec une base invisible de représentation des connaissances qui est mise à jour à chaque modification. C'est le cas de la représentation de la scène ou « graphe de scène », arborescence générale qui permet d'identifier les différents objets, caméras virtuelles, personnages virtuels de la scène et leurs mouvements, ou leurs attributs. De façon parallèle, un modèle de représentation des connaissances lié au graphe de scène peut permettre d'enrichir très solidement l'interaction. Dans ce cas, c'est la connaissance inscrite dans l'environnement virtuel qui permet de construire l'interaction.

Dans les deux cas, la problématique est bien de modéliser l'interaction en environnement virtuel : c'est ce que nous approfondirons dans ce mémoire.

Ce document propose une contribution novatrice à une réflexion sur le lien entre réalité virtuelle, ingénierie des connaissances et sciences cognitives. Une différence existe entre la nature des connaissances représentées et sur lesquelles il est possible d'effectuer un raisonnement, et la nature de la connaissance construite lors de l'expérience de l'humain dans le monde virtuel. L'environnement virtuel s'enrichit aujourd'hui des multiples possibilités offertes par les modèles à base de connaissance et par celles du retour multi-sensoriel.

3 Capitaliser l'activité humaine en environnement virtuel

Lorsque l'on aborde la notion de connaissance, deux interprétations se font jour :

- connaissance au sens de l'intelligence artificielle, comme représentation symbolique sur laquelle on effectue un raisonnement,
- connaissance au sens des sciences cognitives, et par ce point de vue, perception [Berthoz, 1997] aussi bien au sens intellectuel que sensoriel du terme.

Notre programme de recherche s'articule autour de deux thèmes qui se complètent :

- un premier axe correspond à une recherche ancrée dans le domaine de la réalité virtuelle. Ces travaux se développent de manière interne au croisement des disciplines de la réalité virtuelle, de la gestion des connaissances et des sciences cognitives, et visent à imaginer et développer des concepts, des méthodes et des outils pour l'interaction avec les supports de connaissance en environnement virtuel, travaux qui s'inscrivent dans le paradigme de l'énaction,
- un second axe de recherche applique les résultats précédents à la modélisation et la simulation des situations de conception, de création ou de formation par la réalité virtuelle. Cet axe est particulièrement adapté à la conception collaborative, à la communication en environnement virtuels, ou au « serious game ». Inversement les questions posées par les applications artistiques telles que la danse ou la musique seront autant de champ d'investigation enrichissant les recherches amont.

Nos travaux de recherche ont pour ambition de donner un éclairage novateur sur le thème « interaction et connaissance » dans les mondes virtuels en approfondissant trois problématiques applicatives principales :

- interagir pour apprendre : former, permettre l'ancrage d'une expérience dans un monde virtuel avant d'être confronté au monde réel, représenter les connaissances en exploitant les possibilités de la réalité virtuelle, ressentir les effets

des propriétés physiques de données ou objets,
- interagir pour participer : collaborer à distance, échanger des points de vue, vivre à plusieurs dans un monde virtuel,
- interagir pour créer : concevoir, prototyper, créer numériquement.

Le but est d'étudier les modèles informatiques permettant de renforcer, capitaliser et ré-exploiter l'expérience humaine en environnement virtuel. Nous considérons plus particulièrement les activités de formation, de conception et de collaboration pour lesquelles d'une part l'ingénierie des connaissances permet de modéliser et de proposer un niveau d'abstraction pertinent, et d'autre part pour lesquelles la réalité virtuelle offre des modes d'interaction avec retour sensoriel qui fait sens pour les acteurs impliqués (formateurs, formés, concepteurs, utilisateurs distant,...).

Les systèmes de réalité virtuelle permettent de plus en plus d'intégrer des composantes dynamiques provenant de l'interaction mais sont essentiellement liés aujourd'hui aux possibilités de la navigation spatiale, dans les trois dimensions. L'approche de K. Blom [Blom et Beckhaus, 2007, Blom et Beckhaus, 2008] est d'accroitre le « dynamisme interactif » en intégrant la composante temporelle, soit une quatrième dimension, en plus de la composante spatiale dans la gestion des interactions utilisateurs. La plateforme baptisée FRVR (prononcer « FERVOR ») intègre du FRP (Fonctional Reactive Programing) et permet la création d'environnements virtuels où les « grandes étapes » (« components ») sont définies et continues mais où les interactions sont multiples et discrètes. K. Blom propose la définition suivante : « la dynamique interactive est le résultat de toutes les interactions (l'utilisateur influençant l'environnement) où l'objet de l'interaction est lui-même dynamique ».

Cette approche renvoie au couplage homme-machine et à la notion d'énaction, provenant des sciences cognitives. Notre conviction est que l'expérience en environnement virtuel est davantage liée à la perception du monde qu'à la réalité géométrique ou physique de l'objet. Si les modèles de simulation ont aujourd'hui évolué et peuvent apporter tous les éléments nécessaires à la construction du monde virtuel, les sciences cognitives ont bien leur place dans l'étude de l'interaction en environnement virtuel. C'est pourquoi nous avons pleinement choisi de nous intéresser à ce courant de pensée que constitue l'énaction même si la mise en place « d'environnements informatiques énactifs » ou interfaces enactives est encore difficile et incertaine. Le réseau d'excellence européen Enactive [4] est par ailleurs une belle tentative de clarification de cette nouvelle piste de recherche sur les interfaces.

Pour aborder la théorie de l'énaction, nous nous basons sur la métaphore de la cellule vivante qui perçoit son environnement, le structure, décide et agit en restant dans une position de perception active. De même nous considérons le couplage humain-système en réalité virtuelle comme central : il nous semble essentiel de modéliser la perception plutôt que l'objet. De même que les calculs de niveaux de détail (Level of detail ou LOD) en image de synthèse se font aujourd'hui en temps réel, on peut imaginer que les calculs liés à une perception active et basée sur la phénoménologie seront un jour non seulement modélisés finement avec des approximations de plus en plus fines, mais que ces calculs se feront avec des pré-affichages, de l'incertitude, et sans doute une meilleure prise en compte de l'activité de l'utilisateur. Dans cette optique il est important de ne pas s'arrêter aux limites actuelles des temps de calcul, freins qui, historiquement, ne résistent pas à l'évolution des systèmes, mais

4. Réseau d'excellence européen Enactive (http ://www.enactivenetwork.org/)

d'anticiper raisonnablement les évolutions dès aujourd'hui prévisibles.

Karl Popper [Popper, 1959] définit l'expérience comme méthode : « on décrit parfois la situation en disant qu'il y a un très grand nombre - un nombre probablement infini de mondes logiquement possibles. Cependant, le système que l'on appelle la science empirique est censé représenter un seul monde : le monde réel ou le monde de notre expérience. La théorie de la connaissance, dont la tâche consiste à analyser la méthode ou la procédure spécifique de la science empirique peut en conséquence être décrite comme une théorie de la méthode empirique : une théorie de ce que l'on appelle habituellement l' expérience. »

C'est bien de cette idée que nous partons afin d'incarner dans les environnements virtuels cette notion d'expérience possible par un couplage perceptif entre l'utilisateur et le monde virtuel.

4 Un cadre théorique pluri-disciplinaire

Le cadre théorique sur lequel nos travaux s'appuient repose sur quatre axes scientifiques : la réalité virtuelle, la gestion des connaissances, les sciences cognitives et la conception mécanique.

Pour centrer ce cadre fortement, nous proposons le tableau ci-dessous précisant pour chacun des domaines notre apport scientifique.

Domaine	Paradigme	Apport scientifique
Réalité virtuelle et sciences cognitives	Enaction	Conception de nouveaux modèles et environnements informatiques centrés sur le couplage action/perception entre utilisateur et système
Réalité virtuelle et ingénierie des connaissances	Représentation des connaissances empiriques	Annotations gestuelles et trace de l'interaction comme représentation du geste en EV Modèle de comportement non verbal par réseau bayésien dynamique
Réalité virtuelle et conception collaborative	Connaissance située	Trace de l'activité de collaboration en environnement virtuel collaboratif par les annotations 3D

TABLE 1.1 – Apport scientifique par domaine.

Ce que nous appelons « connaissance située » est une connaissance qui dépend du contexte géométrique, c'est-à-dire de la topologie de l'objet, d'une partie de l'objet ou de la scène virtuelle. Par exemple la connaissance de la forme de l'oreillette du cœur est une connaissance qui ne peut être comprise hors de son contexte c'est-à-dire l'anatomie du cœur.

Notre approche par rapport à ce cadre est de considérer les EVI comme modèles d'intégration des connaissances en ajoutant la valeur sensori-motrice autorisée par la réalité virtuelle et formalisée par les sciences cognitives. Pour illustrer concrètement

cette approche, citons l'exemple d'un EVI ayant pour modèle de représentation des connaissances un modèle à base de calculs statistiques permettant des comportements incertains de la part des humanoïdes virtuels. Un tel EVI apporte de nouvelles perspectives de recherche par rapport à des EV dans lesquels les modèles sont « rigides » (tout est prévu d'avance) ou simplistes (le raisonnement est pauvre). De plus la capture du geste étant une donnée de l'EVI, le retour sensoriel (geste de l'avatar) est une interprétation des modèles de comportement pour laquelle la connaissance n'est pas seulement abstraite, mais incarnée : les gestes du personnage virtuel sont recalculés et affichés selon les critères de vraisemblance autorisés par la connaissance du contexte.

5 Plan du mémoire

Dans ce mémoire, nous aborderons tout d'abord dans le chapitre 2 les concepts d'environnement virtuel informé (EVI) et d'interaction avec ces EVI, puis le concept d'énaction et enfin l'approche phénoménologique qui nous amène à considérer en priorité la façon dont l'utilisateur perçoit le monde virtuel avant de le concevoir.

Puis nous aborderons dans le chapitre 3 la notion d'interaction pour construire une connaissance à travers l'étude des EVI, des annotations 3D en environnement virtuel, de l'apprentissage en EVI (simulateur de formation développé pour un projet industriel) et des annotations gestuelles pour la formation à la maintenance industrielle. L'expérience vécue par l'utilisateur au travers des ces interactions avec un monde artificiel est à la fois unique et indispensable pour qu'il puisse construire sa connaissance.

Le chapitre 4 aborde la question inverse, c'est-à-dire comment les connaissances peuvent permettre l'interaction. Nous évoquons en particulier, un modèle de représentation des connaissances dans l'EVI pour que les utilisateurs puissent communiquer à travers un environnement virtuel et un modèle de reconstruction du patrimoine oppposant réalisme et crédibilité.

Le chapitre 5 présente un bilan et les perspectives de recherche que nous souhaitons développer sur l'interaction avec les EVI.

Chapitre 2

Contexte et concepts principaux

1 Contexte général

L'objectif de ces travaux de recherche est de comprendre comment l'expérience humaine peut être à la fois renforcée, capitalisée et réexploitée en environnement virtuel. Nous considérons plus particulièrement les activités de formation, de conception et de collaboration pour lesquelles d'une part l'ingénierie des connaissances permet de modéliser et de proposer un niveau d'abstraction pertinent, et d'autre part pour lesquelles la réalité virtuelle offre des modes d'interaction avec retour sensoriel qui fait sens pour les acteurs impliqués (formateurs, formés, concepteurs, utilisateurs distants,...).

Notre approche est ici de considérer ces univers non pas comme ayant la propriété d'être « réalistes » mais de permettre à l'utilisateur de leur porter crédit, à travers un modèle énactif de l'interaction avec l'environnement informé.

De cette façon la connaissance se construit par une boucle comprenant l'environnement informé, les interfaces de réalité virtuelle et l'utilisateur. Ainsi au fur et à mesure de son activité, l'utilisateur vit une expérience, qui peut être écrite, lue ou ré-exploitée avec les aspects multi modalité que permet la réalité virtuelle.

D'après Bruno Bachimont [Bachimont, 2004], « la connaissance n'est pas un objet, mais elle s'appréhende à travers des objets dont elle est l'interprétation ».

Il s'agit de construire une expérience par interaction avec le monde virtuel en exploitant à la fois les possibilités offertes par les interfaces sensori-motrices de réalité virtuelle et celles de l'ingénierie des connaissances, en liant les expériences corporelles, intellectuelles et cognitives.

Trois thèmes principaux ont guidé mes travaux de recherche :

- la notion d'EVI et d'interaction avec ces EVI,
- la notion d'enaction et son rôle dans la construction de connaissances par l'interaction avec des EVI,
- l'impact de la phénoménologie dans la conception d'EVI.

2 Les EVI et l'interaction avec les EVI

2.1 Un monde virtuel pour vivre une expérience

Notre choix est de considérer que les mondes virtuels doivent offrir à l'utilisateur une interaction avec retours sensoriels afin qu'il vive une expérience. Ces mondes peuvent être une copie de la réalité, dans la logique de la simulation, ou être une représentation de données ou formes permettant une interaction, ce qui constitue une approche très différente. Ainsi qu'elle est définie par J. Tisseau [Tisseau, 2001], la réalité virtuelle est un « dialogue entre disciplines scientifiques ». Depuis les premières visualisations dans les années 80 jusqu'aux systèmes immersifs et interactifs les plus récents, il s'agit de donner à voir et à sentir des mondes identiques à la réalité ou proches de la réalité, ou des mondes imaginaires ou artificiels dans lesquels une expérience est rendue possible.

Laissons P. Fuchs [Fuchs *et al.*, 2006] nous donner sa définition de la réalité virtuelle.

Définition 1
« La finalité de la réalité virtuelle 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 » (P. Fuchs)

Stéphane Donikian [Donikian, 2004], dix ans plus tard aborde l'aspect technologique et sensoriel dans sa propre définition.

Définition 2
« La réalité virtuelle peut être définie comme un ensemble de techniques matérielles et logicielles destinées à permettre à un ou plusieurs utilisateurs d'interagir de la façon la plus naturelle possible avec des données numériques ressenties par le biais de canaux sensoriels. » (Stéphane Donikian)

Dans la première définition, on s'intéresse à l'interaction de l'utilisateur avec le monde virtuel, à la boucle entre l'homme et le système de RV. Dans la deuxième définition, c'est la façon de construire le monde virtuel qui est abordée. En clair, qu'y a-t-il derrière le monde virtuel ? Comment les images générées en temps réel selon le comportement de l'utilisateur peuvent elles lui correspondre exactement ?

Mais ces deux définitions sont encore restrictives : elles définissent la réalité virtuelle à travers les interfaces, les matériels et les logiciels. Il semble qu'une définition centrée non pas sur la conception du système mais sur son usage pourrait apporter un autre éclairage : c'est un peu comme si depuis de nombreuses années, les concepteurs avaient défini le domaine scientifique de la réalité virtuelle à travers une sorte de cahier des charges de simulation du réel, en minimisant la composante humaine de l'expérience vécue dans le monde virtuel, expérience liée à la perception, la compréhension de symboles et à l'action dans le monde.

Nous apportons donc une nouvelle définition, celle de l'expérience dans le monde virtuel, constituée par l'interaction de l'utilisateur avec des connaissances à la fois symboliques et perceptuelles médiatisées par des retours sensoriels.

Définition 3
« La réalité virtuelle permet de vivre une expérience par l'exploration en temps réel de situations dans lesquelles les connaissances symboliques et l'interaction donnent à l'utilisateur des modes d'accès et d'exploration immersifs. » (Indira Mouttapa Thouvenin)

2.2 Expérience et expérimentation

Le dictionnaire de la langue française définit le mot expérience comme « nom féminin :
Sens 1 Connaissance acquise par la pratique. Synonyme : acquis. Anglais : experience.
Sens 2 Epreuve pour démontrer ou étudier quelque chose.
Ex : Expérience de chimie.
Synonyme : épreuve. Anglais : experiment. »

Si l'on s'en tient au sens 1, il s'agit de l'expérience qui permet de construire une connaissance. La phénoménologie [Merleau-Ponty, 1962]] étudie cette question dans le sens d'une expérience propre à moi, singulière et unique. Le ressenti est ici à la base de l'expérience. L'acquisition de connaissances se fait en profondeur, sans formalisation, et sans théorie. Elle est basée sur la capacité d'analyse et de mémorisation de l'utilisateur. Des guides, des aides, des « experts » peuvent améliorer cette acquisition, mais elle reste personnelle, singulière et liée à la perception.

Le sens 2 se rapproche de l'expérimentation scientifique, dans laquelle le contrôle des paramètres est souhaité. Ainsi que le dit Karl Popper, trois exigences caractérisent l'expérience comme méthode : le système doit être synthétique, de manière à pouvoir représenter un monde possible, non contradictoire. En deuxième lieu, il doit satisfaire au critère de démarcation c'est-à-dire qu'il doit représenter un monde de l'expérience possible. En troisième lieu, il doit être distinct des systèmes proches de lui, et permettre une expérience bien précise.

Nos travaux sont bien orientés sur le sens premier du mot expérience, dans le contexte très particuliers de l'environnement virtuel. De cette façon, nous nous intéressons à l'expérience vécue qui intègre la perception, l'interaction et la temporalité.

2.3 Réalité Virtuelle et Multimédia

Il n'est pas surprenant que les deux plus importants champs en informatique graphique soient aujourd'hui orientés vers l'interaction avec des images. Le multimédia propose des images 2D et des sons, souvent pré-calculés. Le rôle de l'utilisateur se limite à modifier l'ordre de présentation de ces images et de ces sons. La réalité virtuelle offre une immersion dans un monde en 3D, et des retours sensoriels de plus en plus larges (visuel, tactile, haptique, olfactif, proprioceptif).

Ces deux mondes se rejoignent par exemple dans le web 3D.

Ce travail s'inscrit dans une nouvelle direction de la discipline scientifique de la réalité virtuelle. Le champ de recherche identifié se place entre les sciences « dures », informatique, intelligence artificielle, gestion des connaissances et les sciences humaines, sciences cognitives, design, ergonomie de l'interaction. Redonner un rôle

central à l'humain et à son activité dans le monde virtuel nous donne une position scientifique à la fois interdisciplinaire, novatrice et ouverte sur des questions scientifiques et techniques, épistémologiques et sociales.

2.4 Interaction en environnement virtuel

Les interactions en environnement 3D sont largement décrites dans la conception d'interfaces utilisateurs 3D. La manipulation d'objets 3D en environnement virtuel n'est pas forcément naturelle.

Pour réaliser ces tâches dans l'environnement virtuel, peu à peu, les concepteurs ont imaginé des aides à travers des métaphores d'interaction. D'après Aristote, « La métaphore est le déplacement à un objet d'un nom qui en désigne un autre ».

La métaphore d'interaction va donner un meilleur confort à l'utilisateur, mais du même coup, elle induit un comportement. Ainsi par exemple, le volant permet de naviguer dans le monde virtuel du simulateur de conduite, mais les « bottes de sept lieux » permettent une navigation accélérée dans le même monde. Une taxonomie des différentes métaphores est présentée en figure 2.1.

Beaucoup des techniques d'interaction concernent différents systèmes, comme par exemple l'interaction avec retour d'effort et les interfaces haptiques ; le concept d'interaction et les détails de son implémentation le rendent unique. On observe une organisation en tâches et une variation dans les tâches. Deux grandes familles d'interaction se distinguent [Bowman *et al.*, 2004] : les tâches de sélection et manipulation, et les tâches de navigation et wayfinding (trouver son chemin).

Les techniques d'interaction 3D sont des méthodes utilisées pour accomplir une tâche donnée à travers une interface. Elles incluent les matériels : interfaces sensori motrices de réalité virtuelle, systèmes immersifs, plateformes de simulation et les logiciels associés. Le déplacement en environnement virtuel (EV) est le moteur de la navigation et l'on retrouve par exemple des tâches de bas niveau comme le contrôle de la position et l'orientation du point de vue. Dans le monde réel, le déplacement est la tâche de navigation la plus physique, incluant le mouvement des pieds, la rotation d'une roue ou d'un volant etc. Dans le monde virtuel, les techniques de déplacement permettent à l'utilisateur de se translater ou de faire une rotation du point de vue et de modifier les paramètres du mouvement comme la vitesse « comme par magie ». Le « Wayfinding » est la composante cognitive de la navigation : elle se place à un haut niveau de planification et de prise de décision relative au mouvement de l'utilisateur. Elle demande la compréhension spatiale et la planification de tâches comme de déterminer la position actuelle dans l'environnement, de déterminer un chemin de ce point jusqu'à un but précis, en construisant une carte mentale de l'environnement. Cette méthode de navigation dans le monde réel a fait l'objet de recherches extensives : aides comme les cartes 2D géographiques ou routières, signes de direction (signalisation routière), marques au sol.

2.5 Métaphore d'interaction

Les métaphores d'interaction ont pour but d'aider l'utilisateur à effectuer des tâches complexes dans l'environnement virtuel par des actions simples et des plus naturelles dans le monde réel [Olive, 2005].

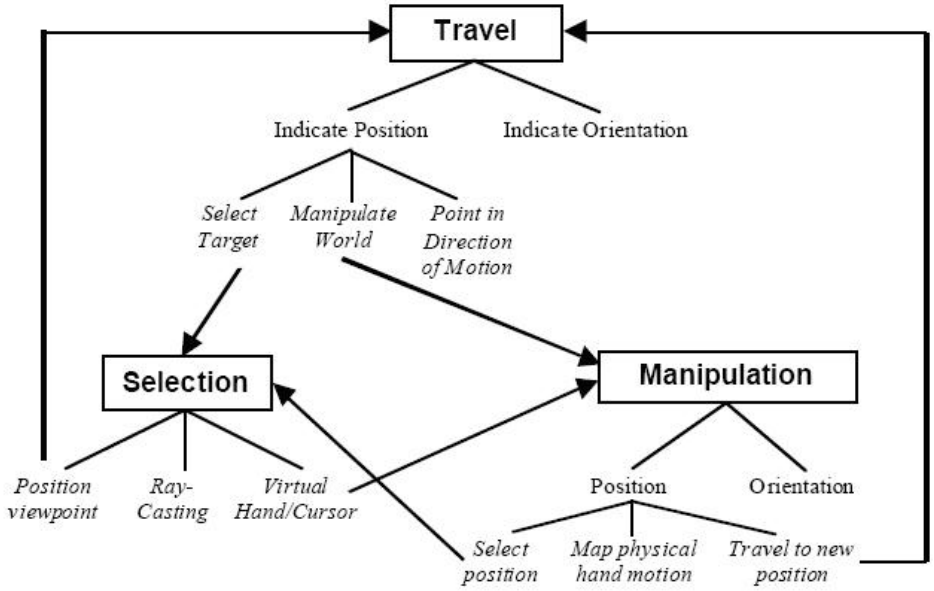


FIGURE 2.1 – Taxonomies simplifiées des métaphores d'interaction 3D [Bowman, 1999]

Plusieurs métaphores ont été créées à ces fins. On peut notamment citer « Caméra in Hand » [Boeck *et al.*, 2004], qui permet à l'utilisateur d'utiliser sa main comme caméra et déplacer son point de vue simplement par des mouvements de la main. On comprend bien ici que le geste dans le monde virtuel n'est pas une copie de celui exprimé dans le monde réel. On peut aussi citer la téléportation, par l'intermédiaire de laquelle l'utilisateur se déplace instantanément d'un point à l'autre en visant simplement le second par un dispositif de pointage quelconque. Bien d'autres sont possibles, une taxonomie complète des interactions de déplacement et de sélection/manipulation a été proposée par Bowman [Bowman, 1999]. Pour que l'utilisateur ait conscience de l'effet de ses actions à travers la métaphore dans le monde virtuel il lui faut un retour ou « feedback ». Ce retour est une composante essentielle de la métaphore, qui permet à l'utilisateur de comprendre son action dans le monde virtuel et est donc indispensable à l'apprentissage de la métaphore. Il peut être de différentes natures : visuel, sonore, tactile, haptique (retour d'effort) et pourquoi pas olfactif.

Les données telles que les textes, images, vidéos ne peuvent pas être pour l'instant transformées en objets 3D, ce qui pose le problème de leur utilisation en EV immersif. Dès lors il faut projeter ces objets sur des plans insérés dans l'environnement. Ceux ci sont des objets 3D à part entière, ce qui implique que les interactions de l'utilisateur sur ceux-ci soient gérées de la même manière qu'avec un objet 3D conventionnel.

Ces travaux montrent que l'environnement virtuel est porteur de connaissances sur la géométrie du monde, et que les interactions permettant de l'explorer sont liées à une connaissance de l'espace et des objets contenus dans ce monde virtuel. Par contre ces interactions ne sont pas pensées pour construire une connaissance ou pour percevoir des données abstraites. C'est pourquoi nous nous intéressons au concept d'interaction dans un environnement virtuel informé (EVI en français ou IRVE en

anglais pour « Information-Rich Virtual Environment »).

2.6 Représenter les connaissances en EV : les EVI ou environnements virtuels informés

La recherche sur les environnements virtuels d'une part, sur l'intelligence artificielle et sur la vie artificielle d'autre part, a été menée par différents groupes [Aylett et Luck, 2000] et différentes préoccupations et intérêts, mais une convergence émerge de ces deux champs . Les applications dans lesquelles une activité indépendante de l'utilisateur prend place, impliquant des foules ou d'autres agents, commencent à être bien explorées, alors que les agents synthétiques, les humains virtuels, et les animaux informatiques sont des domaines dans lesquels les deux champs demandent une forte intégration. Les deux communautés ont beaucoup à apprendre l'une de l'autre pour ne pas doublonner leurs recherches et leurs résultats. Dans ces travaux on peut distinguer :

- des environnements aptes à fournir des informations aux utilisateurs,
- des environnements dans lesquels les utilisateurs sont représentés par leurs avatars partiellement autonomes,
- des environnements dans lesquels on trouve des agents intelligents différents de l'utilisateur,
- de nombreux autres environnements dans lesquels les deux domaines sont explorés.

Ces environnements sont dénommés « Intelligent Virtual Environments ».

Environnement virtuel intelligent
Un environnement virtuel intelligent est à l'intersection de la réalité virtuelle, de l'intelligence artificielle et de la vie artificielle [Aylett et Luck, 2000].

D'autres travaux [Bowman *et al.*, 2003] présentent les IRVE comme « Information-Rich Virtual Environments » : ces environnements affichent des informations en exploitant les possibilités de l'interaction en environnement virtuel.

Environnement virtuel largement informé
Un environnement virtuel largement informé permet d'aider l'utilisateur et de lui fournir des informations de façon intégrées au monde 3D.

Enfin S. Donikian parle de l'EVI ou environnement virtuel informé comme étant un environnement dans lequel les connaissances sont ancrées de façon à ce qu'une entité comportementale puisse en tirer ce qui est nécessaire afin d'éviter un travail d'analyse et de compréhension du monde [Septseault, 2007].

Environnement virtuel informé
Un EVI est un environnement virtuel dont les modèles 3D contiennent non seulement la géométrie de la scène mais aussi toutes les informations pertinentes pour les entités comportementales à simuler comme les éléments symboliques ou sémantiques qui peuvent permettre à ces entités de percevoir, décider et agir [Donikian, 2004]

Nous proposons une autre définition de ce type d'environnement en élargissant cette notion aux environnements dans lesquelles on intègre des modèles de représentation des connaissances. Ceci inclut les bases de connaissance, les ontologies, les modèles de raisonnement, les calculs statistiques permettant de créer des interactions et comportements à base de connaissance.

Environnement virtuel informé (nouvelle définition)
Un EVI est un environnement virtuel doté de modèles à base de connaissance dans lequel il est possible à la fois d'interagir et de permettre des comportements par interprétation de représentations dynamiques ou statiques.

Ces EVI deviennent alors des moyens puissants d'autoriser une évolution du système lors de l'activité de l'utilisateur mais aussi une évolution de l'utilisateur au fur et à mesure que le système est utilisé. Cette approche est celle de l'énaction, que nous abordons dans le paragraphe suivant.

3 Construire la connaissance en EVI : un processus enactif

3.1 Concept d'énaction

L'approche énactive de la cognition ou « énaction » inspire nos travaux avec la notion « d'action guidée par la perception ». Cette notion provient à la base des réflexions de Francisco Varela, neurobiologiste qui s'est intéressé à la suite de ses travaux avec Maturana au Chili, à une alternative au computationnalisme et au connexionnisme pour comprendre la cognition. La tentative de F. Varela pour introduire des concepts de biologie en sciences cognitives et ses recherches en neurosciences aboutissent au concept de cognition incarnée (« embodied cognition »).

La connaissance empirique est définie [Casati *et al.*, 2007] comme une information obtenue à travers des interactions où l'on considère le couplage perception-action. Par exemple saisir un objet directement comme prendre un caillou dans sa main ou en contournant un obstacle qui occulte la vue du caillou. Cela est possible par des mouvements intuitifs dont nous ne sommes souvent pas conscients. Comme conduire une voiture, jouer d'un instrument de musique, modeler des objets avec de l'argile, faire du sport, etc. Cette connaissance n'est ni symbolique, ni iconique, elle est directe dans le sens qu'elle est naturelle et intuitive, basée sur l'expérience et sur les conséquences perceptives des actions motrices. C'est par exemple l'expérience de l'ombre comme objet qui amène l'utilisateur à comprendre par son interaction avec le monde ce phénomène mystérieux [Casati, 2003].

De même, William H. Warren décrit la « connaissance énactive » [Warren, 2006] comme une forme non symbolique et intuitive de connaissance ancrée dans l'acte de « faire ». D'après lui, pour concevoir cette notion de connaissance enactive, on doit répondre à deux exigences : premièrement, permettre des interactions avec un monde virtuel ou un espace de contrôle qui soient parallèles à celles de la perception-action naturelle. Deuxièmement il faut permettre l'expérience d'une « présence » perceptible, capturant l'intentionnalité de la perception -action naturelles. Son opinion est

que la connaissance énactive est constituée par des associations liées à la perception-action, et que celles-ci ne peuvent être comprises que dans le contexte de la dynamique de comportement d'une activité.

Nos travaux s'inscrivent dans le paradigme de l'énaction, plus précisément à travers les réflexions menées dans le réseau d'excellence Enactive Interfaces dans lequel nous nous sommes impliqué. Un rapide historique de cette notion d'enaction tiré essentiellement d'un article de Pierre Deloor [De loor *et al.*, 2008] et des références bibliographiques larges (liées aux domaines de la philosophie, des sciences cognitives ou de l'intelligence artificielle) citées plus bas permettront au lecteur de se familiariser avec cette évolution récente des sciences cognitives.

Cet historique, orienté vers les préoccupations des concepteurs de système et vers la réalité virtuelle, sera suivi d'une description de notre proposition théorique concernant le processus de construction de la connaissance en EVI.

3.2 Bref historique du courant de pensée de l'énaction

L'énaction est un courant alternatif des sciences cognitives s'inscrivant dans la suite des théories cognitiviste [Pylyshyn, 1984] et connexionniste [Rosenblatt, 1958]. Si l'on compare le système énactif à une structure biologique, l'idée principale est que la « cognition se construit tout en construisant son environnement, enracinée dans son monde propre [Sharkey et Ziemke, 1998] » et la métaphore qui est souvent associée à un tel système est celle du chemin que nous traçons en marchant. Ce courant peut être caractérisé par :

- une forte inspiration provenant des travaux de recherche en biologie de Varela et Maturana [Maturana *et al.*, 1968, Maturana et Varela, 1980],
- une cohérence avec les thèses constructivistes [Piaget, 1970, Foerster, 1984, Shanon, 1994, Glasersfeld, 1995, Rosh, 1999],
- un lien naturel et puissant avec le courant philosophique de la phénoménologie [Husserl, 1960] , plus particulièrement avec l'idée d'expérience vécue « à la première personne [Varela *et al.*, 1993, Lenay, 1996] » .

Francisco Varela définit un système énactif comme un système qui construit le monde en même temps qu'il est construit par lui.

> Francisco Varela est né en 1946 au Chili et obtient son PhD à l'université d'Havard en biologie (travaux sur la rétine des insectes). Il est auteur avec Maturana de la théorie de l'autopoïése, autoreproduction de l'organisation du vivant qui diffère de l'évolutionnisme de Darwin et de l'approche mécaniste. Il qualifie un système vivant à partir de l'idée d'autonomie.

La posture épistémologique de Varela est une alternative aux conceptions computationnelles et connexionnistes.

La théorie de l'énaction nous conduit à considérer deux contraintes : chaque utilisateur construit ses représentations de façon singulière et les interactions ne sont possibles qu'avec les représentations des connaissances situées. L'originalité de ce courant est de considérer, d'après Pierre Deloor, « La construction de la cognition sur la base des interactions entre les organismes et leur environnement physique aussi bien que social [De Jaegher, 2007] ». D'après lui « si l'on s'abstrait de la biologie, on parle de systèmes opérationnellement clos. Les systèmes opérationnellement

clos forment une organisation de processus dépendant récursivement les uns des autres pour se régénérer et peuvent être identifiés comme une unité reconnaissable dans le domaine des processus. Rien ne s'oppose à ce que la notion de système opérationnellement clos soit compatible avec le domaine phénoménal de l'artificiel ». Dans le paragraphe suivant nous allons voir comment ce courant peut permettre de penser autrement la réalité virtuelle.

3.3 Réalité virtuelle et énaction

Domaine d'application par excellence du principe de l'énaction, la réalité virtuelle s'attache en effet en priorité à proposer à l'utilisateur de vivre une expérience singulière (unique dans le temps et unique car propre à chaque utilisateur) par une interaction avec un monde artificiel. La « théorie de la perception énactive » [Gibson, 1966] met en évidence l'intérêt de travailler sur un niveau de détail « efficace » de l'interaction, plus économique en temps de calcul car centrée sur le « nécessaire » et non sur la copie de la réalité.

Cette interaction est en permanence adaptée à l'action de l'utilisateur comme par exemple dans le cas de l'utilisation d'un système haptique. Le calcul du retour d'effort est en effet recalculé (à une fréquence de mille hertz) afin que l'utilisateur ressente le contour d'un objet, sa dureté et sa forme lors d'un parcours avec positions successives de l'interface dans l'espace réel. Typiquement dans ce cas de figure l'utilisateur va se faire une idée de la forme de l'objet par tâtonnements successifs en touchant différents points de l'objet. La mise en œuvre du principe d'énaction à travers des dispositifs de réalité virtuelle fait appel à un paradigme fort qui est celui du couplage structurel entre un organisme et son environnement : dans la boucle homme-système, on peut en effet modéliser non seulement le système mais aussi l'interaction entre l'homme et le système. Ce couplage existe « lorsqu'une auto-adaptation des boucles sensorimotrices au fil de l'expérience » [De loor *et al.*, 2008] est possible.

3.4 Construction de connaissance comme processus énactif

Les travaux du laboratoire Costech de l'UTC [Lenay *et al.*, 2007] se placent dans ce cadre théorique. « Le cadre théorique de la perception active, telle qu'il est développé aussi bien avec les théories écologique de la perception [Gibson, 1966], dans les approches phénoménologiques [Merleau-Ponty, 1962] ou dans les théories sensorimotrices et énactives [Piaget, 1936, Varela, 1979, Noë, 2002], est le plus adapté puisqu'il permet de prendre en compte les modifications de l'expérience provoquées par l'emploi des interfaces techniques ». L'idée générale qui guide ces travaux est que la perception est un phénomène actif. Il n'est possible de percevoir le monde que parce qu'il nous répond, qu'il répond à chacune de nos actions. De même dans le monde virtuel, nous avons besoin de ce retour afin de construire notre connaissance. A l'extrême, lorsqu'un système de réalité virtuelle est trop lent pour des problèmes de calcul d'image par exemple, on assiste à une perte de motivation et une brusque rupture de cohérence. D'autres retours sensoriels comme le retour haptique doivent se faire à des fréquences proches des fréquences attendues par l'être humain :

– 20Hz pour le visuel (l'œil humain peut distinguer deux images différentes en dessous de vingt images par seconde).

– 1000 Hz pour l'haptique (la main humaine peut distinguer deux sensations de toucher en dessous de 1000 sensations par seconde).

Le laboratoire Costech s'intéresse à la notion d'énaction et a participé à un réseau d'excellence « Enactive Interfaces » auquel nous avons contribué. Responsable à l'UTC du sous programme « believability of virtual worlds » nous avons mené une réflexion sur les concepts de réalisme et de crédibilité. Fondamentalement l'énaction implique une relation bijective entre un organisme et un environnement. La spécificité de l'énaction humaine est qu'elle peut impliquer la médiation d'un « outil » (couteau, microscope, etc. et aussi ordinateur, interface tangible). La thèse développée par A. Katchakourov, C. Lenay et J. Stewart est que cette médiation de l'outil dans l'expérience enactive de l'environnement n'est pas neutre mais au contraire impacte l'énaction, y compris en réalité virtuelle de même que les skis modifient notre perception de la montagne.

« Ce n'est pas l'interface qui est (ou n'est pas) enactive c'est l'humain, utilisant une interface (appropriée, d'un design idoine) qui rend le monde énactif ». De ce fait, la conception des interfaces de réalité virtuelle est fondamentale pour permettre l'énaction, y compris en ayant à l'esprit la contradiction inhérente à la structure symbolique des systèmes informatiques et la nécessité du rendu sensoriel.

Une autre approche de l'énaction, cette fois dans le but de construire des modèles pour l'autonomie d'entités virtuelles est celle de J. Tisseau et M. Parenthoën. Les auteurs s'intéressent à un monde virtuel constitué d'entités autonomes qui se perçoivent, perçoivent leur environnement, agissent et s'adaptent. Il devient alors nécessaire de modéliser à la fois chaque entité mais aussi l'organisation collective des entités.

Cette modélisation est formalisée dans [Le Gal *et al.*, 2007] et dans le traité de la réalité virtuelle [Fuchs *et al.*, 2006] vol. 3 en ce qui concerne les entités autonomes, avec trois rôles distincts :

– l'aisthésis (création de la structure du milieu),
– la praxis (attribution des propriétés au milieu structuré par les demandes d'expériences perceptives),
– la poiesis (modification de la structure interne de l'entité ou la création de nouvelles entités).

L'approche de M. Parenthoen est centrée sur le concept d'entités autonomes. L'organisation d'entités autonomes selon l'hypothèse énactive demande à chaque entité de réagir de façon autonome, autrement dit d'avoir une autonomie d'exécution dans la simulation. Notons que chaque entité peut jouer un rôle de prédiction (expérience, aisthésis), d'action (phénomène, praxis) et d'adaptation (prévision, poiésis).

4 Simulation, connaissance et phénoménologie

4.1 Simuler pour calculer et simuler pour comprendre

Dans les situations complexes de modélisation reposant sur la résolution numérique de systèmes d'équations différentielles locales appliqués à la version discrétisée de la scène il est possible d'utiliser une approche dite « physique » ou « par modèles physiques » ce qui permet d'aboutir à des effets visuels spectaculaires et fouillés.

Cependant le coût de calcul de ces modélisations est parfois extrêmement élevé

et les connaissances mise en œuvre non exploitées : « l'on ne fait aucun usage de toute la connaissance a priori dont on peut disposer sur un phénomène naturel donné auquel on s'intéresse : on introduit lors de la simulation numérique considérablement plus de degrés de liberté que l'apparence du phénomène ne semble en avoir, ce qui du simple point de vue de la théorie de l'information est un signe d'inefficacité et de gaspillage de ressources. » [Neyret et Praizelin, 2001].

Pour Fabrice Neyret les « conséquences macroscopiques visibles » sont sans doute plus importantes que les « causes microscopiques internes » et les approches phénoménologiques prennent alors toute leur valeur en offrant une modélisation directe de l'aspect perçu.

C'est là que la phénoménologie de la perception [Merleau-Ponty, 1962] éclaire ces notions de simulation et de connaissance : la simple observation et la perception de façon plus large, dans les mondes virtuels peuvent prendre diverses formes. On observe une vraie rupture de pensée, de modèles et donc de technologie dès lors que l'on aborde cette question. En réalité virtuelle, cela se traduit par des choix de conception, de modélisation ou de technologies.

Anatole Lecuyer [Lécuyer *et al.*, 2001] aborde la question de l'illusion du sens du toucher, recrée classiquement par des dispositifs à retour d'effort ou haptiques [Burdea, 1996] par un dispositif « pseudo haptique » : l'illusion haptique est générée par un effet visuel. Cette étude ouvre le champ à toutes les études liées à l'illusion en réalité virtuelle. Le réalisme des expériences, des situations, des sensations et surtout du graphisme ont été les critères essentiels de performance des systèmes de réalité virtuelle car, étant issue de l'informatique graphique et de la robotique, plusieurs logiques se sont naturellement imposées dans ce dialogue entre disciplines :

- une logique de réduction et de recomposition avec les modèles et algorithmes de synthèse d'image, d'illumination, de calcul de niveau de détail ou encore de cinématique ou de dynamique inverse afin de traduire le réel pour un traitement formel,
- une logique d'interprétation et d'amplification dans laquelle il est donné à voir et à ressentir par exemple l'élasticité d'un tissu humain difficile d'accès [Cotin *et al.*, 1999], les flux aérauliques ou thermiques [Chen *et al.*, 2007], la suppléance du sens de la vision par le sens tactile [Bach-y Rita *et al.*, 1969, Bach-y Rita, 1972, Bach-y Rita, 1994], afin de construire une connaissance par l'expérience [Lenay, 1999].

4.2 Perception et interaction

Pour solliciter l'imaginaire, un reflet de l'idée est nécessaire, reflet perceptible par tout le corps de l'utilisateur et non uniquement par les yeux. Le premier obstacle dans une telle création est une exploration et une accumulation d'éléments sur tout ce qui concerne le contexte, le décor, les déplacements, les évènements, les échanges, les séquences d'actions, les vérifications, les émotions, les ambiances qui vont être à la source du monde virtuel. Le monde virtuel ne préexiste pas, c'est une construction énactive.

Cependant le réalisme n'est pas garantie d'immersion ou de sensation de présence [1] :

1. « Immersion can be described objectively and should be distinguished from presence. Presence, in contrast, is a psychological phenomenon. It has been defined as the participant's sense of

tels les spectateurs de l'antique tragédie grecque décidant de croire au drame devant des acteurs portant un simple masque blanc, tels les utilisateurs des systèmes de réalité virtuelle lorsqu'ils acceptent une immersion dans le monde virtuel.

On se trouve donc dans un théâtre de l'artificiel, où les acteurs et les décors seront sans cesse impactés par les échanges avec le public : modifications au fur et à mesure des changements d'humeur, de désirs ou d'intentions de ce public. Ce théâtre qui évolue sans cesse doit posséder des décors prêts à être montrés ou cachés, ce qui revient à les afficher numériquement ou à les garder en mémoire (en attente d'être affichés). Ce luxe de modifications à volonté est mis en regard de la machinerie du théâtre : les systèmes techniques sont ici remplacés par des effets spéciaux ou des illusions. Croire à la situation devient un jeu entre l'acteur et le public, un engagement de l'utilisateur par rapport au système numérique qui réagit au comportement humain. Le réalisme n'est pas utile, c'est la crédibilité, la cohérence, qui est essentielle, qu'il s'agisse d'une interface haptique par laquelle le retour d'effort doit correspondre au visuel ou qu'il s'agisse d'un calcul de niveau de détail adapté à la distance œil-objet.

Ainsi, l'environnement virtuel collaboratif [Benford *et al.*, 1995] devient transparent dès que la communication s'installe efficacement : la preuve en est dans les espaces de « chat », de blogs, et peu à peu de mondes 3D comme « Second Life ».

Une interaction se construit lentement entre le système et l'humain, interaction qui traduit le désir d'explorer, le plaisir de comprendre et de sentir la matière répondre de plus en plus précisément aux questions de la main ou du corps, et non plus seulement de l'esprit. Le monde numérique devient alors tangible à travers cette interaction, qui intègre l'humain à part entière dans le système et permet l'expérience dans le monde virtuel.

4.3 Expérience dans les EVI comme objet de recherche

Les premières idées restent générales et pourtant chacun se représente déjà avec précision un nouvel outil ou un système permettant de réaliser des possibles actions, une vie dans un monde différent, une nouvelle nage dans une mer exotique, une visite d'exposition soigneusement préparée. Quelles démarches privilégier ? Démarches scientifiques, techniques, issues de l'image de synthèse ou de la robotique, colorées par le jeu vidéo, basées sur des études sociologiques, inspirées des sciences cognitives, héritées du multimédia ? Doit-on privilégier des points de vue, des règles, des méthodes ?

L'imaginaire se construit progressivement et s'incarne dans le numérique pour fabriquer des objets et des mondes correspondant à l'histoire des idées, des pratiques et des activités humaines. La confirmation de cet imaginaire par des représentations colorées, des formes dynamiques, des actions sur ces formes et des réactions conformes à ce qui est attendu permet le réglage fin des regards.

Il s'agit de mettre au dehors ce qui est en dedans (métaphore de Moebius...) : les émotions, les intentions, les images perçues qui deviennent images partagées, l'objectivation du geste, le ressenti de la main (retour d'effort) ou du corps (cabine

'being there' in the virtual environment. » Biocca , The Cyborg's Dilemma : Progressive Embodiment in Virtual Environments. Journal of Computer-Mediated Communication 1997 ; 3. [5, sect. 5.1.1.]

du simulateur). Un autre que moi va donc pouvoir vivre un atterrissage difficile, une opération des yeux, une tâche de maintenance ou d'assemblage rare, une situation de malaise dans la relation avec un autre, une peur de l'incendie. Vivre au travers d'un film des situations devient vivre au travers de mondes virtuels des expériences de façon profondes et marquantes, en ajoutant une navigation et une interaction à tout moment.

L'expérience vécue dans le monde virtuel à travers les EVI fait ici apparaître le concept de « crédibilité » : le modèle du système est différent du modèle perçu. Prenons pour exemple le simulateur de navigation fluviale et maritime. La reproduction fidèle des vagues et des courants ne suffit pas pour obtenir la sensation de naviguer avec une péniche. C'est le ressenti que l'utilisateur va finalement obtenir en interagissant avec le système, qui lui donnera la « croyance » de naviguer. Il s'agit bien de traduire et non de reproduire.

Nous avons souhaité, dans les deux chapitres suivants, aborder deux aspects précis des EVI :

- l'interaction permettant de construire une connaissance en environnement virtuel,
- les connaissances à inscrire dans l'EVI pour favoriser une interaction « intelligente ».

Laissons Waterworth conclure [Waterworth, 2002] : « avec la réalité virtuelle, nous rendons tangible l'intangible, nous concrétisons l'abstrait ; et, avec la concrétisation, les pensées qui auparavant restaient abstraites sont saisies directement à travers l'expérience immédiate, l'action physique et les émotions. Il s'agit d'un changement profond dans la perception : on réalise que la vie mentale sert non seulement à résoudre des problèmes pratiques, mais encore plus à fournir des expériences, à donner le sentiment d'être ».

Dans ce vaste champ d'investigation, nous choisissons de nous concentrer sur une seule problématique, le couplage entre interaction et connaissance en environnement virtuel informé. Les expériences corporelles et intellectuelles permises par la réalité virtuelle sont étroitement liée à la phénoménologie [Husserl, 1960], et c'est cette grille de lecture qui nous a amenée à structurer les deux chapitres suivants.

D'une part, nous allons voir dans le chapitre 3, comment le fait d'interagir avec des objets de l'environnement virtuel, d'offrir à l'utilisateur le loisir d'explorer et de comprendre à son rythme et d'avoir à l'instant t une perception singulière d'un système, d'un phénomène ou d'une scène va permettre de construire une connaissance. L'utilisateur est cette fois acteur de cette construction, il est au cœur du processus qui lui est propre. Il peut alors partager cette connaissance construite à travers des systèmes collaboratifs évolués.

D'autre part, les connaissances représentées dans l'environnement, accessibles à l'utilisateur ou exploitées par le système vont l'aider à orienter son interaction, vont le guider, tels des guides virtuels ou des traces de son activité dans le monde virtuel. Nous aborderons ainsi dans le chapitre 4 des exemples de modèles d'environnements virtuels dans lesquels l'interaction est de plus en plus complexe, au fur et à mesure que les connaissances représentées sont « comprises » et « exploitées » dans l'environnement (figure 2.2).

Les environnements virtuels peuvent ouvrir la créativité. Leur conception reste un défi.

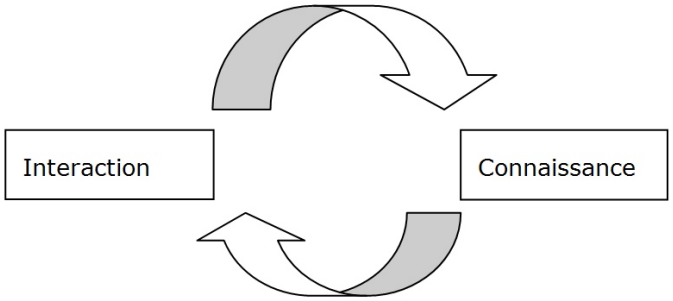


FIGURE 2.2 – Interaction et connaissance

Chapitre 3

Interagir pour connaître

1 Introduction

Dans cette partie nous traitons des travaux menés afin de construire une connaissance par interaction avec un environnement virtuel informé. Il n'est pas indispensable de raisonner sur les informations présentes en EVI mais plutôt de les organiser et de les exploiter afin de construire la connaissance spécifique et parfois située nécessaire dans les domaines d'application de la conception ou la formation.

Ce chapitre présente deux environnements de réalité virtuelle, MATRICS et PTOLEMEE, ainsi qu'un projet (prix Imagina « meilleure performance », catégorie industrie) de transfert industriel RVPI. MATRICS apporte un modèle d'annotations 3D pour collaborer autour de la maquette virtuelle, en capitalisant les annotations au moyen d'une base de concepts. Le projet RVPI permet de former des opérateurs à la production de pneumatiques par un outil de réalité virtuelle intégrant les connaissances métiers. Enfin PTOLEMEE reprend la problématique industrielle en apportant la capitalisation du geste de maintenance par les annotations gestuelles.

Ces trois projets ont une composante commune : l'interaction pour construire une connaissance, avec d'une part, l'écriture en EVI (annotations) et d'autre part la lecture en EVI (base de concepts). Le projet RVPI est une version simplifiée de ce que les EVI peuvent apporter dans le sens de la capitalisation et de l'exploitation des connaissances en environnement virtuel.

2 Conception et création collaborative en EVI : projet MATRICS

La conception est à la fois basée sur les connaissances implicites ou explicites des acteurs, mais c'est également un processus où il est important de capitaliser les échanges et les traces de l'activité de ces acteurs. Cette capitalisation n'est pas facilement réalisable aujourd'hui dans les environnements virtuels.

2.1 Une ontologie pour la collaboration : l'exemple d'une conception mécanique

Lorsque l'on évoque la conception collaborative, un certain nombre de concepts sont communément acceptés. Il est souvent admis par exemple que la collaboration doit se faire de façon synchrone, ou que les outils de modélisation sont suffisamment évolués pour permettre une grande efficacité dans la conception et la collaboration. Nous avons examiné en détail ces points (projet AACC qui signifie « agent assistant pour la conception collaborative »[1]) parmi d'autres en analysant le déroulement d'un projet international de conception mécanique collaborative entre une université américaine et une université française, lors de la formation des étudiants dans le domaine de la CAO.

Le projet de recherche AACC est issu d'une expérience de conception collaborative[2] entre des étudiants de l'Université de Technologie Compiègne (UTC) et des étudiants d'Iowa State University (ISU) [Thouvenin *et al.*, 2002]. Nous avons travaillé avec Marie Hélène Abel [Abel *et al.*, 2004] pour analyser les résultats de cette collaboration intercontinentale entre des étudiants qui se formaient à la fois en conception mécanique et en modélisation CAO. Notons au passage que l'aspect modélisation est entièrement géré par le logiciel de CAO Catia de la société Dassault Systèmes [Dassault 06]. La difficulté rencontrée par les étudiants semblait davantage être dans le champ de la collaboration internationale, et surtout l'exploitation du support informatique de collaboration.

La démarche consistait à observer les problèmes posés lors de la collaboration à distance afin de concevoir et de modéliser à l'aide d'un outil CAO un nouveau produit. Une partie des problèmes identifiés dans cette analyse ont montré le manque :

- d'un environnement de conception [Boujut et Blanco, 2003] complet avant l'étape de modélisation,
- d'un environnement de collaboration intuitif et flexible.

Pour résoudre ce problème, nous avons proposé une ontologie des tâches commune aux deux cultures (Europe et Amérique du Nord) dans le but de fournir un agent assistant personnel aux équipes de conception [Enembreck *et al.*, 2004].

Ici l'agent (Table 3.1) a détecté le fait que certains étudiants de l'UTC consultaient les étudiants de l'ISU pour choisir une méthode de travail. L'ontologie est invisible pour les utilisateurs. L'agent détecte une tâche implicite. Dans cette étude préliminaire aux travaux sur l'interaction avec les connaissances pour créer, nous avons dégagé les pistes de recherche suivantes, traitées dans la suite de ce chapitre :

- exploration du concept de la conception collaborative médiatisée par la maquette virtuelle et non CAO,
- exploration de la possibilité d'ancrer une connaissance située, par l'ajout d'annotations sur la maquette virtuelle [Boujut, 2003, Boujut et Dugdale, 2006],
- exploration du concept de la capitalisation de ces annotations, et donc de l'activité des utilisateurs distants par l'apport d'une base de connaissances dans l'environnement virtuel,
- exploration du mode d'interaction avec les connaissances en environnement

1. Projet de recherche sous la direction de Jean Paul Barthès, financé par la région Picardie
2. Projet CADAU : C.A.D. Across Universities mené par Bruno Ramond à l'UTC (France) et Amir Qamiyah à l'ISU (USA).

virtuel par accès aux annotations et visualisation de celles-ci selon les critères de choix des utilisateurs.

Espace de travail de l'utilisateur Emails, chat, applications utilisées	Espace de travail collaboratif Informations sur le projet, gestion du projet
Informations proposées par l'agent Réactions de l'agent : l'agent détecte des tâches, offre de l'aide durant le projet et capitalise les connaissances en même temps	Espace de dialogue Questions-Réponses entre l'agent et l'utilisateur

TABLE 3.1 – Exemple des réactions de l'utilisateur et de l'agent sur un problème spécifique de consultation en conception collaborative [Thouvenin *et al.*, 2002]

Afin de visualiser le modèle CAO dans un environnement permettant la manipulation temps réel de la maquette virtuelle, nous avons ensuite cherché à réaliser un environnement virtuel permettant d'annoter (annotations 3D) cette maquette et d'inscrire les annotations dans une base de connaissances à travers une ontologie de concepts liée directement au projet AACC.

2.2 Ce qui se conçoit bien se modélise en 3D

Nous nous sommes intéressés à un environnement de conception permettant l'annotation de la maquette virtuelle en cours de conception [Aubry *et al.*, 2005a]. Ces annotations sont de nature variées (multimédia) et supportent le transfert des intentions du concepteur lors de la communication du projet à l'ingénieur. Mais parlons ici de la maquette 3D elle-même, porteuse de connaissances géométriques et mécaniques par sa seule origine : le modèle CAO. La recherche sur la modélisation en 3D a émergé au milieu des années 60. Basée sur des théories comme les r-ensembles c'est-à-dire des sous ensembles bornés, fermés, réguliers et semi-analytiques de l'espace Euclidien 3D. Ce sont des polyèdres topologiques qui peuvent avoir des trous, incluent des objets dont les côtés sont partagés par plus de deux faces et d'autres ensembles dont les frontières ne sont pas des surfaces au sens mathématique du terme. Les modèles CAO de représentation des objets sont décrits dans l'excellent ouvrage de Jean Claude Léon [3] (courbes et surfaces mathématiques CAO et CFAO). On reconnait deux grandes familles de représentation de ces objets [Mortensen, 1985], qui sont des représentations profondes et détaillées :

- les représentations volumiques,
- les représentations par les frontières.

Les représentations volumiques décrivent l'objet comme combinaison de primitives volumiques ; elles comprennent des modèles de décomposition liés à la représentation de l'espace comme l'octree, la CSG (constructive solid geometry), les voxels ou éléments de volume, et les cellules entre autres.

3. Modélisation et construction de surfaces pour la CFAO, Jean Claude Léon, Editions Hermes

Les représentations par les frontières décrivent les solides par la surface qui les englobe, et les informations sur la façon dont les surfaces sont cousues entre elles. On considère un volume comme une surface fermée. comme par exemple, dans la BR (Boundary Representation) ou encore B-rep. D'autres représentations viennent des courbes comme les courbes de Bézier [Demengel et Pouget, 1998]. On parle alors de surfaces Bézier, de surfaces de Coons, de surfaces B-splines, de surfaces NURBS.

Une autre classification est celle des modèles topologiques qui rendent compte des relations d'adjacence, et sont utilisées en modélisation géométrique surtout avec la B-rep. Les modèles non Euleriens (non manifold) s'appliquent à B-rep et à CSG. Le but est de réaliser des modèles géométriques unifiés, c'est-à-dire de modéliser de manière similaire des objets 3D, 2D.

Enfin les modèles à balayage (CAO) permettent de décrire un objet en déplaçant une surface le long d'une trajectoire. Il existe trois types de balayage : simple, hybride et généralisé. En modélisation CAO, on utilise les avantages de plusieurs modèles, d'où les modèles hybrides.

Il faut ajouter à cette description déjà complexe de l'objet 3D l'immense richesse de la modélisation du point de vue mécanique avec les contraintes de positionnement et d'assemblage. On obtient ainsi une arborescence profonde qui est en soi une représentation des connaissances spécifiques à un métier.

De la maquette CAO à la maquette virtuelle [Bourdot *et al.*, 2006], nous pourrions dire qu'il n'y a qu'un pas numérique correspondant aux transferts de fichier, facilités aujourd'hui par le formalisme 3DXML. L'introduction de la réalité virtuelle dans le cycle de conception présente de nombreux avantages (multiplication des choix possibles, mise en scène des produits dans différents environnements...) [Fuchs 06], et trouve de plus en plus sa place dans le processus de conception.

La maquette virtuelle est aujourd'hui largement exploitée dans l'industrie avec le logiciel CATIA de la société Dassault Systemes [Dassault, 2006], particulièrement l'industrie automobile et les projets fédérateurs autour de cette notion ont permis un saut à la fois scientifique et technologique dans ce domaine. Citons les projets PERF-RV [PERFRV, 2004], puis PERF-RV2 [PERFRV2, 2008], les réseaux d'excellence européen comme Intuition [Intuition, 2004]. Cependant un problème majeur, celui de la capitalisation des connaissances concernant la collaboration au cours du processus de conception n'est pas encore résolu. C'est pourquoi nous avons proposé le concept d'annotations 3D directement ancrées sur la maquette virtuelle.

2.3 L'intégration d'annotations 3D dans un EVI

Le travail effectué dans le cadre de la thèse de Stéphane Aubry, co-encadrée par Dominique Lenne [Lenne *et al.*, 2008] et nous-même, se base sur les travaux existants dans le domaine de l'ingénierie ontologique. D'un point de vue de l'utilisation de l'ontologie, l'étude bibliographique montre que la mise en œuvre d'une ontologie pour supporter la conception collaborative est une approche répandue [Garcia *et al.*, 2004, Yoshioka *et al.*, 2004, Kitamura *et al.*, 2002] plus spécifiquement dans le cadre de l'utilisation d'une ontologie comme support de la capitalisation des échanges effectués. D'un point de vue de la conception de notre ontologie, nos travaux s'inspirent des différentes principes et méthodes [Psyché *et al.*, 2003] existants, en retenant notre attention plus spécifiquement sur OntoSpec [Kassel, 2002], du fait

de sa simplicité de mise en œuvre et de sa polyvalence.

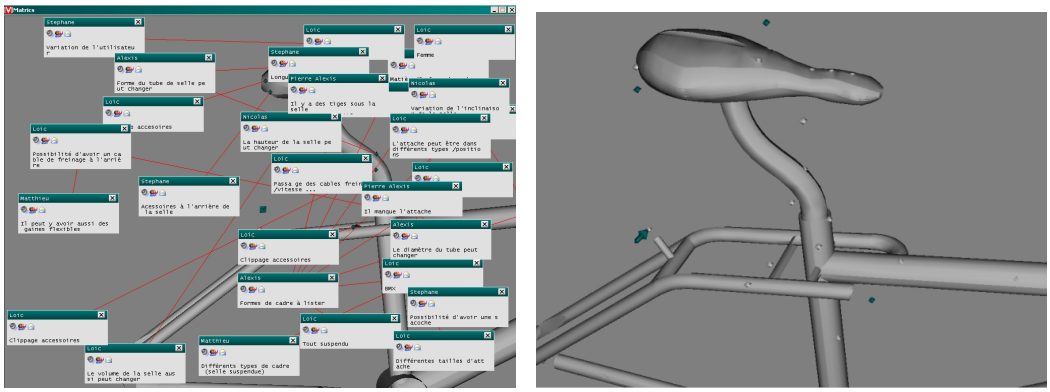


FIGURE 3.1 – Le cadre de vélo annoté en affichant le texte des annotations (à gauche) et en ne montrant que les ancres (à droite)

Le but du modèle de connaissances qui a été développé est, en reliant les annotations (Figure 3.1) aux concepts pertinents, de donner une information structurée (sur laquelle on peut réaliser des mises en relations) sur le contenu des annotations [Aubry *et al.*, 2007, Aubry, 2007].

2.4 Le Modèle de gestion des connaissances associé aux annotations 3D

Ce modèle de connaissance [Aubry *et al.*, 2005b] contient les concepts liés à la fois au produit, et à son utilisation : matériau, fonctions, résistance, utilisation, etc. Deux méthodes permettent de relier les annotations à un concept dans l'éditeur d'annotations, il est possible d'enclencher un processus de reconnaissance automatisée des concepts potentiellement pertinents par rapport à l'annotation actuelle (figure 3.2). L'algorithme utilisé pour trouver les concepts pertinents est actuellement très simple (comparaison mot à mot). Il est aussi possible de recourir à une reconnaissance textuelle

Une autre méthode est la navigation dans les concepts au travers d'une interface 2D (figure 3.3).

Une fois que l'utilisateur à choisi le concept qui lui paraît pertinent, il pourra le lier à l'annotation courante et retourner à l'éditeur d'annotations par les options disponibles dans la barre d'outils.

2.5 L' environnement MATRICS

L'environnement MATRICS [Aubry, 2007] (Managing Annotations for Training in an Immersive Collaborative System) conçu dans ce projet de recherche est un environnement virtuel permettant de :

- visualiser et manipuler des objets virtuels en 3D,
- créer des annotations 3D,
- modifier ces annotations,
- relire ces annotations en navigant dans la hiérarchie de concepts.

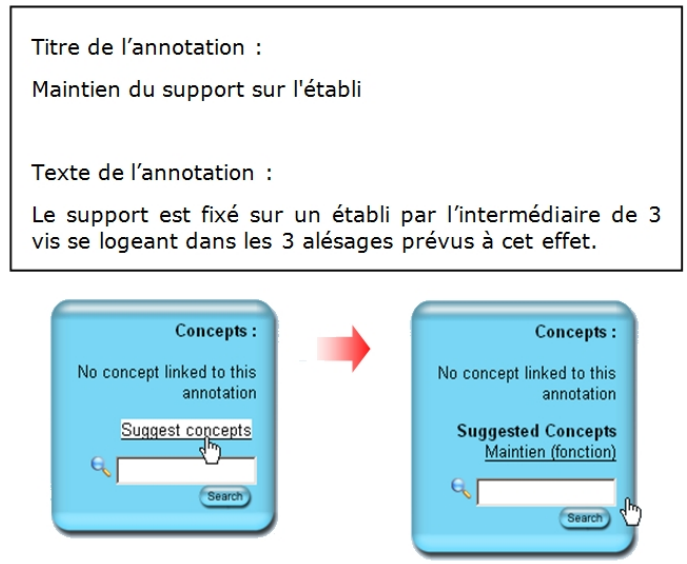


FIGURE 3.2 – Suggestion automatique de concepts dans l'éditeur d'annotations

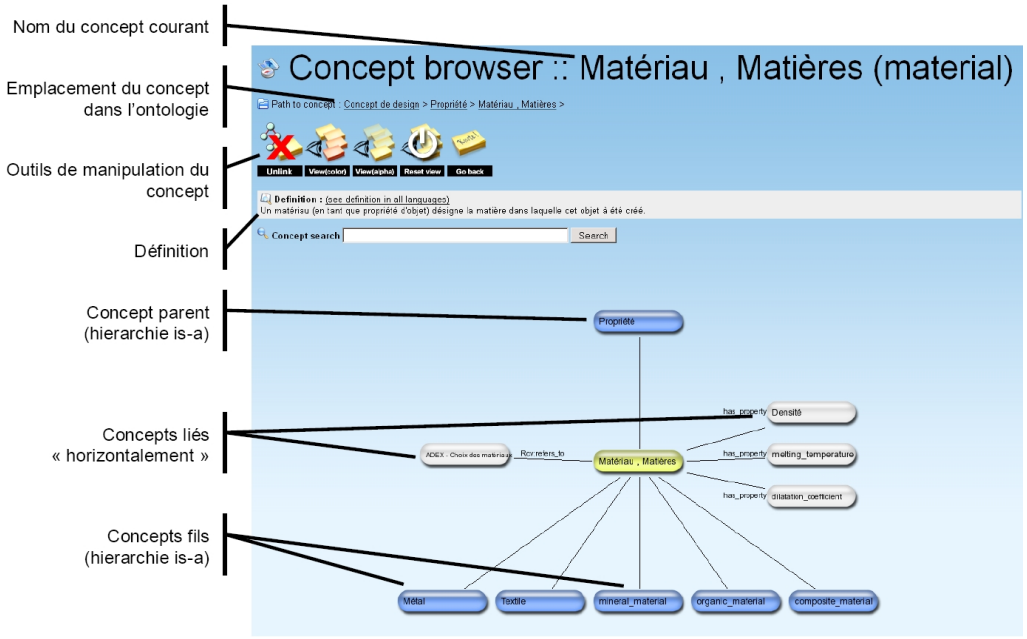


FIGURE 3.3 – Deck 2D - Le Concept Browser

L'environnement Matrics à la spécificité d'être réparti sur deux interfaces : l'environnement 3D, basé sur le logiciel de création d'environnements 3D Virtools de Dassault Système [4] qui affiche le produit, les ancres de l'annotation, ainsi que leur titre, et sur un environnement 2D de gestion des connaissances, avec un affichage sur le « Deck » 2D, qui permet d'accéder aux détails de l'annotation (Figure 3.4 et 3.5).

4. Virtools (http ://www.virtools.com/) est un moteur 3D utilisé dans l'industrie pour les applications de réalité virtuelle. A l'UTC, les étudiants ingénieurs l'utilisent dans le cours de réalité virtuelle ainsi que dans les projets de recherche pour une meilleure modularité.

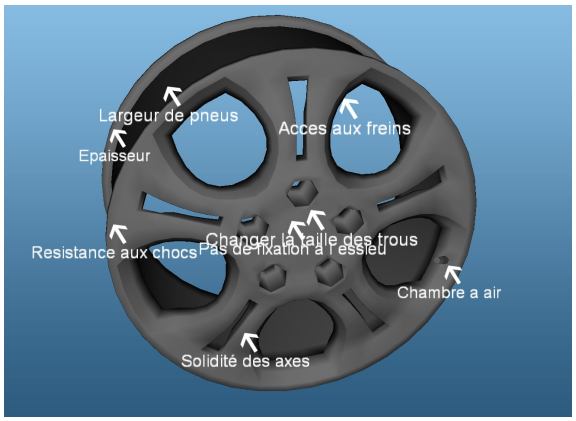


FIGURE 3.4 – L'environnement d'annotations 3D MATRICS

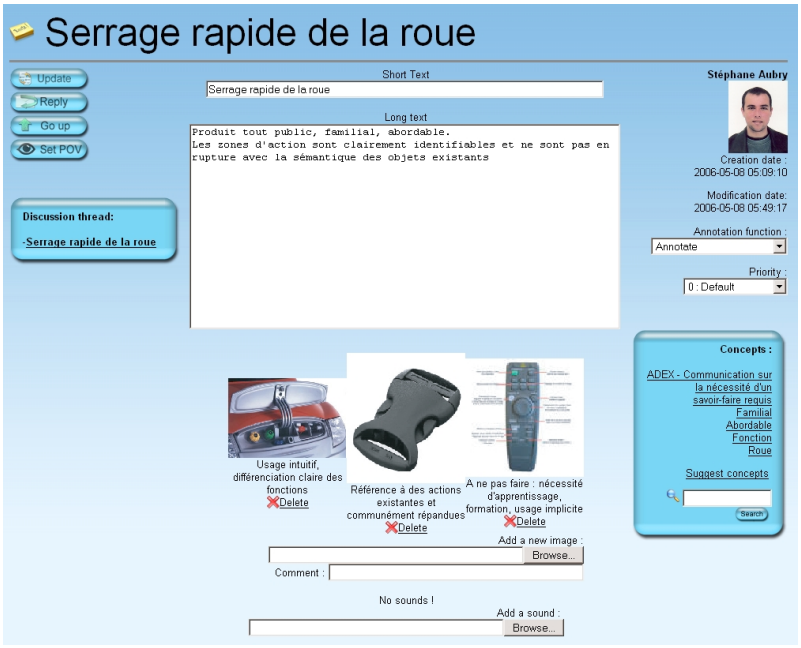


FIGURE 3.5 – Contenu d'une annotation 3D dans l'environnement Matrics

Ces annotations sont de nature variées (multimédia) et supportent le transfert des intentions du designer lors de la communication du projet à l'ingénieur. Un autre aspect de cet environnement est de permettre une visualisation partagée des connaissances autour de la maquette et l'interaction des utilisateurs dans un contexte de représentation intuitif du système ce qui augmente le niveau de collaboration dans la conception.

2.6 Architecture de l'environnement MATRICS

L'environnement MATRICS possèdent une architecture client/serveur que nous allons détailler ci-dessous. Composants côté serveur :

- **une base de données** gère l'ensemble des données (hormis certains fichiers) stockées dans les projets sous Matrics.
- **Matricslib** est une libraire permettant de manipuler les différentes entités gérées par la base de données.

- **le serveur Matrics** est un ensemble de fonctions permettant d'accéder au serveur depuis les logiciels clients.
- **le serveur « Deck 2D »** donne une interface Web pour l'édition des détails de l'annotation.
- **la passerelle OWL** permet la mise à jour de l'ontologie stockée sur la base de données à partir d'ontologies OWL.

Composants côté client :

- **le client « Deck 2D »** est un client Web qui permet la visualisation des pages générées par le serveur « Deck 2D ».
- **le client 3D**, quant à lui, permet une visualisation du produit dans l'environnement 3D, ainsi que des annotations, qui sont contextualisées par rapport à ce produit.

La figure 3.6 résume les relations existant entre les différents composants de notre environnement.

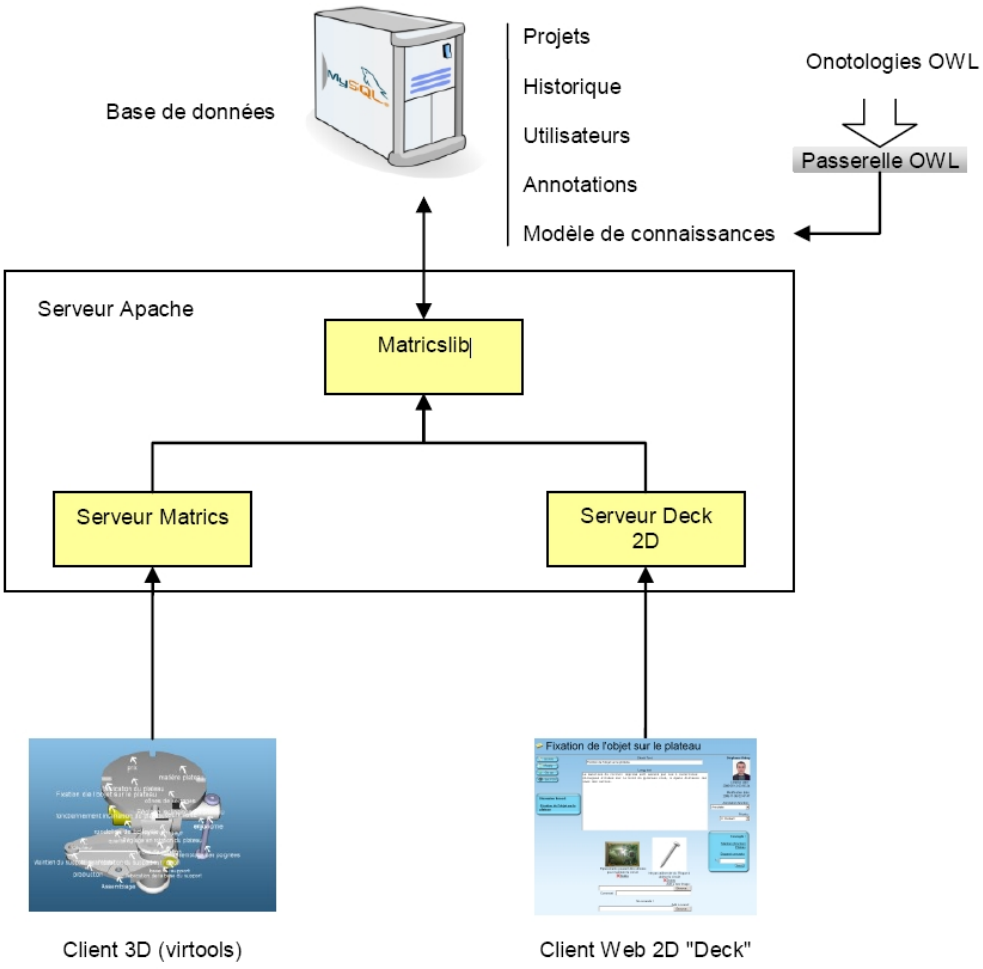


FIGURE 3.6 – Architecture de l'environnement Matrics

De nombreuses possibilités sont proposées dans MATRICS. Basé sur le logiciel de création d'environnement 3D Virtools (Dassault Systèmes), la visualisation 3D temps réel et les fonctionnalités classiques de l'environnement virtuel sont directement offertes. L'interface « user friendly » permet à des non informaticiens

(designers, mécaniciens) de modifier rapidement cette application.

2.7 Conclusion

A travers cette étude nous avons pu concevoir un modèle d'annotations 3D, et un environnement informatique d'annotations 3D (MATRICS). Notre apport dans ce travail est non seulement de structurer les connaissances mais aussi d'apporter une nouvelle possibilité : collaborer en ayant spatialement la capacité d'ancrer des annotations dans la maquette, afin d'en jouer, de les relire en ayant accès aux objets 3D et aux concepts correspondant à la collaboration.

Par ces rapprochements entre modèle 3D et annotations pour la conception collaborative, notre propos est de mettre en lumière une rencontre entre les aspects fondamentaux de la CAO et les développements originaux et encore peu connus de la réalité virtuelle, prenant pied sur des territoires qui semblaient à priori distants comme l'ingénierie des connaissances et l'interaction temps réel.

Une prochaine étape est l'évolution de la hiérarchie de concepts permettant de structurer les annotations 3D afin de rendre possible une exploitation de ces annotations. Cette hiérarchie est réalisée pour l'instant à l'aide d'une ontologie formelle par le concepteur de la plateforme. Une autre approche permettrait de créer de façon plus souple, voire évolutive, cette hiérarchie et d'offrir ainsi aux utilisateurs la possibilité d'enrichir leur interaction avec l'EVI MATRICS.

Le principe est de pouvoir générer [Bourbeillon *et al.*, 2005] un document de synthèse spécifique et pertinent, grâce aux techniques de système d'information adaptatif. « L'adaptation à l'utilisateur et la tâche sont des problématiques centrales de la personnalisation ». Elle s'appuie notamment sur une ontologie de domaine et de tâche.

Une autre étape sera d'explorer l'interaction 3D immersive, d'apporter une approche multimodale et d'intégrer la notion d'énaction par un EVI possédant une base de connaissance capable d'évoluer.

3 Se former par l'interaction en EVI : le projet RVPI

3.1 Expérience et formation par la réalité virtuelle

La démarche d'ensemble dans la formation par la réalité virtuelle peut se définir selon trois axes principaux :

- **modèle du simulateur de geste technique :** expérience sensorielle, la représentation de l'action de l'humain est instrumentée par des retours sensoriels, lui permettant de vivre une expérience dans le monde virtuel et de se confronter aux difficultés dans l'espace, le temps et les contraintes d'un nouveau système, il acquiert une expertise sur un système précis avant même de l'utiliser dans le monde réel, il vit une expérience d'essais-erreurs lui permettant d'améliorer ses performances physiques et de percevoir son corps dans l'interaction avec un système mixte (réel-virtuel).
- **modèle du serious game :** expérience cognitive, l'humain agit à l'intérieur d'un scénario, il a un but et doit se concentrer sur la réalisation de tâches dans

un contexte exigeant, il est entouré d'autres personnages réels ou virtuels, il est aidé dans ses tâches par des éléments représentés dans le monde, il reçoit des récompenses et des retours positifs ou négatifs sur ses actions, il vit une expérience sur la durée et sur des épreuves prédéfinies, et améliore ses performances cognitives.

– **modèle du simulateur de vol :** expérience sensorielle et cognitive, l'humain est sensibilisé à la machine, au comportement du système et intègre peu à peu le fonctionnement mécanique, électronique, logique, d'une machine en tenant compte des critères de sécurité et de qualité. L'humain vit une expérience relativement à une machine, et se perçoit comme agissant sur cette machine afin de la maîtriser.

L'expérience est dans chaque modèle au cœur du mode d'apprentissage. Comme le dit J. A. Waterworth [Waterworth, 2002], « ...il y a en réalité trois domaines de conception de l'IHM [interface homme-machine] dans la RV comme pure expérience corporelle ; deuxièmement, la RV comme une ou plusieurs représentations de la connaissance abstraite, et troisièmement, la RV comme lien entre le corporel et l'abstrait. Le travail dans la conception de la RV s'est concentré en particulier sur le premier de ces domaines ; c'est le modèle standard de la RV pour la plupart des applications courantes, comme les jeux, la visualisation médicale et les simulations architecturales ».

Le modèle du simulateur de geste technique est centré sur une expérience corporelle, celui du serious game est orienté vers les représentations de la connaissance abstraite, et celui du simulateur de vol relie expérience corporelle et représentation de la connaissance abstraite.

Le principe est de proposer au formé, outre la formation classique sous forme de « visite guidée », un apprentissage progressif, via des interactions multiples perçues comme « libres » par l'utilisateur, pour aboutir à une capitalisation des connaissances, par accumulation des interactions pertinentes. La proposition que nous formulons est celle d'une réalité virtuelle qui permet de choisir les modalités de l'expérience dans le monde virtuel.

3.2 Enjeux du projet industriel RVPI

Le sigle RVPI signifie Réalité Virtuelle pour la Production Industrielle. C'est un projet de transfert technologique [5] réalisé par l'UTC (Université de Technologie Compiègne - 60 - France) pour l'usine Continental SNC France de Clairoix (60 - France) appartenant au groupe Continental AG. Il a été soutenu par le Conseil Régional de Picardie. Ce projet a pour but de proposer un nouvel environnement de formation aux opérateurs pour la confection de pneumatiques sur une nouvelle machine.

Cette nouvelle machine « PU15Sb » sert à assembler les différents composants d'un pneu. La technologie et le process de cette machine ont été développés par Continental et lui appartiennent. Elle représentera 70% de la production de l'usine horizon 2010.

Comme tout projet de formation par la réalité virtuelle, le système RVPI permet

5. Pour des raisons de confidentialité, le sujet est volontairement centré sur les apports de la réalité virtuelle sans dévoiler le processus de fabrication des pneumatiques du groupe Continental.

à l'industriel de diminuer le coût complet de la formation, qui a lieu sans impact sur la production réelle. L'enjeu de ce projet de recherche appliquée est triple :

1. sécuriser le formé dans un contexte d'opérateurs stressés par l'apprentissage d'un nouvel outil industriel,
2. multiplier les expériences pour l'utilisateur, dans l'esprit d'une formation progressive et adaptable aux différents niveaux d'expérience des opérateurs,
3. permettre de « voir ce qui est invisible » pour permettre un apprentissage « en profondeur ».

Ce projet a obtenu le prix Imagina 2008 « best performance » catégorie industrie [6].

3.3 Apport scientifiques et techniques du projet RVPI

Un environnement virtuel en 3D (figure 3.7) permet de visualiser et d'interagir avec une machine dont le comportement est simulé en partie. Un premier module permet d'appréhender le mode opératoire. Des scénarios de pannes et dysfonctionnements sont proposés au formateur qui peut ainsi créer des séquences de formation interactives. Des cahiers pédagogiques sont associés au simulateur afin de permettre une progression dans cette formation par la réalité virtuelle.

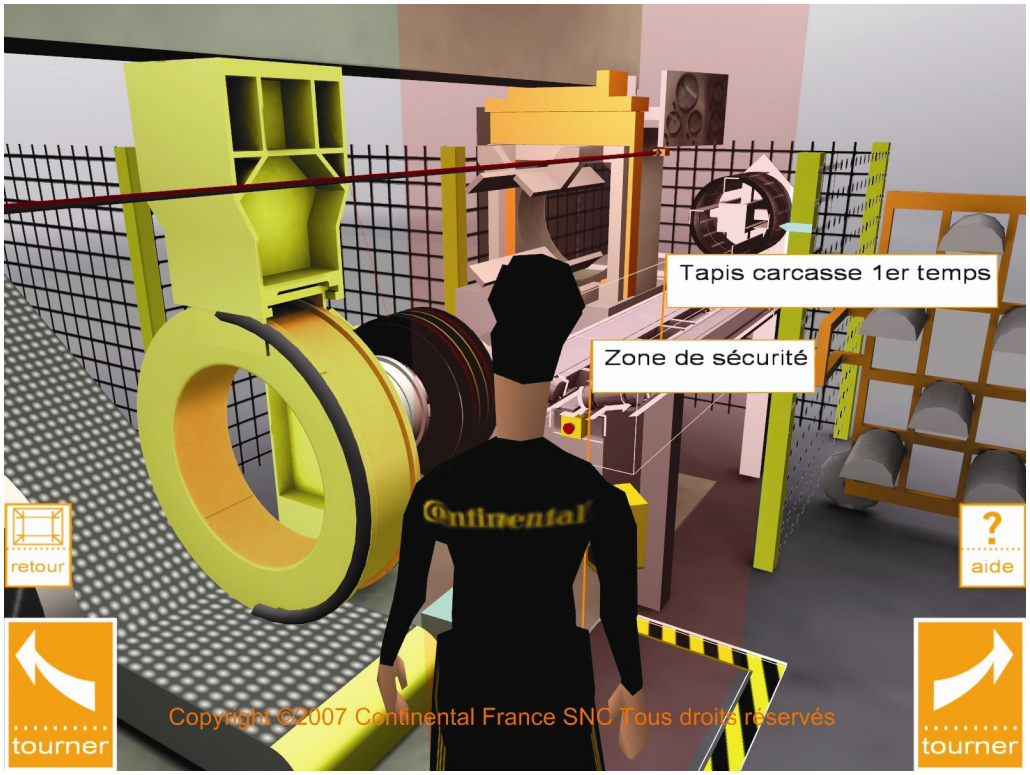


FIGURE 3.7 – Le simulateur RVPI

L'environnement RVPI a plusieurs caractéristiques clefs :

6. Le projet RVPI (Réalité Virtuelle pour la Production Industrielle), issu d'une collaboration entre l'unité mixte de recherche UTC/CNRS Heudiasyc et l'usine Continental France SNC de Clairoix (60), a remporté le 31 janvier 2008 le prix de « la meilleure performance » catégorie Industrie au salon Imagina 2008 à Monaco, le rendez-vous des industriels de la 3D en Europe. http ://www2.hds.utc.fr/RVPI/

- les possibilités de simulation de RVPI permettent d'aborder les diagnostics de pannes, les dysfonctionnements du pupitre, les réglages délicats et leurs conséquences, y compris avec la possibilité de revenir sur des erreurs (sans impact sur la production réelle) ;
- la plateforme RVPI permet d'aborder les spécificités des différentes versions de la machine (y compris internationalement) et d'être confronté y compris aux incidents exceptionnels ;
- la plateforme RVPI permet de « voir ce qui est invisible » : organes complexes de la machine, décomposition du process, accès aux zones dangereuses, informations sur la sécurité et la qualité. L'expertise métier est ainsi capitalisée et restituée plus simplement et plus efficacement au formé qui peut alors se concentrer sur un aspect particulier de la formation.

Ces caractéristiques clefs permettent de « sécuriser le formé », tout en le guidant progressivement vers une connaissance approfondie et maitrisée de la nouvelle machine

3.4 Gestion de l'interaction dans RVPI

Cette visite virtuelle comprend deux sous-parties, une visite guidée et une visite libre. La première permet de suivre un parcours autour de la machine et de passer en revue l'ensemble de ses composants. La seconde laisse libre choix de ses mouvements à l'utilisateur : il peut ainsi revenir sur certains points (figure 3.8).

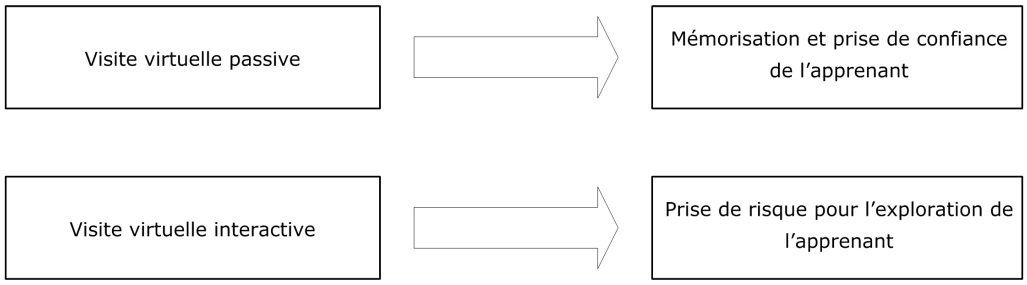


FIGURE 3.8 – Visite virtuelle passive et interactive

Dans notre cas, l'utilisateur a accès à plusieurs points de vue prédéfinis. Durant les deux séances de visites virtuelles il a accès à des données relevant de la qualité et de la sécurité (figure 3.9).

La conception du simulateur peut se résumer ainsi que la figure 3.10 le montre.

3.5 Conclusion

Un projet comme le projet RVPI est intéressant à plus d'un titre. On peut ainsi fournir une base d'analyse très intéressante pour l'évaluation des hypothèses de recherche mobilisées lors du projet : la formation par la réalité virtuelle, la création de mondes virtuels pour des applications industrielles ou « serious games », l'exploration des connaissances par interaction avec des objets virtuels, autant de domaines de recherche que ce projet a permis d'aborder.

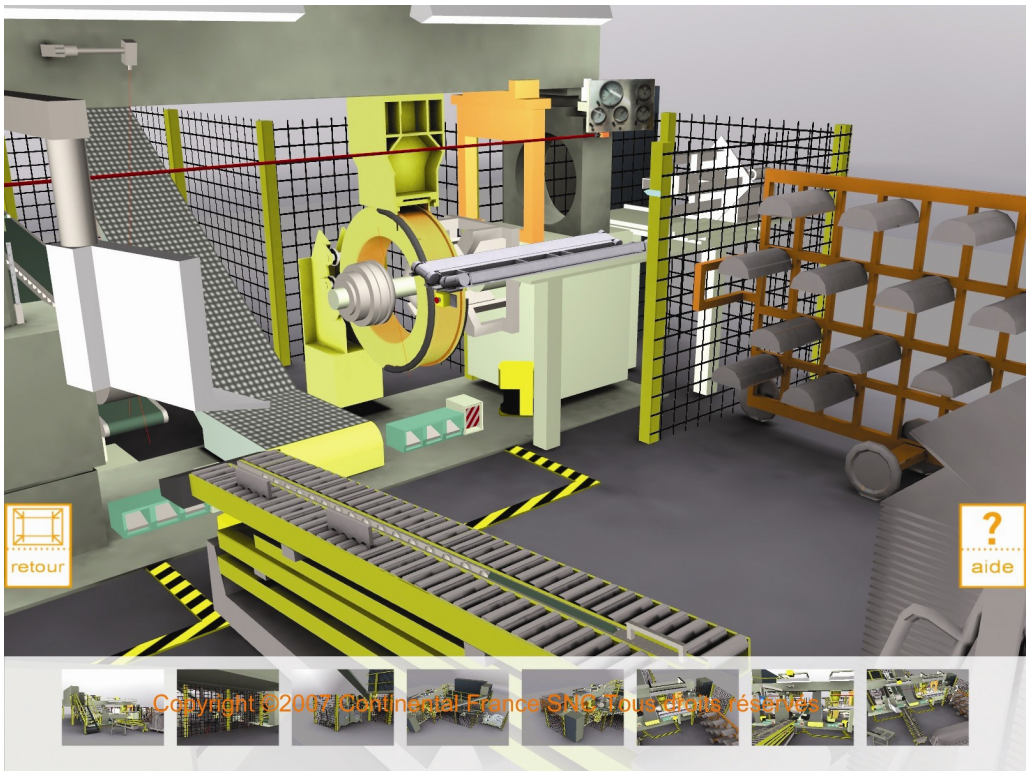


FIGURE 3.9 – Visite virtuelle dans le simulateur RVPI

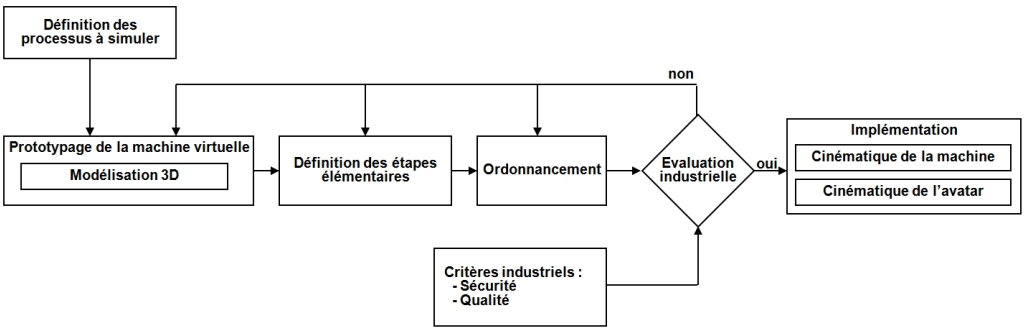


FIGURE 3.10 – Méthodologie de conception [Olive *et al.*, 2006]

3.6 Création de la start-up Reviatech

La création de la start up Reviatech [7] est une suite de ce projet mêlant recherche et développement. Cette entreprise sera en effet en mesure de réaliser des simulateurs de formation dont le contenu pourra directement être modifié par les formateurs. Cette start-up s'appuie sur une nouvelle technologie, s'affranchissant du logiciel Virtools. Toutefois il n'est pas encore possible de capitaliser les connaissances in Virtuo par ce système, d'où l'idée du projet suivant.

7. Reviatech est une start up issue des activités de recherche du laboratoire Heudiasyc de l'UTC, à travers le projet RVPI. La technologie développée par Reviatech est entièrement nouvelle, les créateurs de l'entreprise, Mehdi Sabouni et Romain Lelong sont d'anciens étudiants de l'UTC qui ont repensé l'outil de formation par la réalité virtuelle. http ://www.reviatech.com/

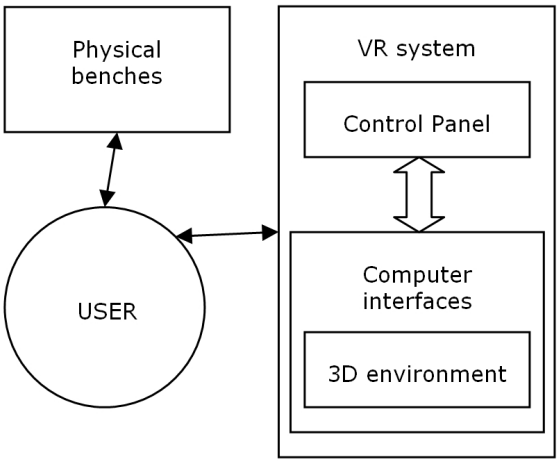


FIGURE 3.11 – VR manufacturing tool

4 L'apprentissage par la capitalisation des connaissances gestuelles : projet PTOLEMEE

4.1 Objectif

A la suite du projet de recherche MATRICS sur les annotations 3D, nous nous intéressons à une forme de connaissance plus empirique : celle du geste. Les travaux de Cadoz [Cadoz 94] proposent une typologie du geste qui distingue trois fonctions possibles : sémiotique, épistémique et ergotique. La fonction sémiotique permet d'envoyer des informations à l'environnement comme le fait le chef d'orchestre ou comme par la communication non verbale. La fonction épistémique permet de recevoir l'information à partir de notre environnement : par exemple toucher une surface, sentir la chaleur. Enfin la fonction ergotique intervient lorsque l'on a une action matérielle sur l'environnement, c'est-à-dire lorsque l'on a une interaction mécanique avec un objet. De nombreuses approches du geste comme connaissance font apparaître des grilles de lecture différentes :

- geste technique vu comme copie exacte d'un geste « expert » [Crison *et al.*, 2005],
- geste artistique demandant un réglage permanent et un ressenti [Schiller, 2006],
- geste sportif lié à une performance [Benguigui *et al.*, 2005].

Ces approches ne prennent cependant pas en compte un paramètre important : la mémoire du geste dans l'environnement virtuel, de façon à proposer un apprentissage à l'utilisateur. Nous nous sommes intéressés à un EVI capable d'enregistrer le geste, réalisé par un « expert » en général et de l'afficher pour un « novice ». Les annotations gestuelles (thèse de doctorat de Jérôme Olive) permettent d'ancrer cette connaissance dans l'EVI sans stocker toutes les informations comme en vidéo indexée ou en « motion capture » (capture du mouvement).

Le geste inclut la notion de temps, non présente dans les formes d'annotations 3D. Cette notion est essentielle pour exprimer le mouvement et sa dynamique. La question qui se pose alors est d'inscrire la trace de l'activité gestuelle dans l'EVI.

4.2 Vers un modèle d'annotation gestuelle

Nous proposons [Olive *et al.*, 2007] d'augmenter le modèle d'annotations 3D avec la notion de temps et la notion de spatialisation. Cette évolution du modèle nous permet de capitaliser des données telles que la position dans l'espace 3D de l'objet ou de l'utilisateur.

Dans le cas de la maintenance, nous considérons le geste technique et sa capitalisation par la sauvegarde des manipulations d'objets virtuels et des mouvements de l'utilisateur. Ces données sont considérées comme des annotations propres et sont liés à une ontologie de gestes. Ce n'est pas le geste qui est annoté mais c'est bien l'annotation qui contient le geste. La navigation dans une base de concepts permettra d'exploiter les annotations.

4.3 Processus d'annotation

Durant l'annotation de la maquette virtuelle, l'utilisateur effectue une série de mouvements décomposés en « parties de mouvements » et en points de vue. Le chemin cognitif est alors capitalisé sous forme d'annotations gestuelles intégrant les points de vue.

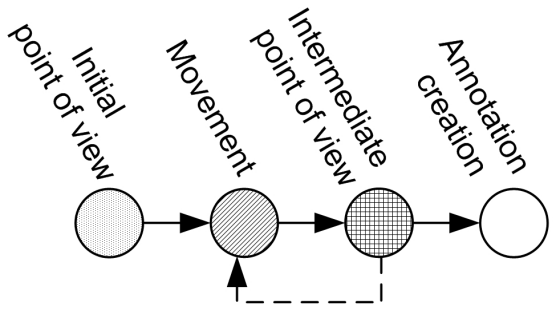


FIGURE 3.12 – Processus d'annotation 3D [Olive et Thouvenin, 2008]

Après navigation autour de la maquette virtuelle, l'utilisateur sélectionne les objets à annoter. Soit il manipule l'objet, soit il annote avec les médias classiques (son, texte, image, vidéo...).

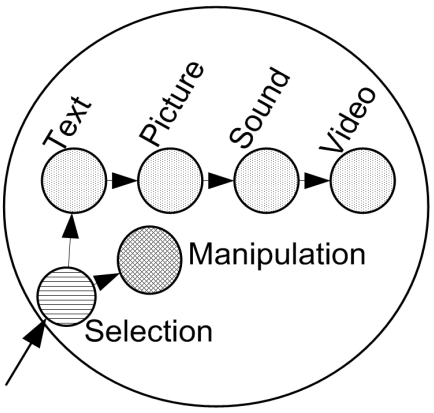


FIGURE 3.13 – Création des annotation 3D [Olive et Thouvenin, 2008]

4.4 Capitalisation de l'annotation gestuelle

Grace à un système de reconnaissance, nous pouvons donner une signification au geste : un réseau de neurones est capable de différentier un geste nouveau d'un geste préexistant. Le système retourne alors le nom du geste qui est référencé dans une base. Au final nous utilisons les résultats des travaux de recherche en chorégraphie, discipline qui transcrit les gestes des danseurs par un langage, comme celui de Laban [von Laban, 1971] ou Sutton [Sutton, 1977]. La représentation que nous proposons utilise un système d'ancres animées, permettant de rendre compte des interactions, actions et gestes dans l'environnement virtuel.

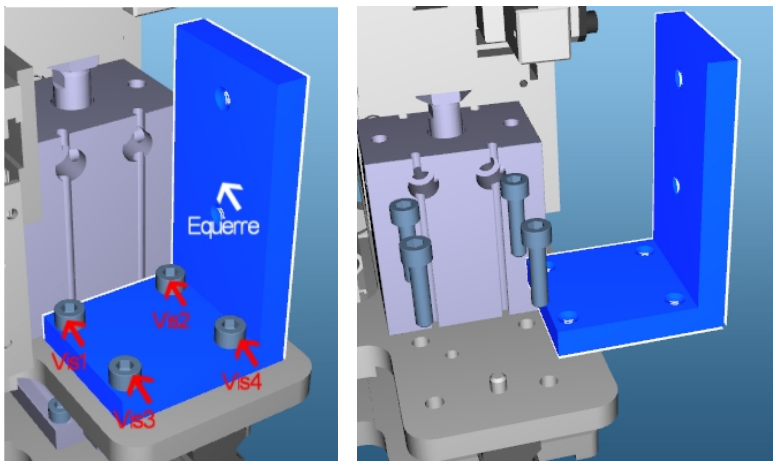


FIGURE 3.14 – Lecture des annotations gestuelles [Olive et Thouvenin, 2008]

5 Conclusion

Le geste est pour nous une connaissance empirique à l'inverse des connaissances symboliques manipulées classiquement par l'ingénierie des connaissances. Une des difficultés est donc d'organiser des gestes différents et de les inscrire dans l'environnement virtuel : il s'agit alors d'une logique d'écriture. Une autre difficulté consiste à exploiter ces connaissances dans le même environnement : il s'agit alors d'une logique de lecture.

Les perspectives d'un tel travail sont de donner de l'autonomie aux annotations, de présenter automatiquement l'animation des ancres, de rejouer de façon adaptative les manipulations et la navigation et enfin d'évoquer les annotations « voisines » du point de vue de la sémantique du geste.

Il existe des parallèles intéressants entre cette logique d'écriture et de lecture, et la dimension de l'exploitation des connaissances à travers l'EVI. S'agit-il d'accéder à une connaissance spécifique ou de « feuilleter » l'environnement ? Est-ce l'utilisateur ou le système qui fait la recherche et qui doit donc connaître le terrain ? A travers des expériences corporelles précises, la correspondance entre les dimensions d'exploitation et la construction d'une connaissance par la perception s'oriente clairement vers la question de la capitalisation des connaissances dans l'EVI afin d'affiner la boucle d'interaction entre l'utilisateur et le système. C'est le sujet que nous abordons dans le chapitre 4.

Chapitre 4

Connaissance pour interagir en EV

1 Introduction

Dans cette partie nous nous intéressons à la possibilité de nous baser sur des connaissances afin d'interagir en EVI : connaissances sur les gestes des utilisateurs ou sur leur activité, connaissance de l'espace et du temps pour une navigation en réalité augmentée. Les EVI seront ainsi conçus avec des modèles à base de connaissances sur lesquelles il sera possible d'effectuer des raisonnements ou du calcul. Ils contiendront en outre des supports d'inscription des connaissances, telles des métaphores de visualisation ou d'interaction permettant la construction de connaissances par le couplage perception-action entre l'humain et le système.

Pour le concepteur, il s'agit de représenter les connaissances avant de permettre une interaction en EVI. Dans cette partie, on ne s'intéressera pas à la sémantique des objets virtuels ou au sens que peuvent avoir les interaction, mais plutôt à la connaissance qui pré-existe au départ. Le système possède donc en quelque sorte de quoi « comprendre » ce que fait l'utilisateur.

Nos recherches ont porté sur deux axes :

- l'intégration des connaissances pour communiquer en environnement virtuel : projet VIRSTORIA,
- l'intégration de référents perceptifs de l'utilisateur pour une perception médiée par l'EV : projet Abbaye St Corneille.

2 Connaissance pour communiquer en environnement virtuel

La recherche sur les environnements virtuels collaboratifs explore les possibilités de travailler, de comprendre, d'échanger des informations à travers une médiation par des avatars, des personnages virtuels ou des modes de visualisation partagés.

2.1 Collaborer et participer à l'aide de la réalité virtuelle

Une première approche de l'utilisation de la réalité virtuelle pour l'aide à la collaboration est l'utilisation de dispositifs permettant la visualisation collective de

données pour la collaboration présentielle [Hachet *et al.*, 2003a] en particulier pour des réunions impliquant un grand nombre de participants.

Le CAT, développé au LaBRI, est une interface créée spécialement pour une utilisation dans un système avec une grande surface d'affichage [Hachet *et al.*, 2003b]. Le système permet une manipulation isométrique en déplacement (adapté au problème de taille de l'affichage) et isotonique en rotation (afin de faciliter la manipulation).

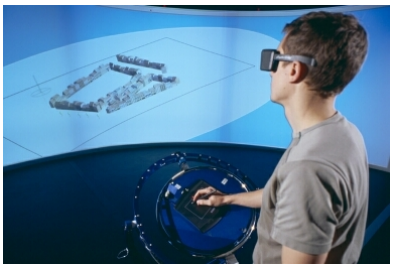


FIGURE 4.1 – Le CAT [Hachet *et al.*, 2003b]

L'utilisation de systèmes tels que des CAVE [Cruz-Neira *et al.*, 1993] ou des murs d'images crée un espace commun de communication [Stewart *et al.*, 1999] permettant aux utilisateurs de disposer de la même perception du projet.



FIGURE 4.2 – Utilisation du CAVE.

Une autre approche consiste à supprimer les périphériques d'interaction avec le système et à proposer à l'utilisateur de manipuler les données directement avec son corps. Dans cet esprit, le HoloWall [Matsushita et Rekimoto, 1997] est un mur de visualisation collective sur lequel les utilisateurs interagissent en le touchant directement. Cette approche permet non seulement de nouvelles interactions, comme l'utilisation simultanée des deux mains (voir figure 4.3 à gauche), mais est aussi par essence multi-utilisateurs (voir figure 4.3 à droite)

Nous nous intéressons non pas à la visualisation partagée d'objets virtuels comme pour CARV (conception assistée par la réalité virtuelle [Bourdot *et al.*, 2006]) mais bien à une perception partagée de la collaboration.

2.2 Métavers, avatars et EVC

Les travaux menés s'inscrivent dans le cadre général de la conception des Environnements Virtuels Collaboratifs (EVC). Grâce à de tels environnements, des personnes distantes géographiquement peuvent rentrer en relation afin de pouvoir coopérer autour d'objets 3D. L'utilisateur est représenté par un personnage synthétique (avatar). A ce titre l'un des enjeux majeurs est de pouvoir assurer, via les avatars,

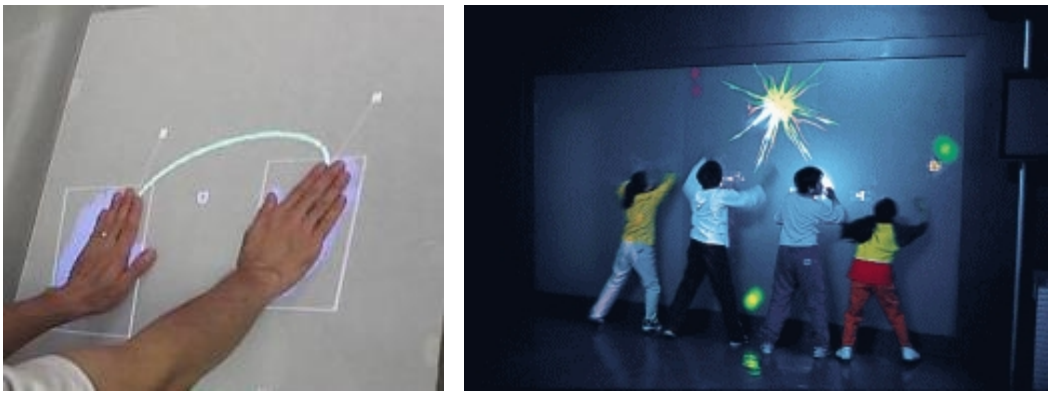


FIGURE 4.3 – Interaction collaborative et directe avec un mur d'images sous le système HoloWall [Matsushita et Rekimoto, 1997].

le comportement non-verbal qui tient une place importante dans la communication inter-personnelle.

Dans l'environnement virtuel collaboratif (EVC) la question est plus centrée sur les interactions permises pour non pas nouer un contact ou rencontrer un être distant, mais bien travailler ou échanger avec lui (elle) autour d'une tâche, d'un objectif ou d'une réalisation.

L'engouement pour ces environnements a connu une forte évolution entre 1990 et 2003 (figure 4.4) avec des objectifs variés comme la conception ou le concurrent engineering. La participation est alors synonyme de représentation des personnes soit par des humains virtuels, soit par des avatars soit encore par des clones.

Définition
Le terme « avatar » vient du sanscrit et signifie « forme ». Dans la religion indoue, on parle des incarnations régulières du dieu Vishnou lorsque le monde est menacé par le chaos (le poisson, la tortue, le sanglier, l'homme-lion, le nain...). En réalité virtuelle l'avatar est une forme qui représente le pointeur, la main, une partie ou la totalité d'un humain virtuel lié à l'utilisateur. Si l'humain virtuel possède le visage de l'utilisateur, alors on parle d'un « clone ».

2.3 Communiquer à distance : de la voix au comportement non verbal

Une des difficultés dans la communication à travers des EVC est de traduire l'état des utilisateurs, leur humeur et leur participation à une activité collaborative. Le canal sonore a été largement exploré et la transmission des signaux se fait par analyse et décomposition d'une part, synthèse et recomposition d'autre part. Un parallèle pourrait être fait avec le geste dans l'activité de communication, c'est-à-dire une partie de la communication non verbale (le reste étant les expressions faciales que nous ne traiterons pas ici).

Aujourd'hui dans le monde, on observe que la communication médiée (téléphonie) fait évoluer les standards acceptables : l'humain s'adapte à une représentation simplifiée de la voix. En communication non verbale dans les EVC la difficulté est du

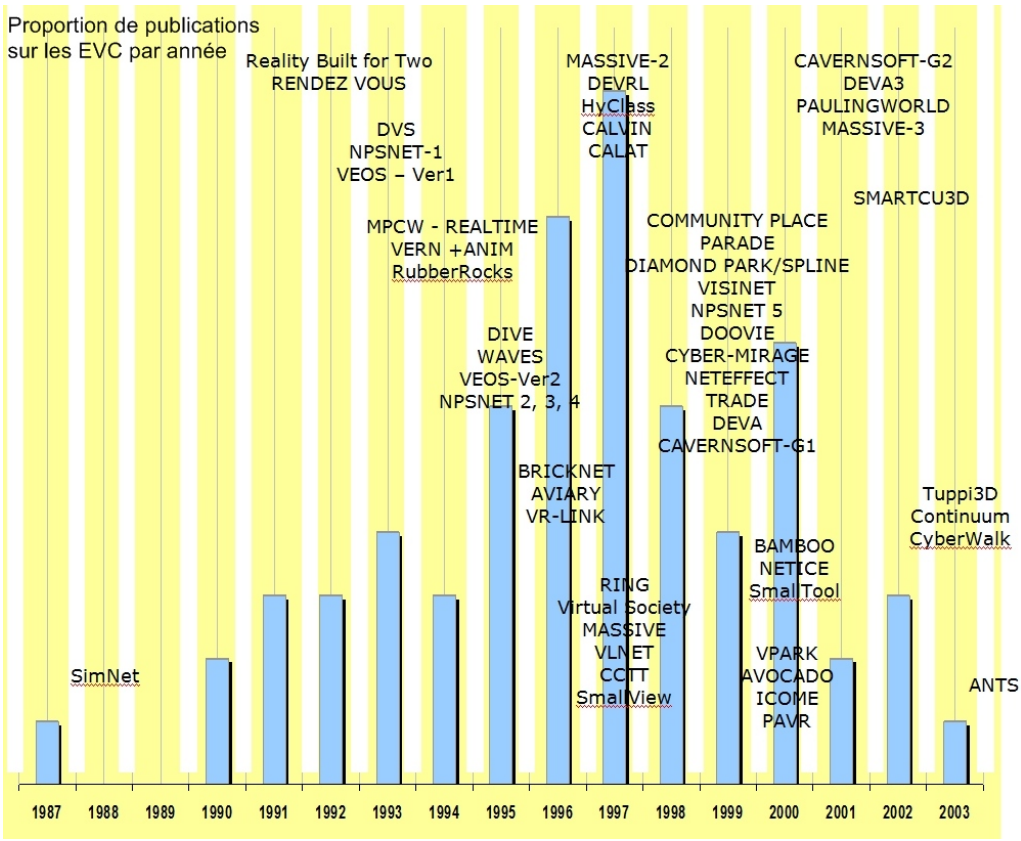


FIGURE 4.4 – Évolution des environnements virtuels collaboratifs (Atman Kendira, thèse de Doctorat 2009)

même ordre : représenter le comportement gestuel de l'avatar est en fait une sorte de compression du comportement de l'utilisateur réel, il s'agit donc de trouver la meilleure efficacité de ce type d'encodage.

L'adaptation cognitive des utilisateurs à cette nouvelle médiation est encore balbutiante, mais l'on peut prédire d'ores et déjà une évolution très rapide comme le montrent les métavers du type Second Life [1] ou équivalents.

2.4 Transmettre des informations à distance sur le geste et l'attitude

Le projet VIRSTORIA présenté ci-dessous correspond à la thèse d'Atman Kendira, codirigée par Laurence Perron (Orange Labs) et nous-même.

Notre approche est de considérer le geste comme connaissance, de le catégoriser et de l'intégrer dans l'EVC. Puis dans une situation de collaboration (raconter une histoire à plusieurs [Kendira *et al.*, 2006a]) de générer, par calcul sur ces connaissances représentées, des animations pour des personnages virtuel ou avatars. La catégorisation a été réalisée entièrement par une spécialiste en ergonomie cognitive [Kendira *et al.*, 2006a, Kendira *et al.*, 2006c, Kendira *et al.*, 2006b] et les résultats ont ensuite été entièrement analysés en composante principale [Kendira *et al.*, 2008].

A partir de cette base de gestes, le système de capture permet de prendre en

1. Seconde Life http ://secondlife.com/ univers persistant de Linden Lab http ://lindenlab.com/



FIGURE 4.5 – Les catégories de gestes en comportement non verbal (Atman Kendira, Laurence Perron, Orange Labs [Kendira *et al.*, 2006c])

compte ce que fait l'utilisateur et de générer des gestes (pré-calculs d'animations). Ces avatars peuvent aider à penser le sens des gestes. L'utilisateur ne voit pas son propre avatar mais ceux des autres. Il ne régule donc pas sa représentation virtuelle et se concentre sur la tâche de collaboration.

2.5 Une approche bayésienne

L'objectif est de concevoir un module comportemental, capable de gérer la représentation de l'utilisateur dans ses interactions avec l'EVC. Le problème est d'une part de déterminer les interactions pertinentes à prendre en compte et d'autre part de les traduire en animations gestuelles pour renforcer la collaboration entre utilisateurs médiée via des avatars. Les connaissances extraites d'un corpus de données d'une part et des entrées dans le système d'autre part, vont être soumises à un calcul probabiliste afin de générer un comportement non verbal des avatars en EV. On rapproche ce type d'environnement des métavers [2] [Hendaoui *et al.*, 2008].

Définition
Un metavers est un monde virtuel dans lequel l'utilisateur peut ou non être représenté par un avatar et rencontrer d'autres personnes à travers leurs avatars.

Le modèle de comportement est conçu de façon à prendre en compte l'incertitude entre faits observés et génération de gestes. Une analyse complète d'un corpus de données (vidéos) a tout d'abord permis de dégager des invariants dans les gestes.

L'originalité de l'approche est d'effectuer un calcul statistique par réseau bayésien sur les données en se basant sur plusieurs modèles (utilisateur, collaboration, etc.). On peut résumer ce modèle de comportement non verbal par :

- une perception issue du système de capture de gestes,
- une décision par approche probabiliste (réseau bayésien),
- une action par génération d'animations pré-calculées ;

2. Le terme de métavers (de l'anglais metaverse c'est à dire méta-univers) provient du roman Snow Crash, en français "Le Samouraï Virtuel", écrit par Neal Stephenson en 1992, et est maintenant largement utilisé pour décrire la vision qui sous-tend les développements en cours sur les univers virtuels 3D totalement immersifs.

2.6 L'application Virstoria

Dans le cadre du projet de conception d'agents autonomes, un environnement virtuel placé entre les utilisateurs et servant de support à leurs interactions est explicitement pris en compte. Virstoria est un EVC conçu pour effectuer des expérimentations sur les interactions Homme Machine et qui dans notre cas sera utilisé pour les interactions oro-gestuelles dans un concept de communication Homme Machine Homme. C'est une plate-forme informatique de communication non verbale en environnement virtuel collaboratif.

Cet environnement doit permettre à plusieurs utilisateurs distants les uns des autres de raconter une histoire commune autour de cet environnement virtuel collaboratif en disposant chacun à leur tour, sur le « fil de l'histoire », des cubes « contes » et en terminant par un cube « dénouement ».



FIGURE 4.6 – L'environnement virtuel Virstoria, thèse Atman Kendira en collaboration avec Orange Labs

Chaque utilisateur qui participe à la conception d'une histoire collaborative, est incarné dans chacun des environnements des autres utilisateurs, par un avatar-agent afin d'exprimer le comportement non verbal et les actions de ces derniers dans le contexte du jeu.

Par exemple, lorsque l'utilisateur 1 discute avec l'utilisateur 2, leurs avatars devront effectuer des gestes (déictiques, adaptateurs, métaphoriques) et reproduire des émotions afin de représenter les utilisateurs en situation, ou lorsque l'utilisateur 1 déplace un cube sur le fil de l'histoire, l'utilisateur 2 verra l'avatar de l'utilisateur 1 effectuer l'action de déplacement du cube.

Mais cet environnement doit être enrichi d'un module de comportement non verbal capable de prendre en compte les entrées en temps réel (gestes des utilisateurs) et de générer le comportement non verbal de l'avatar qui représente l'utilisateur.

2.7 Un environnement informatique : Baybe (bayesian behavior)

L'originalité de notre approche est de rapprocher la catégorisation (base de faits observés et base de gestes) et le calcul de probabilité du comportement. A chaque instant, les inputs ou observés sont reliés à une expression gestuelle de l'avatar. On assiste à une traduction du geste réel en geste virtuel réduit, efficace et crédible.

Le réseau bayésien permet de prendre en compte cette incertitude et de représenter ainsi des comportements plus variés. Les connaissances sont ici des gestes, caractérisés dans le monde réel puis dans le monde virtuel. Cette étude apporte

un nouvel éclairage à la représentation du comportement non verbal en EVC. La représentation graphique autorisée par le réseau bayésien permet une grande flexibilité dans son utilisation.

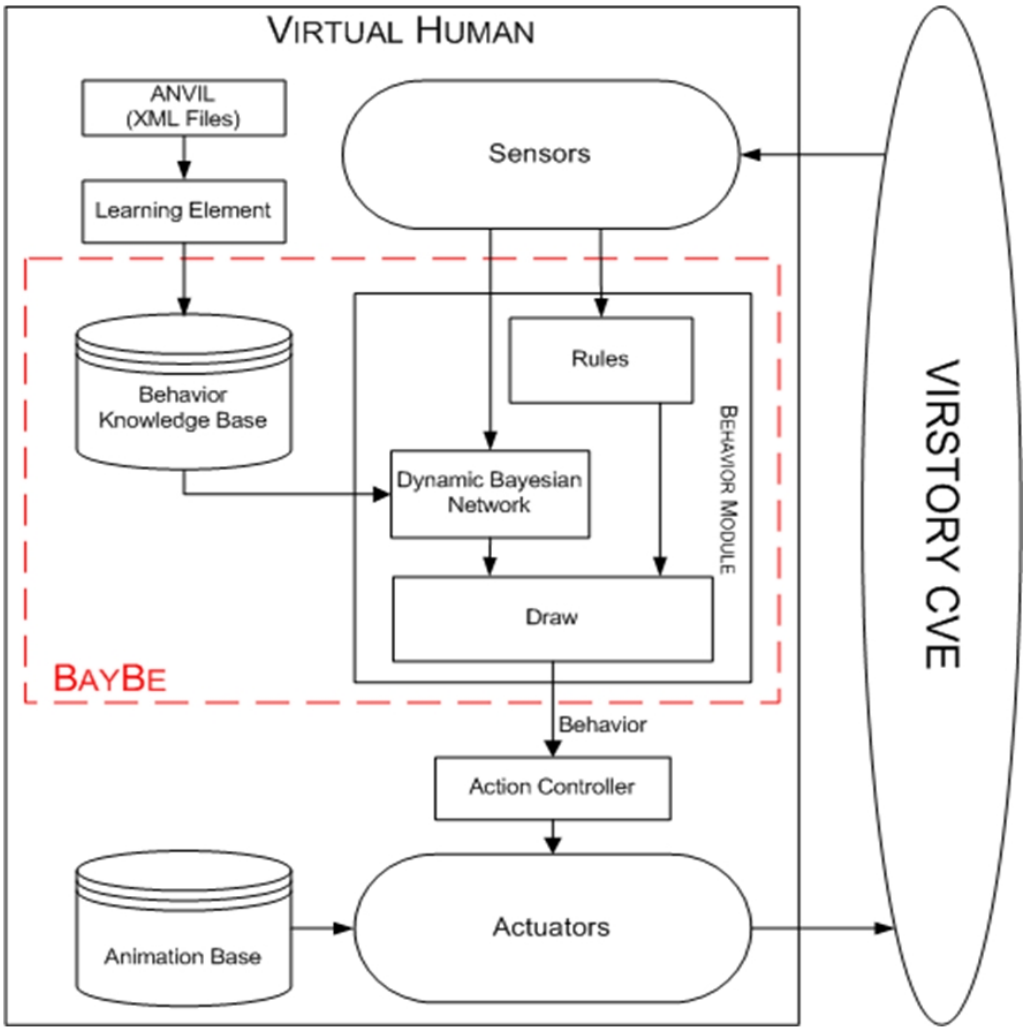


FIGURE 4.7 – Architecture de Virstoria [Kendira *et al.*, 2008]

La figure 4.7 décrit l'architecture complète du module de comportement non verbal, dans lequel baybe est intégré.

2.8 Conclusion

L'approche proposée ici est d'intégrer les connaissances symboliques ou empiriques pour communiquer en EVI de façon spécifique (le comportement de l'utilisateur est vraiment pris en compte en temps réel) et régulée (le système « apprend » à tenir compte des invariants, de la temporalité du jeu, de l'incertitude).

Dans cet esprit, il est intéressant de noter les travaux de Mathias Haringer [Haringer et Beckhaus, 2008] qui s'intéresse à la mesure qualitative des réactions de l'utilisateur d'un environnement virtuel, avec pour but de les intégrer dans les scénarii des environnements virtuels. Le principe est de réaliser des mesures physiologiques directes sur les utilisateurs (visuelles, auditives, biophysiologiques...) afin

d'interpréter les réactions en temps réel. A ce stade seuls les premiers prototypes ont été conçus.

Ce type de système laisse entrevoir l'intérêt majeur d'associer « inputs » en temps réel et modèles à base de connaissances dans l'EVI pour une interaction plus crédible.

3 Crédibilité versus réalisme : navigation temps-espace dans une abbaye disparue

Lors des visites virtuelles la connaissance est mobilisée afin de s'orienter dans le monde. Les modes d'interaction classiques du wayfinding [Bowman, 1999] sont des métaphores qui permettent justement de représenter en EV des connaissances afin de se déplacer, de voyager et de comprendre le monde virtuel. Cependant ces représentations sont parfois insuffisantes à transcrire des éléments historiques, des repères à la fois dans le temps et dans l'espace, des navigations pertinentes au sens de l'expérience.

A l'inverse, notre approche privilégie le point de vue et l'expérience basée sur la connaissance pour naviguer dans ces mondes.

3.1 L'abbaye St Corneille, première version

Il existe une abbaye à Compiègne [3], partiellement détruite en 1806. Il nous a été demandé de réaliser un projet à but pédagogique avec des étudiants de l'UTC afin de comprendre l'importance de cette abbaye dans la ville.

Les choix que nous avons fait pour ce projet sont les suivants :

- modélisation CAO puis transfert des données en 3D (figure 4.8 gauche),
- ajout de textures et matériaux provenant de photographies réelles des murs et vestiges de l'abbaye (figure 4.8 droite),
- navigation libre et changements de points de vue à l'aide d'une interface et de vignettes,
- insertion de moines (personnages virtuels) avec trajectoires pré-définies, en déambulation lors de méditation dans le cloître.

La représentation 3D par ce type de méthode est classique, et emploie un moteur 3D temps réel (Virtools [4]) qui apparaît dans la figure 4.8.

Le réalisme des expériences, des situations, des sensations, ont été des critères essentiels de performance des systèmes de RV car il était issu de plusieurs logiques qui se sont naturellement imposées :

- une logique de réduction de données et de recomposition avec les modèles et les algorithmes de la synthèse d'image, d'illumination, de calcul de niveau de détail ou encore de cinématique ou dynamique inverse afin de traduire le réel,

3. Ce projet a été financé par la ville de Compiègne, à la demande de Mme De Buyer, conseillère municipale. Nous tenons à souligner le rôle déterminant de Juliette Lenoir, conservatrice en chef des bibliothèques de la ville de Compiègne, dans ce projet mené sur différents semestres avec les étudiants de l'UTC. Le lien entre l'université et la ville s'est ainsi densifié conformément au vœu de Mme De Buyer.

4. Virtools, par Dassault systèmes, http ://www.virtools.com/.

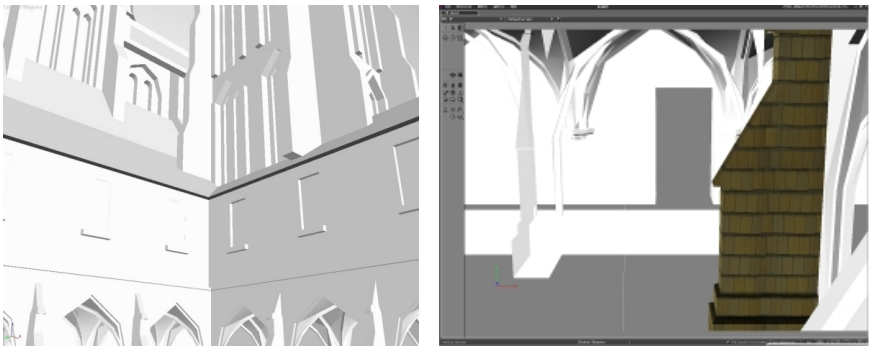


FIGURE 4.8 – Modélisation du cloitre de l'abbaye à l'aide du logiciel 3Dstudiomax

– une logique d'interprétation et d'amplification dans laquelle il est donné à voir et à ressentir.

Les représentations sont ici calculées en fonction de la position de l'utilisateur.

Lors de la présentation de ce projet aux habitants de la ville de Compiègne, nous avons été frappés par leur perplexité : la visualisation permettant de prendre conscience de l'importance volumique de l'abbaye, le rendu de l'image était alors devenu insuffisant. Le réalisme et le niveau de qualité des images, auxquels la communication médiatique de grands projets nationaux a rendu le public familier étant un niveau difficile à atteindre, la reconstruction 3D réalisée par notre université devenait tout à coup synonyme de représentation appauvrie.

Le directeur du musée Vivenel [5] présent tout au long du projet de reconstruction a aussitôt donné le ton : manque de détails, lumière et textures trop simples, fermeture de la dimension du souvenir de cette abbaye lorsque l'on s'attendait à la découvrir, somptueuse et imposante.

Rappelons pour le lecteur non spécialiste de l'image de synthèse que différents niveaux de réalisation sont possibles :

– modélisation par la CAO pour la conception de systèmes industriels,
– modélisation 3D (domaine de l'infographie) et illumination (figure 4.9).



FIGURE 4.9 – Modélisation du cloitre de l'abbaye à l'aide du logiciel 3Dstudiomax

Dans le paragraphe suivant nous allons rappeler cette quête du réalisme qui a été au cœur des recherches sur l'image de synthèse et la réalité virtuelle pendant de nombreuses années.

5. Nous remercions ici Eric Blanchegorge, directeur du musée Vivenel, pour ses précieux conseils, documents et pour le temps passé à nous conter (aux étudiants de l'UTC et à nous même) l'histoire de l'abbaye. Ses réactions ont été déterminantes pour la suite du projet.

3.2 Toujours plus de réalisme : un germe d'échec

Pendant des années les chercheurs se sont penchés sur des pistes concernant la modélisation 3D, les modèles d'illumination, le rendu [Peroche *et al.*, 1998] : c'est le domaine de l'image de synthèse [Foley *et al.*, 1996, Watt et Watt, 1991] . Ce calcul des images à partir de modèles 3D, mais en temps réel correspond au domaine de la réalité virtuelle ; son évolution est très liée aux performances des cartes graphiques améliorées par le jeu vidéo.

« True virtual reality may not be attainable with any technology we create. The Holodeck may forever remain fiction. Nonetheless, virtual reality serves as the Holy Grail of the research. » dit [Waterworth, 2002].

La conception de nouvelles interfaces sensori-motrices et la réalisation de systèmes haptiques [Burdea, 1996, Katz et Krueger, 1989, Boff *et al.*, 1986] par exemple est un autre domaine scientifique, très lié à la robotique. Enfin les aspects cognition, perception et ergonomie [Viaud-Delmon *et al.*, 2002, Slater *et al.*, 2006] sont également des axes de recherche importants et fédèrent plusieurs communautés scientifiques variées.

Ces domaines de recherche sont très bien décrits dans le traité de la réalité virtuelle [Fuchs *et al.*, 2006] constitué de quatre volumes spécifiques dédiés aux aspects perception, interfaçage, modèles informatiques, applications.

En fait l'utilisateur demande tout autre chose que le réalisme : pouvoir porter crédit au monde virtuel, se sentir immergé de telle sorte que les systèmes deviennent transparents. L'enjeu est de taille car il s'agit à la fois de donner sens à la représentation, et de répondre à la demande des utilisateurs, de permettre une expérience dans l'environnement. Or on assiste aujourd'hui à un glissement lié à la maturité scientifique et technologique : besoin de capitaliser et de transmettre l'expérience humaine en environnement virtuel, création d'environnements virtuels par des non experts (« la 3D pour tous » ainsi que l'éditeur de logiciel Virtools (Dassault systèmes) le propose). Vivre une expérience [Rousseaux et Thouvenin, 2008] dans le monde virtuel et éprouver des sensations, des émotions n'est pas forcément lié au niveau technologique des systèmes. Notre thèse est au contraire que l'utilisateur qui se sent frustré ou déçu dans cette expérience va réclamer toujours plus de réalisme, plus d'interaction, plus de fidélité à la réalité.

3.3 Apporter de la crédibilité : l'abbaye St Corneille - deuxième version

Après lecture de l'ouvrage de Bachelard [6], « La poétique de l'espace » [7], nous avons réalisé que la question de la présence était centrale afin de mieux ouvrir l'imaginaire et d'engager immédiatement le spectateur ou le visiteur dans une expérience quitte à le provoquer par le scandale, celui de l'anachronisme. « La représentation est dominée par l'imagination » nous dit Bachelard. « Dans une telle imagination, il y a vis-à-vis de l'esprit qui observe une inversion totale. L'esprit qui imagine

6. C'est à la suite d'un travail commun avec le professeur Francis Rousseaux pour la conférence Rochebrune 2008 que nous avons abordé cette question de l'expérience dans le monde virtuel. La présentation de l'abbaye St Corneille comme cas d'application des modèles de réalisme et de crédibilité a été présentée dans un article lors de cette conférence.

7. La poétique de l'espace, Gaston Bachelard, Quadrige grands textes, PUF,1957.

suit la voie inverse de l'esprit qui observe. L'imagination ne veut pas aboutir à un diagramme qui résumerait des connaissances. « Elle cherche un prétexte pour multiplier les images et dès que l'imagination s'intéresse à une image, elle en majore la valeur » dit encore Bachelard. Et en effet la visite virtuelle ne peut être assimilée finalement à une observation scientifique telle la lame observée sous le microscope ou la dépouille du vivant pour une dissection des organes vitaux. Au contraire, toute la maîtrise du concepteur en réalité virtuelle va s'exprimer dans la possibilité qu'il donne à l'image d'une possible rêverie.

Certains chercheurs s'intéressent à la précision de la modélisation et aux calculs d'illumination, aux limites du système d'affichage, et à la façon dont l'humain traite cette information. Alan Chalmers [Longhurst *et al.*, 2003] (à l'université de Bristol puis de Warwick aujourd'hui) travaille sur la « salissure », les poussières et les traces d'usage journalier de l'espace afin d'améliorer cette impression que « quelque chose est vrai » dans l'image. Même si les utilisateurs humains ne sont pas conscients de ces phénomènes, l'absence de telles preuves dans la représentation synthétique d'une scène réelle peut affecter leur perception. Chalmers et son équipe proposent une série de tests psychophysiques pour examiner la crédibilité perçue d'environnements virtuels en ajoutant des textures améliorée artistiquement.

Nous avons donc réfléchi avec des spécialistes en image de synthèse [8], en conservation du patrimoine, en réalité augmentée, en photographie afin de cerner l'indispensable et le parcours imaginaire de reconstruction mentale offert par ce support numérique. Des choix de simplification d'une part et de renforcement d'autre part ont été suggérés. Dans ce deuxième projet, les textures sont remplacées par un matériau diffus, un rendu de type « cartoon » c'est-à-dire employé dans les dessins animés.



FIGURE 4.10 – Images de l'abbaye St Corneille en réalité augmentée.

Les points de vue proposés superposent (figure 4.10) les images réelles en panoramiques Quick Time VR, et les images de synthèse calculées de l'abbaye. C'est une réalité augmentée, c'est-à-dire un ajout d'objets virtuels dans un monde réel. La navigation ne se fait plus de façon continue avec trajectoire d'une caméra virtuelle contrôlée à la souris mais au contraire par une carte cognitive, dans laquelle une balle sera lancée afin de choisir la zone de visualisation. Cette carte simplifiée de la ville, en 2D donc, donne une idée de la dimension et de la disposition des parties de l'abbaye : cloître, nef centrale de l'église devenue la rue St Corneille, logements des moines, salles etc.

L'idée est de reconstruire l'abbaye par rapport à ce qu'elle représentait dans la ville en 1790 (figure 4.11) tout en gardant les repères dans l'espace de la ville

8. Les images ont été réalisées par l'Institut Image ENSAM de Chalon sur Saône, bien connu pour ses réalisations sur la reconstruction virtuelle en 3D de l'abbaye de Cluny.

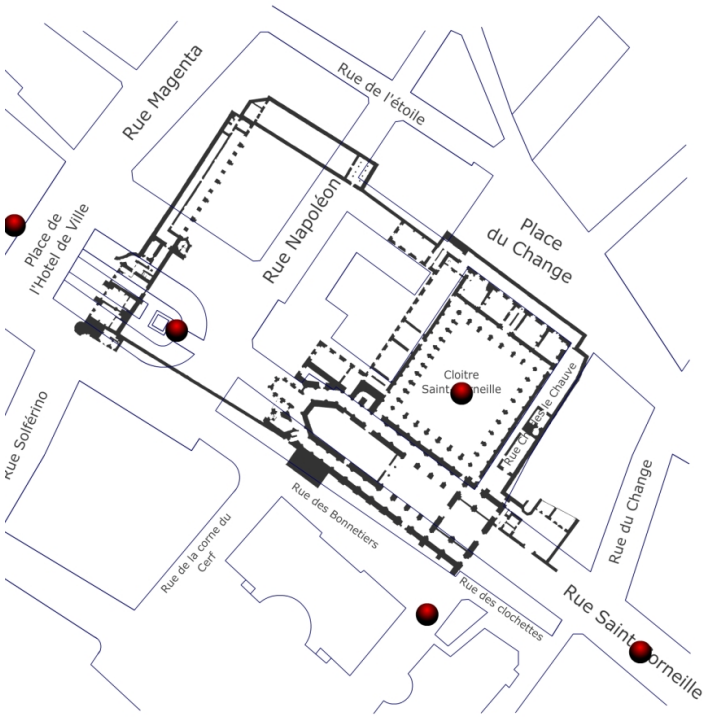


FIGURE 4.11 – Plan de la ville de Compiègne et emplacement de l'abbaye.

contemporaine. Le Compiégnois se retrouve à la fois dans un monde familier et comprend l'espace, il accepte de ne pas avoir tous les détails de l'abbaye disparue, il participe à l'expérience. Une danse entre le visiteur et le système, le désir d'explorer, de comprendre plus profondément, va lui permettre de passer du cap des idées reçues au cap des idées vécues.



FIGURE 4.12 – Positionnement de l'abbaye St Corneille au centre de la ville de Compiègne.

L'abbaye au milieu de la ville de Compiègne en 2008 (figure 4.12), là où se trouve la boucherie, le pharmacien, le marchand de chaussettes ou de jeux vidéos apparaît dans son imposante taille. Son importance et sa visibilité de loin par les deux tours, son caractère éclatant de force, crée un choc pour le Compiégnois qui se reconnaît à

travers les différents points de vue reconstitués. Cette visite dans le passé vaut par la soustraction : on ne verra jamais plus l'abbaye alors que son rayonnement avant 1790 était majeur. Il est surprenant de la voir ressuscitée en 2008.

3.4 Un imaginaire nourri par la connaissance en EVI

Le choix a donc été fait de la présence anachronique de l'abbaye au lieu même de la vie contemporaine des Compiégnois. Après tout l'émotion et la pensée humaine bravent le temps et proposent à travers l'histoire des sciences autant de théâtres qui « façonnent la pensée » [Hacking, 2003].

Gilles Deleuze [9], dans son ouvrage « Francis Bacon, Logique de la sensation », décrit très bien cette perception, ou cette expérience possible à travers l'image : « Déjà quand des critiques trop pieux reprochaient à Millet de peindre des paysans qui portaient un offertoire comme un sac de pommes de terre, Millet répondait en effet que la pesanteur commune aux deux objets était plus profonde que leur distinction figurative. Lui, peintre, il s'efforçait de peindre la force de la pesanteur, et non l'offertoire ou le sac de pommes de terre. Et n'est-ce pas le génie de Cézanne, avoir subordonné tous les moyens de la peinture à cette tâche : rendre visibles la force de plissement des montagnes, la force de germination de la pomme, la force thermique d'un paysage, ... ? ». C'est ce geste qui est ici poursuivi, se détachant du réalisme des formes pour aller vers l'émotion. Il peut aller jusqu'à la rébellion.

La rébellion concerne ici le déterminisme historique, qui affirme que l'abbaye jamais plus ne sera. Il s'agit ici de renouveler les modalités, les objets et les enjeux du jeu cosmique, au sens de Fink [10] dans son ouvrage « Le jeu comme symbole du monde ». C'est cela le véritable défi de la réalité virtuelle.

Au niveau scientifique et technique, ce sont les étudiants de l'UTC (UV RV01) qui ont réalisé les images panoramiques, à l'aide de caméras et d'une recomposition en Quick Time VR [11]. Les images de synthèse ont été calculées par rapport aux modèles 3D fournis par des travaux d'étudiants (TX) et projets successifs et ont été réalisées en lien avec l'équipe de l'Institut Image ENSAM de Chalon sur Saone [12].

4 Conclusion

4.1 Réalisme, complexité et temps de calcul

Il n'y a aucune raison de limiter les modes de représentation des connaissances, les modes d'affichage des informations, les métaphores de visualisation et d'interaction afin de produire des environnements informatiques permettant de vivre une expérience dans un monde virtuel. Le compromis précision-temps réel en partant d'une approche physiquement réaliste ou microscopique peut être avantageusement repensé avec une approche phénoménologique. Les aspects « crédibilité » sont alors

9. Deleuze Gilles, Françis Bacon, Logique de la sensation, collection L'ordre philosophique, Seuil, 2002

10. Fink, Eugen, Le jeu comme symbole du monde, collection Arguments, Editions de minuit.

11. Quick Time VR est un logiciel qui permet de composer ou de coller des photographies bout à bout et de les visualiser de façon interactive. La navigation se fait à la souris : c'est la méthode de création de visite virtuelle la plus communément employé sur le web.

12. Institut Image ENSAM, Jean Michel Sanchez, http ://www.ensam.fr/

synonymes de gain en temps de calcul et efficacité par rapport à l'utilisateur. Nos EVI intègrent à la fois des modèles à base de connaissance et des représentations permettant une construction de sens par l'interaction.

4.2 Enaction et expérience

Par ailleurs nous plaçons directement le paradigme de l'enaction au cœur de notre approche et nous suggérons que le sens s'enracine dans nos expériences à la fois fondamentales et corporelles. En effet, communiquer ou explorer des sites partiellement ou totalement disparus à travers un EVI demande à ce que l'interface soit source d'expériences et soit conçue de telle manière que les ressentis puissent être structurés pour l'utilisateur. Le couplage fort (figure 4.13) entre l'utilisateur et le système doit permettre :

- une interaction de l'utilisateur avec l'EVI donnant des sensations qui correspondent à son objectif,
- une interaction singulière, unique dans le temps.

Cette interaction spécifique n'a de signification que dans l'expérience de chacun, de même qu'un poème. Le temps de calcul est alors directement une affaire d'efficacité par rapport à la sensation perçue, et c'est la notion de crédibilité dans l'interaction qui devient centrale.

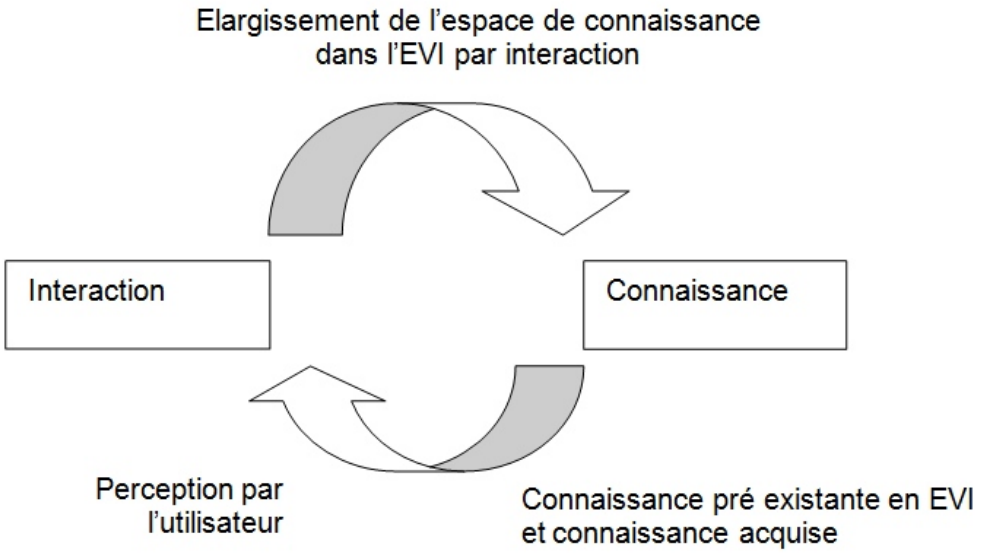


FIGURE 4.13 – Connaissance pour interagir en EV.

Chapitre 5

Conclusion

1 Bilan

Depuis six ans nos travaux de recherche à l'UTC se sont inscrits dans le domaine de la réalité virtuelle, enrichie par l'ingénierie des connaissances et les sciences cognitives. Ce pari de la pluridisciplinarité, difficile à mettre en œuvre, permet d'appréhender, de manière novatrice, le cœur de nos problématiques de recherche : permettre une expérience dans le monde virtuel. Cette notion d'expérience englobe l'expérimentation, la simulation, et l'action-perception.

Nous abordons cette problématique à travers trois concepts : les environnements virtuels informés (EVI), l'interaction avec ces EVI, et l'énaction.

Les domaines d'application rencontrés sont la conception mécanique, la collaboration à distance, la production et la maintenance industrielle, la formation, la communication en environnement virtuel, la valorisation du patrimoine.

1.1 Environnements virtuels informés

La réflexion épistémologique développée ici place l'expérience au centre des environnements virtuels que nous essayons de concevoir en intégrant des approches symboliques (ingénierie des connaissances) et des approches sensorielles (phénoménologie). Nous avons exploré la capitalisation des connaissances en situation de collaboration en EVI, à travers plusieurs modèles :

- un modèle d'annotation 3D, basé sur une maquette virtuelle 3D issue de la CAO. Ce modèle permet de capitaliser les échanges en cours de conception collaborative par rapport à la maquette virtuelle. Les annotations sont classées au moyen d'une hiérarchie de concepts, prédéfinie et donc non modifiable par l'utilisateur. C'est la limite de notre modèle et nous souhaitons rendre flexible cette classification pour enrichir les possibilités d'annotation et leur exploitation ;

- un modèle bayésien pour la communication non verbale, permettant de représenter par des avatars les attitudes et les gestes des utilisateurs lors de la conception collaborative d'une histoire. Des capteurs permettent de mettre à jour en temps réel les données concernant les utilisateurs et de donner des représentations pus crédibles de leur comportement. Le calcul est effectuée par un réseau bayésien dynamique paramétré à l'aide d'une analyse préalable d'un corpus de données ;

- un environnement industriel de formation par la réalité virtuelle, comprenant

des scénarios, des aides à la compréhension, des questionnaires et des niveaux. L'environnement est informé, par des annotations et des informations diverses, et l'utilisateur acquiert ainsi par l'expérience qu'il vit en environnement virtuel, une sensibilisation forte au système industriel qu'il doit utiliser. De plus le simulateur est couplé à une interface tangible, un panneau de contrôle réel, qui donne une possibilité de réglage très crédible à l'utilisateur ;

- une navigation temps-espace en réalité augmentée afin de comprendre l'importance d'une abbaye disparue dans l'espace d'une cité actuelle. La navigation se fait dans la ville actuelle et ancienne, à partir de points de vue permettant de superposer le réel et le virtuel. La cité actuelle est donc le point de départ dans l'espace, et la navigation se fait en référence à cet espace connu dans le monde réel. Ici la perception dans le temps est ancrée dans l'environnement virtuel informé.

Ces modèles ont été implémentés sur les plates formes MATRICS, BAYBE, RVPI, et pour le projet Abbaye St Corneille, sur une plate forme spécifique . Le projet RVPI [1] transfert technologique issu des activités du laboratoire Heudiasyc, a été à l'origine d'une réflexion sur la problématique suivante : « comment mieux répondre au besoin de formation dans l'industrie ? ».

Cette réflexion a donné lieu à une initiative, la création de la start up REVIATECH [2], proposant une toute nouvelle technologie pour la formation par la Réalité Virtuelle.

1.2 Interaction avec les EVI

Le terme de « connaissances empiriques » est accepté en ingénierie des connaissances et désigne des connaissances difficiles à transmettre comme par exemple le geste du chirurgien, ou des connaissances qu'il faut analyser avec des experts et organiser par catégorisation arbitraire. La représentation des connaissances est ici intéressante pour effectuer des raisonnements, des calculs sur ces catégories. L'EVI permet de donner à comprendre et de donner à voir les résultats de ces raisonnements ou calculs. Les principes d'autonomie, de simulation, peuvent ici être très utiles afin de construire des entités autonomes et de renforcer la crédibilité du monde. Cependant ces principes ne suffisent pas lorsque l'utilisateur est face à des situations complexes aléatoires, imprévues ou faisant appel à sa capacité d'apprendre, de mémoriser et d'évoluer sans cesse.

Le principe de « vivre une expérience » dans le monde virtuel nous a conduits à modéliser non seulement des EVI mais aussi des interactions en nous basant sur une grille de lecture telle que la phénoménologie. L'exemple de l'abbaye St Corneille démontre que la performance scientifique et technologique liée à la quête du réalisme, axes de recherche dans le domaine de l'image de synthèse et de la réalité virtuelle, est à mettre en rapport avec une « efficience de la perception ». Eprouver des sensations et des émotions dans le monde virtuel n'est pas une course à la quantité de pixels ou au niveau de calcul de simulation, mais s'oriente plutôt vers une complexité de

1. Rappel : projet de réalisation du simulateur de production de pneumatiques pour l'entreprise Continental Clairoix SA

2. REVIATECH est une start up partenaire de l'UTC, basée à Compiègne, portée par l'incubateur de Picardie, et lauréate du concours ANVAR (catégorie émergence).http ://www.reviatech.com/

l'interaction et de la visualisation favorisant la « crédibilité » c'est-à-dire la capacité de l'EVI à répondre aux attentes de l'utilisateur (« believability » en anglais).

Nous avons mis en évidence à travers l'application VIRSTORIA l'apport d'une base de gestes dans l'EVI et l'intérêt d'une approche bayésienne : le geste est pour nous une connaissance empirique qui enrichit l'EVI. L'incertitude intégrée grâce au réseau bayésien permet d'ancrer l'expérience et de tester la crédibilité de la communication non verbale.

1.3 Enaction

Le comportement évolutif de l'avatar dans la plate forme BAYBE ou encore la capitalisation des connaissances en EVI dans la plate forme MATRICS démontrent que les EVI ne peuvent être pensés comme construits une fois pour toutes. De même que le cheminement de la pensée en mouvement permanent dans le monde réel ou virtuel se confronte sans cesse à ce que nos sens perçoivent, l'interaction avec l'EVI est un processus dynamique qui construit le lien entre système et utilisateur. Nous nous appuyons sur le paradigme de l'énaction pour définir ce processus d'interaction, qui amène non seulement une évolution de l'utilisateur au fur et à mesure de son interaction, mais qui aboutit aussi à une perception de soi.

Nous avons étendu la notion de retour sensoriel des interfaces dites « énactives » à la navigation dans des EVI. La plate forme Baybe implémentée pour cette application peut être considérée comme interface énactive dans le sens où les entrées provenant en temps réel de l'utilisateur sont directement perçues et intégrées au calcul de probabilité du geste de l'avatar. A l'inverse le système affiche en permanence des comportements qui guident l'utilisateur sur sa propre représentation dans l'EVI, ce qui l'amène (figure 5.1) à réguler son comportement.

2 Perspectives

L'expérience humaine vécue dans l'environnement virtuel est une notion récente et les objectifs de recherche sont par nature encore mouvants. Certains sont toutefois d'ores et déjà plus clairement identifiés :

- l'intégration des connaissances en environnement virtuel,
- la capitalisation des connaissances symboliques et empiriques par des environnements virtuels informés,
- la confrontation de ces environnements virtuels avec des domaines d'application tels que la formation, la collaboration, la conception mécanique.

> Notre programme de recherche se centrera sur la notion novatrice d'Environnement Virtuel Informé Enactif, ou « EVI énactif (EVIE) », dont les fondements sont l'évolutivité dynamique (plutôt que le déterminisme), basée sur un critère de crédibilité et non de réalisme (crédibilité du perçu dans l'interaction plutôt que de la copie du réel).

Nous proposons deux axes de recherche construits autour du principe de l'expérience dans les mondes virtuels. Ces deux axes sont directement liés à des applications pouvant donner lieu à de nombreuses collaborations académiques et industrielles.

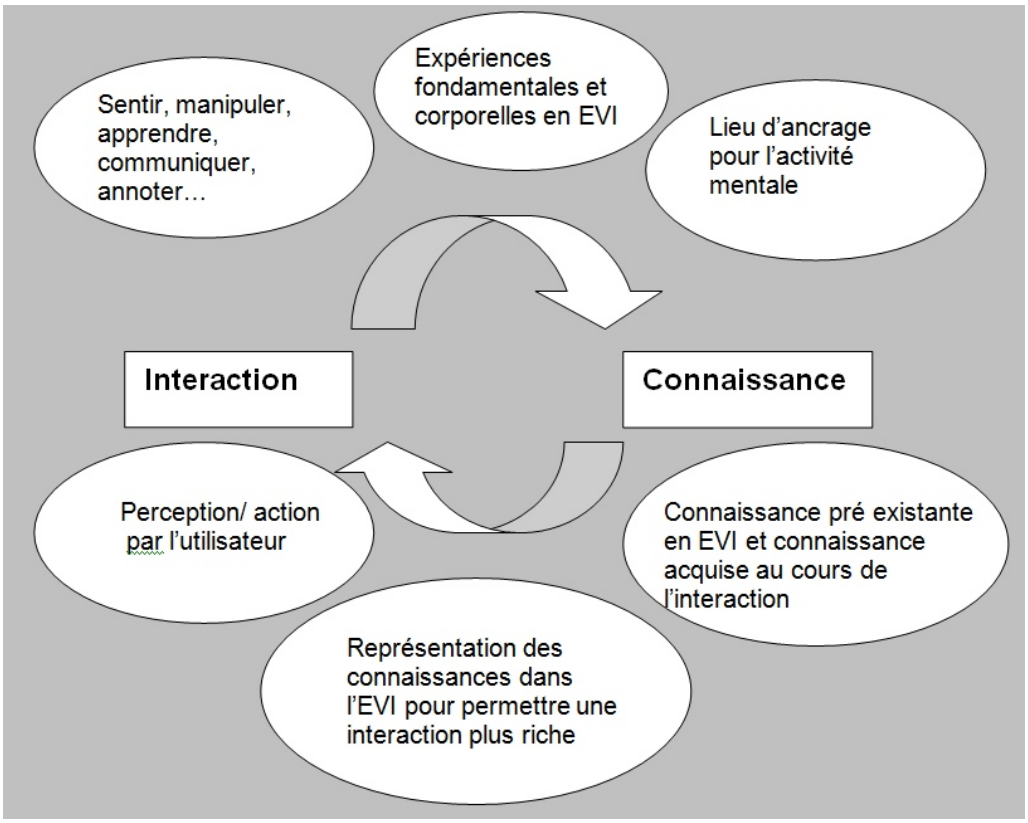


FIGURE 5.1 – Interaction avec les EVI.

2.1 Deux axes de recherche

Capitalisation des connaissances intégrant l'incertitude

Il s'agit ici de proposer des modes de capitalisation et d'exploitation des connaissances en EV de la façon la plus dynamique possible. Ces EVI sont à la fois des environnements permettant de présenter, d'afficher des informations aux utilisateurs dans les environnements virtuels, mais aussi d'intégrer leur expertise et de l'organiser selon des schémas permettant une classification mouvante. Nous considérons à la fois les connaissances symboliques (abstraites) et les connaissances empiriques (geste, toucher,). Le point de vue phénoménologique est ici lié aux interfaces car l'interaction est très importante pour sentir/agir. C'est dans le couplage entre utilisateur et système que se constitue l'expérience vécue, et ce couplage peut permettre de créer des " agents " ou objets qui agissent.

Adaptativité de l'interaction par les ontologies dynamiques

Les ontologies dynamiques peuvent être vues comme reposant sur des systèmes multi agents ou sur des modes de calcul prenant en compte la nature " vivante " de l'ontologie. L'environnement Matrics pourrait ainsi évoluer vers un environnement réflexif, permettant de modifier en cours d'utilisation la hiérarchie de concepts, permettant ainsi d'avoir un environnement informé portable, complexe et plus riche. Ces systèmes peuvent être orientés agents ou organisation par exemple. Afin de faire le lien entre cette approche autorisée par l'ingénierie des connaissances et le concept

d'incarnation, autorisé par la réalité virtuelle, nous nous proposons d'enrichir l'environnement virtuel au fur et à mesure de l'activité de l'utilisateur par une capture des actions de celui-ci, au niveau des ses gestes, de son regard, de sa position en environnement virtuel. Autrement dit, nous envisageons de coupler les modèles de l'ingénierie des connaissances avec les modèles de la réalité virtuelle, ce qui revient à nous orienter vers de la combinaison de données de sources hétérogènes pour orienter l'interaction.

2.2 Axes applicatifs

Interaction et connaissance pour le « Serious game »

Le terme « serious game » s'adresse aux applications sérieuses du jeu vidéo, tels que les simulateurs de vol, les systèmes d'apprentissage pour les applications médicales, l'aide à la décision en situation de stress ou de risque, la sensibilisation à des tâches difficiles ou peu faciles à représenter. La formation et l'aide à la décision sont facilitées par le serious game (figure 5.2). A l'inverse, les questions posées par la conception de serious game concernent des domaines tels que la réalité virtuelle, les sciences cognitives, l'étude des processus d'apprentissage, la simulation de phénomènes physiques ou biologiques, l'analyse de l'activité humaine, ou les neurosciences.

L'idée est de s'appuyer sur le cadre bordé (règles du jeu) du serious game pour offrir de nouveaux modes d'interaction aux utilisateurs et d'ancrer ces modes d'interaction dans une « cognition incarnée »(embodied cognition) telle la « chair IO » de Steffi beckhaus [Blom 08] : le corps tout entier participe à l'interaction, et il est possible qu'une acceptation implicite de cette interaction particulière avec l'EVI (l'utilisateur « accepte les règles du jeu ») permette une sensation de présence très forte dans l'environnement.

Cette « cinquième dimension », l'interaction entre l'utilisateur et le monde virtuel, doit permettre d'ouvrir des pistes novatrices et originales dans les domaines de recherche déjà existants dans les laboratoires de l'UTC et de construire des collaborations inédites avec des laboratoires comme le CERV (Centre Européen de Réalité Virtuelle, Brest) ou l'ICM (Institut Cerveau Moelle, Paris).

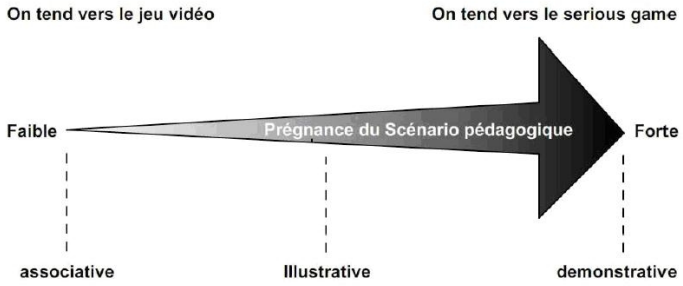


FIGURE 5.2 – Shéma illustrant la zone de recouvrement entre le jeu vidéo et le serious game. [Alvarez *et al.*, 2007].

De même, les travaux réalisés par C. Cadoz [Cadoz *et al.*, 2003] dans le domaine de la musique illustrent l'idée de conception et réalisation de nouvelles interfaces

à retour sensoriel. Si nous ne pensons pas explorer cette piste de recherche, les questions posées par la musique, la danse et l'art en général peuvent contribuer de manière intéressante à la construction d'EVIE ou Environnement Virtuel Informé Enactif.

Visualisation scientifique et retour sensoriel par les EVI pour le bâtiment

Toujours dans le cadre des EVI enactifs, nous nous proposons de nous intéresser au lien entre calcul scientifique et retour sensoriel. L'application envisagée est celle du bâtiment dans lequel les utilisateurs souhaitent ressentir par exemple le confort thermique ou les différences entre divers matériaux. L'idée est que la base de connaissance réalisée à partir des résultats de calculs scientifiques devienne accessible à des non experts. La navigation est alors une question délicate : la sémantique d'un domaine du monde réel entre les données exploitables par la machine et celles compréhensibles par les humains. Notre approche mêle ici les ontologies dynamiques et l'approche probabiliste de façon à permettre de percevoir des phénomènes physiques en évitant les coûts de calculs extrêmes et en privilégiant la crédibilité de l'interaction.

L'ensemble de ces travaux sera réalisé dans le cadre d'un réseau de coopération international au travers notamment des laboratoires du réseau d'excellence européen Enactive (projet clôturé cette année), de collaborations universitaires comme avec l'Indian Institute of Science de Bangalore (Inde) et de partenariats industriels (Continental, St Gobain Recherche, Orange Labs).

Bibliographie

[Abel *et al.*, 2004] Abel, M., Barry, C., Benayache, A., Chaput, B., Lenne, D. et Moulin, C. (2004). Ontology-based organizational memory for e-learning. educational technology and society - international forum of educational technology and society. *IEEE Learning Technology Task Force*, 7(3):98–111.

[Alvarez *et al.*, 2007] Alvarez, J., Djaouti, D., Jessel, J.-P., Methel, G. et Molinier, P. (2007). Morphologie des jeux vidéo. *In H2PTM, Hammamet, Tunisie, 29/10/2007-31/10/2007*, numéro 978-2-7462-1891-8 de Lavoisier, pages 277–287, http ://www.editions-hermes.fr/. Hermès Science Publications.

[Arnaldi, 1994] Arnaldi, B. (1994). *Animation de systèmes physiques*. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université de Rennes I.

[Aubry, 2007] Aubry, S. (2007). *Annotations et gestion des connaissances en environnement virtuel collaboratif*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France.

[Aubry *et al.*, 2005a] Aubry, S., Lenne, D., Thouvenin, I. et Guénand, A. (2005a). Vr annotations for collaborative design. *In HCII2005*, Las Vegas. ISBN 0-8058-5807-5.

[Aubry *et al.*, 2005b] Aubry, S., Thouvenin, I., Lenne, D. et Okawa, S. (2005b). Knowledge enhanced annotations in virtual reality environments. *In Virtual Concept 2005*, Biarritz, France.

[Aubry *et al.*, 2007] Aubry, S., Thouvenin, I., Lenne, D. et Okawa, S. (2007). Knowledge integration for annotating in virtual environments. *International Journal of Product Development*, 5(6):533–546.

[Aylett et Luck, 2000] Aylett, R. et Luck, M. (2000). Applying artificial intelligence to virtual reality : Intelligent virtual environments. *Applied Artificial Intelligence*, 14:3–32.

[Bach-y Rita, 1972] Bach-y Rita, P. (1972). *Brain mechanisms in sensory substitution*. Academic Press Inc, New York.

[Bach-y Rita, 1994] Bach-y Rita, P. (1994). *Oxford, Blackwell Scientific Publications*, chapitre Sensory substitution, volume transmission and rehabilitation : emerging concepts, pages 457–468. Oxford, Blackwell Scientific Publications.

[Bach-y Rita *et al.*, 1969] Bach-y Rita, P., Collins, C., Saunders, F.and White, B. et Scadden, L. (1969). Vision substitution by tactile image projection. *Nature*, 221:963 – 964.

[Bachimont, 2004] Bachimont, B. (2004). *Arts et sciences du numérique : ingénierie des connaissances et critique de la raison computationnelle*. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université de Technologie de Compiègne.

[Barthès et Tacla, 2002] Barthès, J.-P. A. et Tacla, C. A. (2002). Agent-supported portals and knowledge management in complex r&d projects. *Comput. Ind.*, 48(1):3–16.

[Benford *et al.*, 1995] Benford, S., Bowers, J., Fahlén, L., Greenhalg, C. et Swondon, D. (1995). User embodiment in collaborative virtual environments,. *In CHI'95*.

[Benguigui *et al.*, 2005] Benguigui, N., Fontayne, P., Desbordes, M. et Bardy, B., éditeurs (2005). *Recherches actuelles en Sciences du Sport. Actes du 11e congrès international de l'ACAPS.*, Paris : EDP Sciences.

[Berthoz, 1997] Berthoz, A. (1997). *Le Sens du Mouvement*. Odile Jacob.

[Blom et Beckhaus, 2007] Blom, K. J. et Beckhaus, S. (2007). Supporting the creation of dynamic, interactive virtual environments. *In VRST '07 : Proceedings of the 2007 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 51–54, New York, NY, USA. ACM.

[Blom et Beckhaus, 2008] Blom, K. J. et Beckhaus, S. (2008). On the creation of dynamic, interactive virtual environments. *In* Verlag.2008, S., éditeur : *IEEE VR 2008 workshop "SEARIS - Software Engineering and Architectures for Interactive Systems."*.

[Boeck *et al.*, 2004] Boeck, J. D., Cuppens, E., Weyer, T. D., Raymaekers, C. et Coninx, K. (2004). Multisensory interaction metaphors with haptics and proprioception in virtual environments. *In NordiCHI '04 : Proceedings of the third Nordic conference on Human-computer interaction*, pages 189–197, New York, NY, USA. ACM.

[Boff *et al.*, 1986] Boff, K. R., Kaufman, L. et Thomas, J. P. (1986). *Handbook of Perception and Human Performance*. Wiley-Interscience.

[Boujut, 2003] Boujut, J.-F. (2003). User-defined annotations : artefacts for co-ordination and shared understanding in design teams. *Journal of Engineering Design*, 14:409–419.

[Boujut et Blanco, 2003] Boujut, J.-F. et Blanco, E. (2003). Intermediary objects as a means to foster co-operation inengineering design. *Comput. Supported Coop. Work*, 12(2):205–219.

[Boujut et Dugdale, 2006] Boujut, J.-F. et Dugdale, J. (2006). Design of a 3d annotation tool for supporting evaluation activities in engineering design. *In Cooperative Systems Design, COOP'06*, pages 1 – 8.

[Bourbeillon *et al.*, 2005] Bourbeillon, J., Garbay, C., Simony-Lafontaine, J. et Giroud, F. (2005). Multimedia data management to assist tissue microarrays design. *In* Miksch, S., Hunter, J. et Keravnou, E. T., éditeurs : *AIME*, volume 3581 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 226–230. Springer.

[Bourdot *et al.*, 2006] Bourdot, P., Jessel, J.-P. et Thouvenin, I. (2006). *Le Traité de la Réalité Virtuelle, troisème édition, Volume 4*, chapitre Industries Manufacturières, pages 175–200. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

[Bowman, 1999] Bowman, D. A. (1999). *Interaction Techniques for Common Tasks in Immersive Virtual Environnements : Design, Evaluation, and Application.* Thèse de doctorat, Georgia Institute of Technology.

[Bowman *et al.*, 2004] Bowman, D. A., Kruijff, E., Joseph J. LaViola, J. et Poupyrev, I. (2004). *3D User Interfaces : Theory and Practice*. Numéro ISBN 0-201-75867-9. Addison-Wesley/Pearson Education.

[Bowman *et al.*, 2003] Bowman, D. A., North, C., Chen, J., Polys, N. F., Pyla, P. S. et Yilmaz, U. (2003). Information-rich virtual environments : theory, tools, and research agenda. *In VRST '03 : Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 81–90, New York, NY, USA. ACM.

[Burdea, 1996] Burdea, G. C. (1996). *Force and touch feedback for virtual reality*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.

[Burdea et Coiffet, 2003] Burdea, G. C. et Coiffet, P. (2003). *Virtual Reality Technology, Second Edition with CD-ROM*. Wiley-IEEE Press, 111 River Street, Hoboken NJ, USA.

[Cadoz *et al.*, 2003] Cadoz, C., Luciani, A., Florens, J.-L. et Castagné, N. (2003). Acroe - ica : artistic creation and computer interactive multisensory simulation force feedback gesture transducers. *In NIME '03 : Proceedings of the 2003 conference on New interfaces for musical expression*, pages 235–246, Singapore, Singapore. National University of Singapore.

[Casati *et al.*, 2007] Casati, Roberto, Pasquinelli et Elena (2007). How can you be surprised ? the case for volatile expectations. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 6(1-2):171–183.

[Casati, 2003] Casati, R. (2003). *The Discovery of the Shadow : The History of an Enigma That Has Fascinated Humanity's Greatest Thinkers from Plato to Galileo*. London, New York : Little, Brown ; Knopf.

[Chen *et al.*, 2007] Chen, J., Forsberg, A., Kostandov, M., Willis, D. et Laidlaw, D. H. (2007). The effect of using large, high-resolution stereoscopic displays for flow visualization. *In SIGGRAPH '07 : ACM SIGGRAPH 2007 posters*, page 165, New York, NY, USA. ACM.

[Cotin *et al.*, 1999] Cotin, S., Delingette, H. et Ayache, N. (1999). Real-time elastic deformations of soft tissues for surgery simulation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(1):62–73.

[Crison *et al.*, 2005] Crison, F., Lecuyer, A., d'Huart, D. M., Burkhardt, J.-M., Michel, G. et Dautin, J.-L. (2005). Virtual technical trainer : Learning how to use milling machines with multi-sensory feedback in virtual reality. *In VR '05 : Proceedings of the 2005 IEEE Conference 2005 on Virtual Reality*, pages 139–146, 322, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

[Cruz-Neira *et al.*, 1993] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J. et DeFanti, T. A. (1993). Surround-screen projection-based virtual reality : the design and implementation of the cave. *In SIGGRAPH '93 : Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 135–142, New York, NY, USA. ACM.

[Dassault, 2006] Dassault (2006). Dassault systèmes : site web catia. http ://www.3ds.com/products-solutions/plm-solutions/catia/overview/.

[De Jaegher, 2007] De Jaegher, H. (2007). Participatory sense-making : Between embodied and narrative alternatives to mindreading. *In Self, Intersubjectivity and Social Neuroscience. From Mind and Action to Society*, Torun, Poland.

[De loor *et al.*, 2008] De loor, P., Manach, K., Fronville, A. et Tisseau, J. (2008). Requirement for an enactive machine : Ontogenesis, interaction and human in the loop. *In 5th International Conference on Enactive Interfaces, ENACTIVE08.*

[Demengel et Pouget, 1998] Demengel, G. et Pouget, J.-P. (1998). *Modèles de Bézier, des B-splines et des nurbs : Outils pour l'ingénieur, bases pour la CAO.* E. Paris.

[Donikian, 2004] Donikian, S. (2004). *Modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels autonomes évoluant dans des environnements informés et structurés.* Hdr, IRISA.

[Enembreck *et al.*, 2004] Enembreck, F., Thouvenin, I., Abel, M. et Barthès, J. (2004). An ontology-based multi-agent environment to improve collaborative design. *In 6th International Conference on the Design of Cooperative System, COOP'04.*, pages 81–89, French Riviera - France.

[Foerster, 1984] Foerster, H. (1984). *The invented reality : How do we know what we believe we know ?*, chapitre On constructing a reality, pages 41 – 61. W Norton & Co Inc.

[Foley *et al.*, 1996] Foley, J. D., van Dam, A., Feiner, S. K. et Hughes, J. F. (1996). *Computer Graphics Principles and Practice.* Addison-Wesley Professional.

[Fuchs *et al.*, 2006] Fuchs, P., Moreau, G. et auteurs, . (2006). *Traité de la réalité virtuelle, 4 volumes.* Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

[Garcia *et al.*, 2004] Garcia, A. C. B., Kunz, J., Ekstrom, M. et Kiviniemi, A. (2004). Building a project ontology with extreme collaboration and virtual design and construction. *Advanced Engineering Informatics*, 18(2):71 – 83. Ontology and it's Applications to Knowledge-Intensive Engineering.

[Gibson, 1966] Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems.* Houghton Mifflin Co, Boston.

[Glasersfeld, 1995] Glasersfeld, E. V. (1995). *Radical constructivism : a way of knowing and learnoing.* Falmer Press.

[Hachet *et al.*, 2003a] Hachet, M., de la Rivière, J.-B. et Guitton, P. (2003a). Interaction in large-display vr environments. *In Proceedings of Virtual Concept.*

[Hachet *et al.*, 2003b] Hachet, M., Guitton, P., Reuter, P. et Tyndiuk, F. (2003b). The cat for efficient 2d and 3d interaction as an alternative to mouse adaptations. *In Proceedings of Virtual Reality Software and Technology, (VRST 2003)*, pages 205–212. ACM. best paper award.

[Hacking, 2003] Hacking, I. (2002-2003). Philosophie et histoire des concepts scientifiques. « véracité et raison ». Cours au collège de France.

[Haringer et Beckhaus, 2008] Haringer, M. et Beckhaus, S. (2008). Framework for the measurement of affect in interactive experiences and games. *In CHI'08 Workshop "Evaluating UX in Games"*, Florence.

[Hendaoui *et al.*, 2008] Hendaoui, A., Limayem, M. et Thompson, C. W. (2008). 3d social virtual worlds : Research issues and challenges. *IEEE Internet Computing*, 12(1):88–92.

[Husserl, 1960] Husserl, E., éditeur (1960). *Cartesian Meditations : An Introduction to Phenomenology*. Kluwer Academic.

[Intuition, 2004] Intuition (2004). Intuition : Network of excellence on virtual reality and virtual environments applications for future worlspaces. http ://www.intuition-eunetwork.org/.

[Kassel, 2002] Kassel, G. (2002). Ontospec : une méthode de specification semi-informelle d'ontologies. *In IC2002*, Rouen.

[Katz et Krueger, 1989] Katz, D. et Krueger, L. E. (1989). *The World of Touch*. Lawrence Erlbaum.

[Kendira *et al.*, 2006a] Kendira, A., Perron, L., Carbini, S., Viallet, J.-E. et Delphin-Poulat, L. (2006a). Virstory : from human behavior studies to design a multimodal collaborative virtual environment. *In Second International Conference on Collaboration Technologies (CollabTech 2006)*, Tsukuba, Japan.

[Kendira *et al.*, 2006b] Kendira, A., Perron, L. et Lefèbvre, L. (2006b). Collaborer dans le virtuel... des avatars et du non-verbal. *In Conférence CNRS Dialogue et Interaction*, Autrans, FRANCE. CNRS.

[Kendira *et al.*, 2006c] Kendira, A., Perron, L. et Lefèbvre, L. (2006c). Entre gestes : Père castor, raconte-moi une histoire. modèle de collaboration narrative pour des avatars. *In Second Workshop sur les Agents Conversationnels Animés (WACA 2006)*, Toulouse (FRANCE). IRIT Toulouse.

[Kendira *et al.*, 2008] Kendira, A., Thouvenin, I. et Perron, L. (2008). Improving believability of avatars through a bayesian approach for non-verbal behaviour in collaborative virtual environment. *In* Springer, B., éditeur : *Virtual Concept - IDMME 2008*, Beijing, China. Springer, Berlin.

[Kitamura *et al.*, 2002] Kitamura, Y., Ogata, S. et Kishino, F. (2002). A manipulation environment of virtual and real objects using a magnetic metaphor. *In VRST '02 : Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pages 201–207, New York, NY, USA. ACM.

[Le Gal *et al.*, 2007] Le Gal, C., Olagnon, M., Parenthoen, M., Beal, P.-A. et Tisseau, J. (2007). Comparison of sea state statistics between a phenomenological model and field data. *In OCEANS 2007*, Europe.

[Lécuyer *et al.*, 2001] Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Coquillart, S. et Coiffet, P. (2001). "boundary of illusion : " an experiment of sensory integration with a pseudo-haptic system. *In VR '01 : Proceedings of the Virtual Reality 2001 Conference (VR'01)*, page 115, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

[Lenay, 1996] Lenay, C. (1996). Mental symbols and genetic symbols : Analogies between theoretical perspectives in biology and cognitive science. *Behavioural processes*, 35:251–262. Amsterdam, Elsevier Science Publishers.

[Lenay, 1999] Lenay, C. (1999). Technology and perception : the contribution of sensory substitution systems. *In* Havelange, V. et Stewart, J., éditeurs : *Cognition, Biology, Technology. The Science and Philosophy of Embodied Meaning*, Instituto Gubelkian de Ciencia, Portugal,.

[Lenay *et al.*, 2007] Lenay, C., Thouvenin, I., Guénand, A., Gapenne, O., Stewart, J. et Maillet, B. (2007). Designing the ground for pleasurable experience. *In DPPI '07 : Proceedings of the 2007 conference on Designing pleasurable products and interfaces*, pages 35–58, New York, NY, USA. ACM.

[Lenne *et al.*, 2008] Lenne, D., Abel, M.-H., Trigano, P. et Leblanc, A. (2008). Self-regulated learning in technology enhanced learning environments : an investigation with university students. *Technology, Pedagogy and Education*, 17(3):171–181.

[Longhurst *et al.*, 2003] Longhurst, P., Ledda, P. et Chalmers, A. (2003). Psychophysically based artistic techniques for increased percieved realism of virtual environments. *In AFFRIGRAPH 2003, Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*, pages 123–131. The Association for Computing Machinery, Inc.

[Matsushita et Rekimoto, 1997] Matsushita, N. et Rekimoto, J. (1997). Holowall : designing a finger, hand, body, and object sensitive wall. *In UIST '97 : Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 209–210, New York, NY, USA. ACM.

[Maturana *et al.*, 1968] Maturana, H., Uribe, G. et Frenk ;, S. (1968). A biological theory of relativistic colour coding in the primat retina. *Arch. Biologia y Med Exp*, 1(0):1–30.

[Maturana et Varela, 1980] Maturana, H. R. et Varela, F. J. (1980). *Autopoiesis and Cognition : The Realization of the Living (Boston Studies in the Philosophy of Science)*. D. Reidel Pub. Co. (Dordrecht, Holland and Boston).

[Merleau-Ponty, 1962] Merleau-Ponty, M. (1962). *Phenomenology of Perception*. New York : Humanities Press.

[Mortensen, 1985] Mortensen, M. E. (1985). *Geometric Modeling*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.

[Neyret et Praizelin, 2001] Neyret, F. et Praizelin, N. (2001). Phenomenological simulation of brooks. *In Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (EGCAS)*, pages 53–64. Eurographics, Springer. Manchester.

[Noë, 2002] Noë, A. (2002). *Action in Perception*. MIT Press.

[Olive, 2005] Olive, J. (2005). Intégration des connaissances et interactions en environnement immersif collaboratif. Mémoire de D.E.A., Université de Technologie Compiègne.

[Olive et Thouvenin, 2008] Olive, J. et Thouvenin, I. (2008). Knowledge representation in virtual environment for training in tire manufacturing. *In Virtual Reality International Conference 08*, Laval, France.

[Olive *et al.*, 2007] Olive, J., Thouvenin, I. et Aubry, S. (2007). Enactive knowledge with gestural annotations. *In Enactive/07, 4th International Conference on Enactive Interfaces*, Grenoble, France.

[Olive *et al.*, 2006] Olive, J., Thouvenin, I., Lemasson, G. et Sbaouni, M. (2006). Tire manufacturing supported by virtual environment. *In Virtual Reality International Conference 06*, Laval, France.

[PERFRV, 2004] PERFRV (2004). Perfrv : Le bureau d'études du futur, plateforme anr/rntl (décembre 2002 à décembre 2004). http ://www.perfrv.org/.

[PERFRV2, 2008] PERFRV2 (2008). Perfrv2 : L'humain virtuel au travail dans l'usine du futur, plateforme anr/rntl (décembre 2005 à décembre 2008). http ://www.perfrv2.fr.

[Peroche *et al.*, 1998] Peroche, B., Ghazanfarpour, D., Mechelucci, D. et Roelens, M. (1998). *Informatique graphique, méthodes et modèles*. Hermes Sciences Publication, seconde édition revue et augmentée édition.

[Piaget, 1936] Piaget, J. (1936). *La Naissance de l'intelligence chez l'enfant*. rééd. Delachaux & Niestlé 1977.

[Piaget, 1970] Piaget, J. (1970). *L'épistémologie génétique*. Que sais-je ? Presses Universitaires de France - PUF, Paris.

[Popper, 1959] Popper, K. R. (1959). *La logique de la découverte scientifique*. Editions Payot.

[Psyché *et al.*, 2003] Psyché, V., Mendes, O. et Bourdeau, J. (2003). Apport de l'ingénierie ontologique aux environnements de formations à distance. *sticef.org*, 10.

[Pylyshyn, 1984] Pylyshyn, Z. (1984). *Computation and cognition : Toward a foundation for cognitive science*. MIT Press.

[Rosenblatt, 1958] Rosenblatt, F. (1958). The perception : a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65(6): 386–408.

[Rosh, 1999] Rosh, E. (1999). *Reclaiming cognition : The primary of action, intention, and emotion*, chapitre Reclaiming concepts, pages 61–67. Imprint Academic : Thoverton, UK.

[Rousseaux et Thouvenin, 2008] Rousseaux, F. et Thouvenin, I. (2008). Expérience et connaissance. Rochebrune.

[Schiller, 2006] Schiller, G. (2006). *Arts, scènes et nouvelles technologies*, chapitre Qu'est-ce qu'est « le corps » ? Le champs kinesthésique et les chorégraphies interactives. L'Harmattan.

[Septseault, 2007] Septseault, C. (2007). *Représentation d'environnements virtuels informés et de leur dynamique par un personnage virtuel autonome en vue d'une crédibilité comportementale*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale.

[Shanon, 1994] Shanon, B. (1994). *The representational and the presentational : An essay on cognition and the study of mind*. Harvester Wheatsheaf.

[Sharkey et Ziemke, 1998] Sharkey, N. E. et Ziemke, T. (1998). A consideration of the biological and psychological foundations of autonomous robotics. *Connect. Sci.*, 10(3-4):361–391.

[Slater *et al.*, 2006] Slater, M., Antley, A., Davison, A., Swapp, D., Guger, C., Barker, C., Pistrang, N. et Sanchez-Vives, M. V. (2006). A virtual reprise of the stanley milgram obedience experiments. *PLoS ONE*, 1(1):e39.

[Stewart *et al.*, 1999] Stewart, J., Beredson, B. et Druin, A. (1999). A single display groupware : A model for co-present collaboration. *In Human Factor in Computing Systems (CHI'99)*, pages 286–293. ACM Press.

[Sutton, 1977] Sutton, V. (1977). Sutton movement shorthand ; writing tool for research. *In National Symposium on Sign Language Research & Teaching*, Chicago, Illinois, USA.

[Thouvenin *et al.*, 2002] Thouvenin, I., Abel, M., Ramond, B. et Qamhiyah, A. (2002). Environment improvements for a better cooperation in multi-culture collaborative mechanical design. *In CSCWD 2002*, Rio de Janeiro, Brazil.

[Tisseau, 2001] Tisseau, J. (2001). *Réalité virtuelle : autonomie in virtuo.* Mémoire d'habilitation à diriger les recherches,, Université de Rennes I (France).

[Varela, 1979] Varela, F. J. (1979). *Principles of biological autonomy.* North Holland (New York).

[Varela *et al.*, 1993] Varela, F. J., Thomson, E. et Rosch, E. (1993). *L'inscription corporelle de l'esprit, La couleur des idées.* Seuil.

[Viaud-Delmon *et al.*, 2002] Viaud-Delmon, I., Berthoz, A. et Jouvent, R. (2002). Multisensory integration for spatial orientation in trait anxiety subjects : absence of visual dependence. *European Psychiatry*, 17:194–199(6).

[von Laban, 1971] von Laban, R. (1971). *The mastery of movement.* Plays ; Enlarged 3rd edition.

[Warren, 2006] Warren, W. H. (2006). Enactive perception : Sensorimotor expectancies or perception-action invariants ? *In the 3rd international conference on enactive interfaces*, Montpellier, France.

[Waterworth, 2002] Waterworth, J. (2002). *Cognition et Création : Explorations cognitives des processus de conception*, chapitre Conscience, action et conception de l'espace virtuel : relier les technologies de l'information, l'esprit et la créativité humaine, pages 119–149. Pierre Mardaga, Bruxelles.

[Watt et Watt, 1991] Watt, A. et Watt, M. (1991). *Advanced animation and rendering techniques.* ACM, New York, NY, USA.

[Yoshioka *et al.*, 2004] Yoshioka, M., Umeda, Y., Takeda, H., Shimomura, Y., Nomaguchi, Y. et Tomiyama, T. (2004). Physical concept ontology for the knowledge intensive engineering framework. *Advenced Engineering Informatics*, 18:95–113.