

# APPORTS DES SYSTEMES TUTORIAUX INTELLIGENTS ET DE LA REALITE VIRTUELLE A L'APPRENTISSAGE DE COMPETENCES

Cédric BUCHE \*, Ronan QUERREC \*, Pierre CHEVAILLIER \*, Gilles KERMARREC \*\*

Centre Européen de Réalité Virtuelle  
25 rue Claude Chappe - BP 38F - 29280 Plouzané

\* [buche,querrec,chevaillier]@enib.fr

\*\* gilles.kermarrec@univ-brest.fr

---

## Résumé

*Cet article s'intéresse aux systèmes informatiques destinés à la formation. Nous montrons l'intérêt de la Réalité Virtuelle (RV) et des Systèmes Tutoriaux Intelligents (ITS) pour l'apprentissage de compétences. Les ITS permettent de représenter, sous la forme de modèles, les informations sur le domaine, l'apprenant, l'interface et la pédagogie. Ils analysent les activités de l'apprenant et proposent des assistances pédagogiques individualisées. La RV est définie selon trois axes : autonomie, interaction et immersion. L'autonomie permet la variabilité des contextes, ce qui constitue une condition nécessaire à la construction de compétences transférables. Nous évaluons l'intégration des ITS dans les Environnements Virtuels de Formation (EVF) existants selon trois niveaux : les EVF n'intégrant aucun des modèles des ITS, ceux qui possèdent un modèle du domaine et/ou de l'apprenant, enfin ceux qui utilisent en plus un modèle pédagogique. Nous montrons que cette intégration est actuellement limitée.*

## Abstract

*This article concerns computer systems aimed at training. We show the interest of Virtual Reality (VR) and Intelligent Tutoring Systems (ITS) for the construction of new competences. The ITS allow to represent, using models, information on the domain, the student, the interface and pedagogy. They analyze the student activities, and suggest individualized educational assistances. The VR is defined using three points: autonomy, interaction and immersion. The autonomy allows the context variability, necessary for the construction of competences. We evaluate the ITS integration in existing Virtual Environments for Training (VET) using three levels: VET that do not integrate any ITS models, those possessing a domain and/or a learner model, and finally those integrating a pedagogical model. We show that this integration is still limited.*

## Introduction

De nombreux domaines de formation, tels que la conduite automobile ou la formation des pompiers professionnels, nécessitent la mise en situation des apprenants ; ceux-ci doivent acquérir non seulement des connaissances, mais encore de véritables compétences. La compétence se caractérise par un pouvoir d'agir, permettant d'être efficace dans un ensemble de situations, au sein d'un domaine de référence. Pour devenir progressivement efficace en situation, l'apprenant doit apprendre par l'action (Nguyen-Xuan, 1995). La mise en action des apprenants peut s'avérer coûteuse (d'un point de vue matériel) ou risquée (d'un point de vue humain). C'est le cas quand il s'agit d'apprendre à agir et à réagir face à des accidents (non respect des règles habituelles de l'environnement routier par un des conducteurs), des événements peu prévisibles (un enfant traverse la route de façon inopinée), des dysfonctionnements (panne matérielle ou effondrement psychologique d'une personne lors d'une intervention risquée). Cette compétence consistant à résoudre des problèmes en situation dynamique (incertaine, évolutive, et à forte contrainte temporelle) est particulièrement difficile à aborder par une formation classique : étude de cas, proposition de règles générales, instructions relatives à des scénarios probables... Au contraire, la simulation informatique permet d'immerger les apprenants dans les environnements où ils peuvent essayer, choisir, prendre des initiatives, échouer et recommencer.

Cet article positionne la simulation informatique, et plus particulièrement la réalité virtuelle, comme situation de formation. Si on représente, comme le propose Houssaye (1988), la situation de formation selon trois pôles : l'apprenant, la compétence à acquérir (objet du savoir) et le formateur, la simulation informatique fournit un environnement commun à ces trois éléments. Elle médiatise la relation d'apprentissage (apprenant-compétence), la relation didactique (formateur-compétence) et la relation pédagogique (formateur-apprenant). Nous faisons ici l'hypothèse que le transfert des compétences acquises en environnement simulé vers l'environnement réel dépend notamment de la relation apprenant-compétences (apprentissage) et de la relation apprenant-formateur (pédagogique). Dans cet article, nous soutenons que l'intégration des capacités des systèmes tutoriaux intelligents (ITS) au sein de la réalité virtuelle favorise ces relations, et par conséquent l'acquisition de compétences transférables. Nous montrons que l'intégration d'ITS dans les environnements virtuels de formation (EVF) est aujourd'hui partielle mais offre des perspectives intéressantes.

Notre article s'articule autour de quatre parties. La première partie étudie dans quelle mesure la simulation informatique permet de favoriser l'apprentissage de compétences. Cette analyse nous amène dans la partie 2 à présenter les systèmes tutoriaux intelligents. Dans la partie 3, après avoir défini la réalité virtuelle, nous précisons son apport au transfert d'apprentissage. Cela nous permet, dans la partie 4, d'aboutir à l'évaluation de l'intégration des ITS au sein des EVF existants.

## 1. Modèles informatiques et apprentissage

Dans quelle mesure la simulation informatique permet-elle de favoriser l'apprentissage de compétences ? Nous étudierons la relation entre simulation informatique et apprentissage de compétences à l'aune des théories de

l'apprentissage (psychologie cognitive). Celle-ci nous conduit notamment à placer l'individualisation pédagogique et le problème du transfert au centre de nos préoccupations.

### 1.1. L'apprenant au centre du système de formation

Les différents modèles théoriques de l'apprentissage ont directement influencé la production de systèmes informatiques de formation.

Dès le début du vingtième siècle, l'apprentissage est décrit comme une succession d'essais et d'erreurs, permettant d'associer un stimulus et la bonne réponse (Pavlov, 1935). Plus tard, Skinner contribue à l'évolution du conditionnement classique en mettant en évidence le « conditionnement opérant » (Skinner, 1958 ; Skinner, 1974) : ces travaux inspirent directement les premières « machines à enseigner ». Ces systèmes de formation prennent comme principe la décomposition d'une connaissance ou d'un concept en éléments plus simples ; chaque élément est ensuite présenté successivement à l'apprenant par un système de questions-réponses. Cet « enseignement programmé », est linéaire (les informations sont présentées séquentiellement à l'apprenant) et « *matériau-centré* » (les informations nécessaires au système reposent uniquement sur le programme de connaissances à acquérir).

Crowder permet une évolution de l'enseignement programmé à l'aide d'une machine sophistiquée. Celle-ci contient des rouleaux de films sur lesquels sont fixées des séquences d'instructions multiples (Crowder, 1959). Contrairement à Skinner, il considère que les erreurs commises par un apprenant doivent être prises en considération. Crowder préconise d'utiliser les erreurs en imaginant un mécanisme qui prévoit les corrections : l'enseignement assisté par ordinateur devient algorithmique et non plus linéaire, et l'activité de l'apprenant commence à être prise en compte.

Dans les années soixante, les « machines à enseigner » laissent place aux premiers systèmes d'enseignement informatique (Bruillard, 1997). Les logiciels d'Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO) s'attachent principalement à améliorer les connaissances des apprenants, en leur demandant de résoudre certains problèmes. L'approche cognitive symbolique perçoit l'apprentissage comme un processus de représentation et d'interprétation du contexte. En résolvant les problèmes proposés par les systèmes d'EAO, le sujet augmente progressivement sa base de données. Contemporain de l'approche symbolique, le constructivisme piagétien s'intéresse également aux structures internes du sujet, cependant Piaget considère l'apprentissage comme un processus interactif de construction des connaissances par expériences successives, en relation avec un environnement (Piaget, 1974). Cette adaptation que l'on appelle aussi apprentissage, nécessite un sujet actif. Ainsi, il ne peut y avoir apprentissage sans action (Hoc, 1990), ce qui est essentiel pour apprendre à agir et à réagir face à un environnement, bref pour devenir compétent. Les systèmes informatiques qui se rapprochent de ce courant de pensée sont qualifiés d'Environnements Interactifs d'Apprentissage par Ordinateur (EIAO) car ils sont susceptibles d'évoluer, de se modifier en fonction des réussites et des échecs de l'apprenant. De plus en plus perfectionnées, ces machines sont qualifiées d'intelligentes : quand elles sont en mesure de raisonner sur le domaine enseigné et de s'adapter aux caractéristiques de chaque apprenant, on parle de système d'Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur (EIAO).

Cette perspective « *pédo-centrée* » conduit, au sein d'environnements informatiques, à valoriser l'accompagnement individualisé de l'apprenant. Cette médiation entre un objet d'apprentissage et un apprenant, que l'on nomme « pédagogie », peut prendre différentes formes telles que des personnages autonomes simulés (tuteurs, compagnons, trouble-fête...), des bilans individualisés de performances, des suggestions de solutions au problème...

Valoriser la pédagogie, c'est valoriser l'interaction dans le processus d'apprentissage. Dans cette perspective *socio-constructiviste* (Bruner, 1983), le développement de nouvelles compétences repose sur la qualité de l'aide, de la médiation offerte par l'environnement de formation qui doit permettre à l'apprenant de réaliser des tâches qu'il ne peut pas, pour l'instant, réaliser seul (Vygotski, 1985).

## **1.2. Transfert d'apprentissage et environnements informatiques de formation**

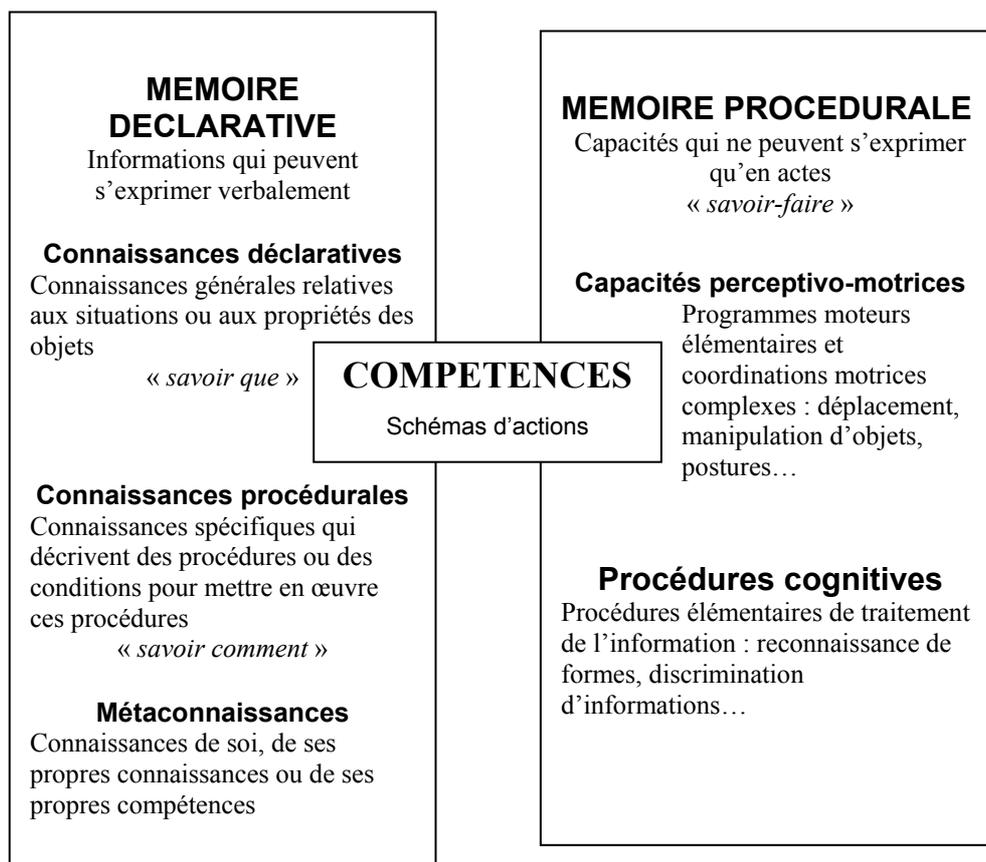
De façon complémentaire, depuis la fin des années 1970, l'évolution des modèles théoriques de l'apprentissage, conduit à reconnaître l'importance des « effets de contexte » (Richard, 1990). Nourrie des modèles béhavioristes (conditionnement, loi de l'effet, Thorndike, 1932) et du constructivisme piagétien (le sujet se construit par l'expérience), l'approche connexionniste décrit l'apprentissage comme un processus de mise en relation d'informations en mémoire à long terme (Mc Clelland *et al.*, 1987). La diversité des expériences de l'apprenant crée des interférences entre les situations données à vivre, ce qui favorise l'oubli des différences et l'abstraction des invariants, des éléments communs aux diverses situations. Apprendre consiste à mettre en résonance des blocs d'informations (les scripts, scénario, schéma) communes aux contextes internes (connaissances et habiletés disponibles, émotions...) et externes (consignes, informations visuelles...) de l'apprentissage.

Dans cette perspective, toute action est donc située et la compétence nécessite un processus d'adaptation permettant l'émergence d'actions singulières dans des contextes eux-mêmes singuliers (Varela, 1989). Si toute acquisition en mémoire est liée, connectée spécifiquement à la situation de formation (notion d'encodage spécifique, Tulving, 1976), comment la compétence d'un apprenant en situation de simulation informatique peut-elle être transférée à des situations réelles ? Le transfert d'apprentissage désigne l'influence d'une acquisition sur une autre acquisition, une sorte de recontextualisation d'une connaissance ou d'une compétence (Tardif, 1999). Le transfert devient d'autant plus aléatoire que les contextes d'activation de la compétence (situations réelles) sont perçus comme éloignés du contexte d'apprentissage (simulation).

D'un point de vue théorique, différentes conditions d'apprentissage favorables au transfert peuvent être définies en fonction des caractéristiques de la compétence visée (Mendelsohn, 1994).

## **1.3. Composants de la compétence et conditions d'apprentissage**

La compétence nécessite l'acquisition de savoir-faire et des savoir-dire ou connaissances, afin de les mobiliser « en action », dans un domaine professionnel (De Montmollin, 1984 ; De Terssac, 1996). Ces savoir-faire et ces connaissances constituent des objectifs de formation.



**Figure 1** — Les composants de la compétence, à partir d'une figure de Wall (1986).

Les *savoir-faire* mettent en jeu le corps (les capacités perceptivo-motrices : coordonner un déplacement, maintenir une posture de sécurité...) ou permettent d'agir sur l'environnement symbolique (procédures cognitives de choix dans les situations risquées, procédures de traitement de l'information dans les situations incertaines, reconnaissance de formes). Ces composants sont stockés en mémoire procédurale (voir figure 1). Ils se développent prioritairement par l'action et par répétition. Plus précisément, la répétition de situations variées et aléatoires permet de construire un savoir-faire adaptable.

Complémentairement, à cette manifestation « en acte », la compétence au sein d'un domaine repose aussi sur la possibilité d'explicitier, de décrire des opérations et des conditions permettant d'être efficace. Ce « *savoir que faire* » (De Terssac, 1996) ou « *savoir comment faire* » (George, 1983), ces informations utiles pour diriger l'action (règles d'actions) sont stockées en mémoire déclarative et sont parfois qualifiées de *connaissances procédurales*. D'autres informations verbalisables peuvent concerner l'action ou son contexte de réalisation (« *savoir que* ») mais sans en influencer la

réalisation ; elles sont désignées par le terme de *connaissances déclaratives* (les règles générales de fonctionnement d'un système, les aspects théoriques d'un domaine, les principes de sécurité...).

Les connaissances procédurales peuvent être acquises par instruction. Elles peuvent aussi se construire dans l'action ou lors d'une mise à distance de l'action : réflexion sur ses réponses, confrontation entre apprenants, consultation de sources d'informations complémentaires face à un problème. Les connaissances déclaratives (plus générales, moins dépendantes des situations) nécessitent souvent un apport d'informations extérieures ; elles sont importantes dans une formation dans la mesure où elles favorisent le transfert des connaissances procédurales, et par conséquent la compétence, dans différentes situations, voire au-delà du domaine initial de formation.

Enfin, certaines connaissances constitutives de la compétence concernent le sujet lui-même, et pas uniquement le domaine de référence. Les *métaconnaissances* (Flavell, 1985) désignent ces informations que l'apprenant intègre à propos de ses propres connaissances ou de ses propres compétences. Elles sont accessibles à la conscience si on sollicite chez l'apprenant un processus métacognitif : auto-évaluation, autoscopie, analyse de sa propre activité... Cette connaissance de soi est particulièrement importante pour devenir compétent dans des contextes « coûteux » pour l'apprenant (risque, charge émotionnelle) qui justifient l'utilisation de la formation par simulation sans « mise en danger » objective.

La compétence se manifeste par la possibilité d'agir et de réagir de façon contextualisée tout en étant adaptable, efficace dans des situations variées au sein d'un domaine de référence. Former un individu compétent nécessite donc qu'il puisse transférer ce potentiel d'action du contexte de simulation, vers diverses situations réelles. Les procédures pédagogiques les plus favorables au transfert d'apprentissage sont dépendantes des composants de la compétence considérés comme « dominants ».

Certaines compétences reposent essentiellement sur des savoir-faire (De Terssac, 1996), dans ce cas le transfert des apprentissages procéduraux peut être favorisé par « la variation systématique et aléatoire des contextes » (Mendelsohn, 1994).

D'autres compétences mobilisent prioritairement des connaissances procédurales et déclaratives, elles nécessitent un « *savoir-juger* » (Perrenoud, 1996). Le transfert nécessite ici une mise à distance de l'action, un effort de prise de conscience des procédures et de leurs conditions d'utilisation. Par exemple, on peut favoriser le transfert, si dès la situation d'apprentissage de la compétence, on informe l'apprenant des analogies entre le contexte de la formation et le contexte de réinvestissement : notion de « transfert informé » (Gick et Holyoak, 1983).

Pour articuler ces deux approches du transfert d'apprentissage, le concept de schéma d'action nous paraît heuristique. Le schéma d'action désigne un « pouvoir agir », qui repose sur des relations potentielles entre des informations en mémoire à long terme (Richard, 1990). Les propriétés des schémas d'action sont intéressantes pour le formateur. Les relations entre les informations sont potentielles, ce qui confère une adaptabilité au schéma. Dès qu'une information est activée, l'activation se « propage » aux différents éléments du schéma, ce qui permet une mise en action rapide, automatique. Enfin, le schéma articule des savoir-faire et des connaissances. Soit on valorise les composants procéduraux du schéma, et la répétition de situations variées permet l'émergence de compétences spécifiques, mais souples, adaptables.

Soit on privilégie les composants déclaratifs du schéma et l'apport d'informations générales sur le domaine favorise l'élaboration d'une compétence générale, de haut niveau (savoir-juger).

Enfin, quelques soient les domaines professionnels, on reconnaît aujourd'hui la dimension sociale de la compétence : l'apprenant doit agir et réagir avec d'autres et en fonction des décisions d'autrui (Vergnaud, 1995). Deux niveaux d'interactions sociales (deux niveaux de compétences) peuvent être distingués : ajuster son activité individuelle à l'activité collective ; articuler, organiser son activité avec celle du groupe (De Terssac, 1996). Penser au transfert, c'est alors penser l'apprentissage en « communauté de pratiques » (Mendelshon, 1994), c'est repenser la simulation comme situation d'interactions sociales.

Quelques soient les objectifs de formation, le transfert d'apprentissage n'est-il pas la contradiction essentielle à résoudre pour les environnements informatiques de formation ?

#### 1.4. EIAH et compétences

Nous venons de montrer, d'une part que les environnements informatiques de formation doivent proposer une aide pédagogique adaptée aux apprenants, et d'autre part qu'il est nécessaire de mettre le transfert des compétences au cœur des préoccupations de toute formation par simulation informatique. Il s'agit maintenant de s'interroger sur les solutions que peut apporter un environnement informatique de formation pour répondre à ce double objectif.

L'EIAH regroupe les travaux portant sur les Environnements Informatiques ou Interactifs pour l'Apprentissage Humain (Balacheff, 1998). Il est défini comme « *un environnement informatique conçu dans le but de favoriser l'apprentissage humain [...]. Ce type d'apprentissage mobilise des agents humains [...] et artificiels [...] et leur offre des situations d'interaction [...] ainsi que des conditions d'accès à des ressources formatives.* » (Tchounikine et al., 2004). Les travaux sur la conception des EIAH portent sur plusieurs facettes que nous regroupons selon trois catégories.

- Les *hypermédias* visent à faciliter l'accès aux ressources pédagogiques. Ils regroupent les outils permettant la conception et mise en page de présentations multimédia destinées à l'Internet ou à un intranet. L'hypermédia n'impose pas de parcours, mais permet à l'apprenant de naviguer entre les données. Apprendre consiste alors à s'informer, ce qui renvoie à une conception cognitive symbolique. On peut douter que la mémorisation de ces données verbales, ces connaissances liées à un domaine suffise à la construction d'une réelle compétence. En effet, dans les situations professionnelles complexes, le passage à l'action ne peut être considéré comme la simple conséquence d'une base de connaissances.
- Les *micromondes* simulent des situations d'apprentissage. Ce sont des systèmes informatiques ouverts permettant à l'apprenant (ou l'utilisateur) d'explorer un domaine ou un dispositif avec un minimum de contraintes de la part du système, en combinant des opérations élémentaires généralement analogues à des schémas familiers (déplacement, construction, sélection, etc.). Les micromondes reprennent le principe *constructiviste* d'un apprentissage par expérience, reprise en soulignant l'apport d'une pédagogie centrée sur la découverte et l'intérêt. Le rôle du professeur consiste à proposer un environnement structuré et riche afin que l'apprenant découvre par lui-même les

contradictions et ainsi invente de nouvelles structures. Cette conception de l'apprentissage est très présente dans l'enseignement scientifique : par exemple, Papert (1981) propose d'utiliser les micromondes comme outils d'enseignement. L'objectif pédagogique assigné à ces environnements est souvent ambitieux. L'élève doit apprendre en faisant, voire apprendre à apprendre. Il se sert de l'environnement pour s'adapter et stabiliser de nouveaux savoir-faire, mais il est aussi censé réfléchir sur ses propres connaissances et ses propres stratégies d'apprentissage (acquisition de métaconnaissances). Cependant, les micromondes ne proposent pas d'aides pédagogiques. Ces systèmes éliminent donc d'emblée ce qui est aujourd'hui reconnu comme un vecteur essentiel d'apprentissage: la médiation, le guidage, l'accompagnement (Bruner, 1983).

- Les *Systèmes Tutoriaux Intelligents* (ITS : *Intelligent Tutoring System*) fournissent une assistance aux différents acteurs de l'apprentissage (apprenant ou formateur). Ils s'appuient sur les techniques de l'Intelligence Artificielle (IA) pour représenter des connaissances et effectuer un raisonnement. Ils visent à produire des systèmes qui simulent un enseignant humain, en ajoutant des capacités de résolution (d'où l'adjectif Intelligent), lui permettant ainsi de solliciter l'apprenant lorsque ce dernier commet une erreur dans la résolution d'exercice (d'où l'adjectif Tutorial). Dès lors, on peut définir un ITS comme étant un système qui permet à l'environnement de formation de s'adapter à la diversité des apprenants. Il peut donner aux EIAH les moyens de leur finalité principale : faire acquérir des compétences dans un domaine particulier, en fournissant des informations individualisées. Il permet aussi de faire réfléchir chaque apprenant sur la façon dont il s'y est pris (méthode) pour résoudre le problème (apprendre à apprendre). Enfin, un ITS peut fournir au formateur un ou plusieurs *scenarii* pédagogiques, particulièrement adaptés à chaque apprenant. La section suivante présente ces systèmes, décrit leurs composantes et leur utilisation pour la formation.

## 2. Systèmes tutoriaux intelligents

Les ITS forment un courant particulier de l'EIAO qui a pour principe l'individualisation dans la formation. L'idée est d'introduire un système qui prête attention aux besoins spécifiques de l'apprenant, évalue et diagnostique ses problèmes, et fournit l'aide nécessaire. Ainsi, les ITS répondent à la nécessité de placer l'apprenant « au centre de la situation d'apprentissage ».

### 2.1. Présentation

Les ITS offrent des capacités de raisonnement et de résolution, passant par le recueil de l'expertise et de connaissances sur l'apprenant. Ils évaluent les connaissances acquises par l'apprenant, en comparant ses activités et les informations sur le domaine, ils proposent alors des assistances adaptées. L'assistance est de différentes natures : suivi des activités de l'apprenant, analyse des difficultés de l'apprenant, instructions pour aider l'apprenant dans la relation d'apprentissage compétence-apprenant, propositions d'intervention pédagogique destinées au formateur (relation pédagogique formateur-apprenant), etc.

La conception de tels systèmes fait intervenir des spécialistes de l'IA, du domaine enseigné et de l'enseignement (Zampa, 2003). Chacun a un rôle à jouer dans les composantes du système.

## 2.2. Composantes des systèmes tutoriaux intelligents

Un ITS est décrit en utilisant plusieurs fonctions ou composantes majeures (Wenger, 1987). Ainsi, un ITS est composé de modèles, chacun jouant un rôle particulier et contribuant à la prise de décision de l'ITS. Les premiers ITS étaient composés d'une expertise sur le domaine, d'une expertise sur ce qui doit être appris et d'une représentation de ce que l'apprenant a appris ou pas. Burns et Capps (1988) identifient ces composantes comme les trois modèles d'un ITS. Ils correspondent au « module de l'expert » (Anderson, 1988), au « module de diagnostic de l'apprenant » (VanLehn, 1988) et au « module d'instruction et de curriculum » (Halff, 1988). Plus tard, un quatrième modèle est venu s'ajouter au trois premiers, le « module d'interface » qui permet de représenter les connaissances dans l'environnement. Les quatre modèles d'un ITS, identifiés dans (Woolf, 1992) sont :

- le *modèle du domaine*, représentant la connaissance de l'expert sur le domaine ;
- le *modèle de l'apprenant*, permettant d'établir l'état de ses connaissances à un instant donné ;
- le *modèle pédagogique*, permettant d'effectuer des choix d'aides pédagogiques en fonction du comportement et du modèle de l'apprenant ;
- le *modèle d'interface*, permettant l'échange d'informations entre le système et l'utilisateur.

### 2.2.1. Modèle du domaine

Le modèle du domaine représente l'expertise de l'enseignant sur le domaine. Il est aussi appelé modèle de l'expert puisqu'il définit les connaissances d'un expert dans un domaine de connaissance. Il contient non seulement une description des compétences à acquérir, mais aussi une représentation de la compétence à construire.

Le modèle du domaine doit être en mesure de générer des solutions aux problèmes dans le même contexte que celui où se trouve l'apprenant, afin que les réponses respectives puissent être comparées. Ainsi le système est en mesure de déterminer les différences et correspondances entre les actions de l'apprenant et celles qui sont attendues. Enfin, les connaissances sur le domaine permettent de générer des explications relatives à la solution de l'expert.

Les réseaux sémantiques (Quillian, 1968), les réseaux à propagation de marqueurs (Fahlman, 1979), les graphes conceptuels (Sowa, 1984) ou les « *frames* » (Minsky, 1975) permettent de représenter les connaissances. Il est possible de manipuler et d'interpréter cette connaissance, ce qui revient à simuler le savoir-faire (représentation exécutable) tel qu'il est défini en figure 1.

### 2.2.2. Modèle de l'apprenant

Le modèle de l'apprenant apporte une mesure des connaissances de l'apprenant sur le problème (Leman *et al.*, 1996 ; Py, 1998 ; Webber et Pesty, 2002). Il est aussi appelé modèle de diagnostic puisque qu'il permet de mesurer la progression de l'apprenant. Ce modèle doit contenir une représentation du profil de l'apprenant, établie et mise à jour soit par un dispositif hors ligne (questionnaire par exemple), soit directement à partir des interactions que l'apprenant opère avec son environnement.

La modélisation de l'apprenant est un problème difficile (Bruillard, 1997). Zampa (2003) formalise le modèle comme un quadruplet (P,C,T,H) où P représente le savoir-faire ou les procédures disponibles, C les connaissances déclaratives et procédurales, T les traits individuels (profil cognitif) et H l'historique de l'apprenant. Self offre une clarification sur son rôle et son usage. Ce modèle permet de répondre à quatre types de questions (Self, 1988) :

- que *peut faire* l'apprenant ?
- que *sait-il* ou que *sait-il sur « le faire »* ?
- quel *type* d'apprenant est-il ?
- qu'a *déjà fait* l'apprenant ?

Répondre à ces quatre questions permet d'évaluer les compétences de l'apprenant. Le modèle offre alors au système la possibilité de s'adapter à l'apprenant. Plusieurs méthodes existent.

- Le *Model Tracing* compare les étapes effectuées par l'apprenant et les étapes existantes dans les règles procédurales définies dans le modèle du domaine. Cette approche a été utilisée par le tuteur LISP (Anderson et Reiser, 1985) ;
- Le *Issue Tracing* est une modification du *Model Tracing*. Ce modèle n'a pas pour but de modéliser le processus de résolution du problème mais plutôt de déterminer ce qu'il reste à apprendre à partir d'une mise à jour des compétences acquises par l'apprenant. Le tuteur WEST a utilisé cette méthode (Burton et Brown, 1982).
- Les *systèmes experts* analysent les réponses de l'apprenant afin de mettre à jour le modèle de l'apprenant. GUIDON a utilisé cette méthode (Clancey, 1983).

### 2.2.3. Modèle pédagogique

Le modèle pédagogique permet de définir les médiations visant à aider l'apprenant dans le processus d'apprentissage. Il permet de simuler le comportement décisionnel d'un enseignant. Il doit considérer des principes éducatifs, pédagogiques (Davies *et al.*, 2001) et psychologiques. Il se base sur les modèles de l'apprenant et du domaine. L'objectif principal du modèle pédagogique est de répondre à trois questions (Wenger, 1987 ; Lourdeaux, 2001) : *pourquoi ? quand ? comment ?*

- *Dans quel but intervenir ?* Il s'agit de définir l'objectif spécifique de chaque intervention, c'est-à-dire acquérir une connaissance ou acquérir un savoir-faire. L'objectif peut aussi être de privilégier des acquisitions liées au domaine ou d'envisager l'acquisition d'une démarche, d'une stratégie d'apprentissage réinvestissable dans divers domaines.
- *Quand intervenir ?* Le modèle pédagogique détermine quand une intervention est souhaitable, si l'apprenant doit être interrompu ou pas. L'intervention peut survenir à différents moments : suite à des erreurs commises, avant les erreurs pour mettre en avant les risques d'erreurs, suite à des questions de l'apprenant, etc. Déterminer *quand* intervenir est une décision subtile. Pour guider un apprenant, il est parfois plus efficace de le laisser chercher pendant un moment que de l'interrompre à chaque fois. D'un autre côté, livré à lui-même, l'apprenant serait probablement perdu.

- *Comment intervenir ?* Différentes méthodes peuvent être envisagées :
  - la méthode *socratique*, où le système interroge l'apprenant afin de l'encourager à analyser ses propres erreurs, utilisée par SCHOLAR (Collins *et al.*, 1975) et WHY (Stevens *et al.*, 1982) ;
  - la méthode du *learning by doing*, où le système aide l'apprenant en l'incitant à sélectionner des informations en référence au modèle du domaine ;
  - la méthode du *learning while doing*, où le système reste en tâche de fond et donne seulement des conseils ponctuellement ;
  - la méthode du *coaching*, où le système laisse l'apprenant agir et attend jusqu'à ce qu'il demande de l'aide, utilisée par SOPHIE (Brown *et al.*, 1975), WUMPUS (Stansfield *et al.*, 1976) et WEST.

Pour s'inscrire dans la dynamique de l'évolution des conceptions de l'apprentissage, le modèle pédagogique proposé par les environnements informatiques de formation devrait pouvoir proposer un apprentissage basé sur l'interaction entre plusieurs personnes au sein du système de formation. L'apprentissage serait alors interactif et constructif. Dans cette perspective, quelques études s'inspirent des modèles socio-constructivistes, qui utilisent les interactions sociales et mettent en œuvre un apprenant et deux participants simulés : le tuteur et un autre apprenant (Chan et Baskin, 1990). Plus récemment, une autre stratégie pédagogique propose de simuler un apprenant « trouble-fête » qui va aider ou perturber l'apprenant humain (Aïmeur *et al.*, 2000). Dans les deux cas, les notions de coopération ou de compétition, de conflit socio-cognitif (Aïmeur *et al.*, 2001) jouent un rôle important dans le processus d'apprentissage.

#### 2.2.4. Modèle d'interface

Le modèle d'interface (ou modèle d'interaction) est en charge de la liaison entre la représentation interne du système et une interface ergonomique pour l'apprenant (Wenger, 1987). Il est en coopération avec le diagnostic et la didactique du système. Une de ses fonctions est de finaliser la forme par laquelle le système transmet une information. En effet, même si le modèle pédagogique décide du déroulement et du contenu des actions didactiques, le modèle d'interface prend quant à lui en charge sa forme finale.

Pour définir ce modèle, on cherche à modéliser l'interaction humain-machine, c'est-à-dire les communications bidirectionnelles entre l'apprenant et le système (Miller, 1988). Plus précisément, comment peut-on étudier l'activité d'un apprenant face à un ordinateur ? A la suite des modèles déjà anciens de Schiffrin et Schneider (1977) ou de Rasmussen (1986), Richard (1996) propose de concevoir l'interaction sujet-environnement d'un point de vue théorique à partir d'une double modalité de contrôle de l'activité : le contrôle externe *versus* le contrôle interne.

D'une part, l'activité, ici l'apprentissage, est l'objet d'un *contrôle interne*, volontaire, coûteux en attention, où le sujet oriente son apprentissage de façon stratégique en vue d'atteindre son but (Kermarrec *et al.*, 2004). On considère qu'un utilisateur active volontairement un système d'aide s'il dispose de connaissances sur ses propres compétences (métaconnaissances), autrement dit, s'il est capable d'identifier ses difficultés. On peut rappeler ici le rôle essentiel des ITS qui, en fournissant aux apprenants des bilans individualisés, favorisent cet engagement volontaire dans

l'apprentissage et peuvent déclencher une réflexion du sujet sur « comment apprendre efficacement avec un ordinateur ? ».

D'autre part, l'activité du sujet est orientée par un *contrôle externe*, automatique, rapide, qui s'effectue à partir d'une activation directe des informations de la mémoire à long terme par des informations contextuelles : les affordances. Le rôle des affordances dans l'interaction sujet-machine peut être décrit à partir du modèle « perception-action » ou modèle de la perception directe initié par Gibson (1958). Même si Gibson a circonscrit le champ d'application de son modèle à l'étude des actions motrices finalisées (locomotion vers un but, évitements d'obstacles, freinage, interception de mobiles) ce qui en fait un modèle particulièrement intéressant pour comprendre l'émergence de compétences motrices, la psychologie écologique a développé de nombreuses applications et le concept d'affordance a pris une place importante dans le domaine de la simulation informatique. Ce modèle « écologique » n'est pas initialement un modèle de l'apprentissage, mais il décrit le fonctionnement économique d'un sujet confronté à un environnement dynamique (incertain et complexe).

Cette double modalité du contrôle implique une communication bidirectionnelle entre l'apprenant et le système.

- Du *système vers l'apprenant*. L'interface se définit au travers des médias utilisés, de sa composition (Depover *et al.*, 1998), mais aussi en fonction de la hiérarchisation des informations. Définir le type de média à utiliser pour traduire l'information conduit à privilégier l'immersion dans un environnement multisensoriel. Les interfaces immersives utilisées en réalité virtuelle proposent une interaction multimodale intéressante. L'utilisateur est immergé dans l'environnement (gant de données, casque stéréoscopique...). Se pose alors le problème de la difficulté d'adaptation aux utilisateurs pour leur proposer des interfaces réellement « affordantes ». Par exemple, certaines personnes sont plus réceptives à une interface purement visuelle, d'autres sonore, etc. Le concepteur de l'interface peut s'appuyer sur le modèle de l'apprenant pour déterminer à quel type de stimulus l'utilisateur sera le plus réceptif. Pour cela, on pourra utiliser des modèles (Card *et al.*, 1983) prédisant les performances des utilisateurs (Zorola, 1995) et permettant de mesurer les critères d'utilisabilité des interfaces (Nielsen, 1993 ; Coutaz, 1994).
- De *l'apprenant vers le système*. La comparaison d'un écart, ou dissonance, entre un but et un résultat active une boucle de régulation de l'activité de l'apprenant et provoque une communication de l'apprenant vers le système. Chez Norman (1980) l'intention, le but ou le motif d'agir est associé à l'allocation de ressources attentionnelles, à la recherche d'informations en mémoire à long terme ou à la reconnaissance de formes, à la détection d'éléments contextuels susceptibles de l'aider à accomplir sa tâche. Lorsque l'apprenant se trouve en environnement virtuel, il a une ou plusieurs activités à accomplir. Celles-ci peuvent se décomposer en activités élémentaires que Fuchs (1996) propose d'appeler Primitives Comportementales Virtuelles (PCV). Ces primitives peuvent être regroupées en quatre catégories décomposées : observer le monde virtuel, se déplacer dans le monde virtuel, agir sur le monde virtuel et communiquer avec autrui. Quand apprendre est une activité volontaire, recherchée par l'apprenant, ce dernier va progressivement mémoriser et organiser ces « primitives » en stratégies efficaces (Flavell, 1985) pour réduire l'écart au but

initial dans ce monde virtuel (autorégulation ou contrôle volontaire de l'apprentissage).

### 2.3. Systèmes tutoriaux intelligents pour la formation

L'efficacité de tels systèmes a été montrée (Shute et Regian, 1990), la plupart du temps en comparant deux groupes d'apprenants dans un environnement de formation bénéficiant ou non de l'assistance des ITS. Par exemple, une expérimentation a contrôlé des apprenants utilisant le tuteur LISP (Anderson, 1990). Elle montre qu'ils terminent leurs exercices 30 % plus rapidement que ceux qui reçoivent une formation traditionnelle. L'examen final montre une différence 43 % en terme de résultat entre les deux méthodes (Ong et Ramachandran, 2000).

Nombre de méthodes traditionnelles d'instruction utilisent les ITS pour présenter à l'apprenant des faits et des concepts. Ces méthodes sont efficaces en exposant des grandes quantités d'information et en examinant la compréhension de l'apprenant (souvent par des questionnaires de contrôle). Cependant, ils inculquent souvent « une connaissance inerte » : les apprenants acquièrent les connaissances demandées (savoir), mais ils ne sont pas capables de les appliquer correctement (savoir-faire). Ces méthodes ne sont pas adaptées à l'apprentissage de compétences.

En revanche, les systèmes qui emploient les simulations et d'autres environnements fortement interactifs offrent la possibilité d'appliquer les connaissances. Ces environnements actifs les aident à mettre en œuvre leur savoir en situation. Ces simulations, combinées avec un ITS, ont la possibilité d'améliorer les compétences des apprenants puisqu'ils associent connaissances et savoir-faire.

Les environnements interactifs de simulation partagent nombre de principes de la réalité virtuelle. Grâce à des périphériques adaptés, cette dernière fournit des interactions naturelles et une meilleure immersion dans le modèle simulé, une meilleure « présence » en somme (Fuchs *et al.*, 2003). Mais la réalité virtuelle ne doit pas être considérée uniquement sous ses aspects technologiques (*i.e.* uniquement par la spécificité du modèle d'interface qu'elle offre). Elle a déjà été considérée comme une technologie pouvant améliorer l'apprentissage dans les EIAH (Lourdeaux, 2001 ; Querrec, 2002) et offrant un véritable *plus* pour l'apprentissage et le transfert (Burkhardt *et al.*, 2003 ; Winn, 2002), ce que nous développerons maintenant.

## 3. Réalité Virtuelle

La réalité virtuelle est une discipline des sciences de l'ingénieur qui concerne la conception et la réalisation d'environnements virtuels participatifs. Elle est exploitée dans différents domaines industriels, dont la formation. A l'origine simple extension des techniques de synthèse d'images (fixes ou en séquences), elle est devenue interdisciplinaire en rassemblant divers champs des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines et sociales. Avant d'analyser son utilisation pour la formation, il convient de préciser les caractéristiques essentielles et les limites d'un système de réalité virtuelle.

### 3.1. Définitions

D'un point de vue opérationnel, la réalité virtuelle se définit comme un système composé d'éléments logiciels et matériels simulant l'interaction réaliste d'un humain avec des objets virtuels qui sont des modélisations informatiques d'objets réels ou imaginaires (Fuchs *et al.*, 2003). Le mot virtuel (du latin *vertus* : vertu, force) qualifie ici la chose en puissance (qui a en soi toutes les conditions de son actualisation), par opposition à l'actuel (qui est en acte, ici et maintenant). Indépendamment de son statut d'actuel ou de virtuel, l'objet peut être réel ou possible (imaginable). Ainsi est levée l'apparente opposition entre réel et virtuel.

Comme toute réalité, la réalité virtuelle est accessible au sujet humain par trois types de médiations indissociables (Tisseau, 2001) :

- la *médiation des sens* : l'objet est-il accessible à nos sens ? Il est alors perçu ;
- la *médiation de l'action* : réagit-il à nos sollicitations ? Il est alors expérimenté ;
- la *médiation de l'esprit* : peut-on s'en construire une représentation mentale ? L'objet est alors imaginé (modélisé).

L'objectif d'un système de réalité virtuelle est de faire éprouver des expériences au sujet humain (Deutsch, 2003). La spécification du système consiste, entre autre, à préciser comment cette triple médiation est exploitée. La conception du système définit quant à elle les supports de ces médiations : les générateurs d'images (visuelles, sonores, olfactives), les capteurs et actionneurs pour détecter les actions du sujet, et enfin les algorithmes de calcul des modèles. Pour Deutsch, les deux premiers points sont des problèmes finis que la technologie saura résoudre à court ou moyen terme et le défi se situe dans la programmation du comportement des environnements que les utilisateurs peuvent expérimenter, c'est-à-dire la manière dont l'environnement agit, par lui-même, et réagit aux actions de l'utilisateur.

Deutsch pose la question des limites de la réalité virtuelle : indépendamment de toute contrainte technologique, quel type d'environnement la réalité virtuelle peut-elle simuler ? Pour y répondre, l'auteur fait la distinction entre les expériences externes et les expériences internes. Par exemple, un pilote effectuant deux vols sur un simulateur vit deux expériences externes très semblables : il voit le même paysage, il rencontre le même orage et l'avion réagit de la même façon. En revanche, ses expériences internes sont différentes : il est beaucoup moins surpris par l'orage au cours du deuxième vol et il ne le vit pas de la même manière. Cela constitue une première limite de la réalité virtuelle : on ne peut pas programmer un système de réalité virtuelle de façon à produire une expérience interne donnée chez un utilisateur.

Il distingue ensuite les expériences physiquement possibles ou impossibles, puis celles qui sont logiquement possibles ou impossibles. Certaines expériences physiques sont impossibles parce qu'un système de réalité virtuelle est avant tout un dispositif physique, il est donc soumis aux lois de la physique. Par exemple, un simulateur de vol ne peut pas restituer une expérience d'apesanteur. Enfin, même artificiellement, on ne peut reproduire des expériences logiquement impossibles, comme décomposer le nombre sept qui est premier.

La conclusion de cette analyse est que les limites théoriques de la réalité virtuelle sont du même type que celles d'un système réel. D'un point de vue opérationnel, elles se déplacent. D'un côté certaines situations ne sont pas reproductibles en

simulation et d'un autre côté les limites du réel sont repoussées car, en s'affranchissant de l'actualisation des situations, la réalité virtuelle évacue *de facto* bon nombre de contraintes techniques et contingentes. Ainsi, on peut faire atterrir autant de fois que nécessaire un avion en un temps record et sans refaire le plein de carburant (contraintes de temps et de ressources). On peut voir les pistons d'un moteur se mouvoir au travers de son carter (contraintes d'accessibilité). On peut s'entraîner au renvoi de service avec un partenaire de tennis qui frappe la balle toujours de la même façon (contraintes de maîtrise des conditions initiales et de reproductibilité).

### 3.2. Composantes de la réalité virtuelle

Un système de réalité virtuelle se distingue d'une autre application informatique par la sensation d'être dans le monde virtuel et d'y agir. Cette notion de présence de l'utilisateur dans l'environnement virtuel a donc deux composantes : l'immersion, généralement multisensorielle, et l'interaction. Pour être complet, un environnement virtuel ne doit pas seulement assurer cette présence de l'utilisateur, il faut aussi « qu'il s'y passe quelque chose », et pas seulement en résultat d'une action de l'utilisateur. Les objets de l'environnement doivent donc avoir un comportement autonome. Cette notion d'autonomie est essentielle pour associer au rendu multisensoriel de l'informatique graphique, le rendu comportemental nécessaire en réalité virtuelle.

Tisseau et Harrouet (2003) envisagent trois axes pour caractériser un système de réalité virtuelle : (A, I, I) pour Autonomie, Interaction et Immersion. Tout système informatique peut se positionner dans ce repère qui délimite un cube de côté 1 (figure 2). Cette figure traduit bien les deux dimensions de la notion de présence (Interaction et Immersion).

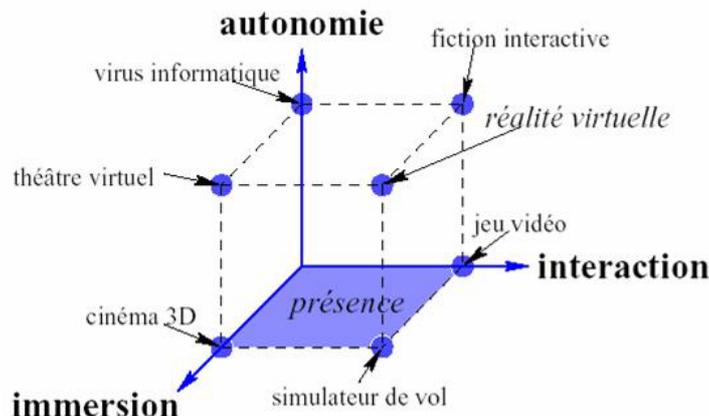


Figure 2 — Présence et autonomie (Tisseau et Harrouet, 2003).

Analysons les situations extrêmes qui correspondent aux sommets de ce cube auxquels on associe à titre d'illustration des exemples « idéaux ».

Conférer de l'autonomie à un système, c'est accepter un partage du contrôle de son évolution entre l'utilisateur et les modèles numériques qui le composent (Tisseau, 2001). Cette définition correspond à celle de l'U-autonomie, autonomie vis-à-vis de l'utilisateur, donnée par Carabelea *et al.* (2003). La définition générale que donnent

ces auteurs de l'autonomie est la suivante : « un agent  $X$  est autonome par rapport à  $Y$  pour  $P$  dans un contexte  $C$ , si dans  $C$ , son comportement par rapport à  $P$  n'est pas imposé par  $Y$  ». Une conséquence de l'autonomie est que, dans un certain contexte  $C$  et par rapport à un objet  $P$ , le comportement de  $X$  n'est pas calculable par  $Y$  et donc non prédictible. Selon l'axe  $A$ , on passe d'un système complètement sous le contrôle de son utilisateur à un système complètement autonome (sous le contrôle de ses modèles), donc sur lequel on n'a plus de contrôle (au moins directement). Un cas extrême est un virus informatique mutant qui est complètement hors de contrôle de « l'utilisateur » dont l'ordinateur est infecté, qui n'offre aucune interaction et dans lequel on ne peut s'immerger : aucune médiation n'est possible pour appréhender son comportement. Ses coordonnées dans le repère  $(A, I, I)$  sont  $(1,0,0)$ . Fort heureusement, à notre connaissance, une telle entité n'existe pas encore (ce serait un « idéal » pour un concepteur de virus) !

Suivant le deuxième axe, on augmente les possibilités d'interagir avec le système. Un système en  $(0,1,0)$  est par exemple un jeu vidéo tel que ceux de première génération (pensons au célèbre ping-pong). Le système est fortement interactif, il réagit aux sollicitations du joueur, mais ne fait rien de sa propre initiative (il n'a aucune autonomie) et l'immersion est pour le moins réduite.

Le troisième axe reflète la sensation d'immersion dans le système qui est liée au fait que l'environnement est directement (« naturellement ») accessible par les sens. En  $(0,0,1)$ , on est par exemple dans une salle de cinéma, entouré d'images, la salle est équipée d'un système de son spatialisé avec éventuellement des sièges sur vérin : on est littéralement dans le film, mais on n'agit pas sur le cours de l'histoire et le système est sous contrôle (quelle que soit la séance, on voit toujours le même film).

Un simulateur de vol se situe en  $(0,1,1)$ . Son comportement est imposé et les situations qu'il permet d'expérimenter sont finies (même si le nombre de combinaisons est énorme). L'accent est principalement mis sur le réalisme du rendu associé à une immersion totale (le pilote est dans une cabine en tout point identique à une cabine réelle) et sur l'interactivité, donc sur la présence de l'utilisateur dans le monde simulé. Cela passe par la définition d'interfaces comportementales performantes.

En  $(1,0,1)$  se situe le théâtre virtuel : les humains virtuels que sont les acteurs improvisent en partie leurs jeux et peuvent avoir des réactions différentes aux actions des autres acteurs ; leur comportement n'est donc pas totalement sous le contrôle du scénariste. De ce fait, le déroulement effectif de la pièce n'est pas calculable *a priori* et l'utilisateur se voit offrir un contexte différent à chaque représentation : il vit une expérience externe différente à chaque fois.

Le système extrême se situe évidemment en  $(1,1,1)$ . On est immergé dans un environnement que l'on perçoit par différents sens ; on peut l'expérimenter par la médiation de l'action ; ce monde perçu et expérimenté agit plus ou moins indépendamment de soi et pour le comprendre, et donc continuer à interagir avec lui, il faut s'en construire une représentation mentale afin de « calculer » soi-même son propre comportement. Le sujet expérimente alors le monde par les trois médiations, il est spectateur, acteur et créateur au sein d'un environnement de réalité virtuelle « idéal ».

### 3.3. Réalité virtuelle et formation

Le repère (A, I, I) fournit un cadre pour le positionnement des applications informatiques vis-à-vis de l'utilisation qui est faite de la réalité virtuelle. Il ne s'agit bien sûr que d'un positionnement relatif et imprécis : il s'agit d'identifier de quelle face ou de quel sommet telle application est la plus proche. Néanmoins, cette analyse permet de mieux cerner les intérêts de la réalité virtuelle pour la formation, notamment sous l'angle du transfert de compétences.

Les premiers systèmes d'EAO sont les plus proches du point (0,0,0) et le glissement vers les EIAO (I comme Interactif) traduit bien un déplacement sur le deuxième axe vers le sommet (0,1,0). L'immersion dans la situation d'apprentissage est faible (celle-ci est de ce fait peu réaliste) ; le comportement du système est parfaitement prédictible et répétitif ; l'interaction consiste le plus souvent à sélectionner une réponse et d'obtenir un *feed-back* (précalculé). Ces systèmes sont donc intéressants pour enseigner des savoir-faire, des procédures contextualisées, mais qui s'avéreront peu transférables.

Les systèmes d'EAO multimédia jouent sur l'axe Immersion : on propose à l'apprenant des images, des documents sonores ou des vidéogrammes qui sont statiques (précalculés) ; ils sont donc proches du sommet (0,0,1) ; l'interaction est du même ordre que dans les systèmes d'EAO.

Les logiciels d'autoformation pour les enfants sont en général dans la région (0,1/2,1/2) du cube : l'interactivité est plus ou moins forte et l'immersion généralement faible ; la sensation de présence est peu développée et le reproche souvent formulé à leur égard est que les enfants ont parfois du mal à « entrer » dans la situation. Les potentialités de transfert de compétences sont donc faibles car la signification ou la perception de la situation d'apprentissage est éloignée des significations que peuvent prendre les situations réelles.

Les simulateurs de conduite, et plus généralement les micromondes, sont en (0,1,1). Le réalisme du rendu sensoriel et comportemental est fort. On exploite alors le processus de renforcement, ce qui favorise l'acquisition de savoir-faire. Le transfert d'apprentissage dépend alors du réalisme et de la variabilité des contextes proposés par le simulateur.

Plus un EVF est proche du sommet (1,1,1), plus l'apprenant est confronté à des situations variables et à un monde complexe. Cette variabilité (apportée par l'autonomie de certaines entités dans certains contextes) est doublement intéressante pour construire, par abstraction, des nouveaux schémas d'action adaptables. Soit l'apprentissage est procédural quand il s'agit d'acquérir des compétences où des savoir-faire sont dominants, soit l'apprentissage peut être déclaratif quand la compétence requiert un effort de compréhension, la mobilisation de connaissances.

Assez peu d'études portent directement sur le transfert des compétences acquises en situation de simulation en réalité virtuelle vers des situations réelles (Wilson, 1999). Si la situation de simulation permet d'apprendre, elle ne permet pas toujours le transfert d'apprentissage (Kozak *et al.*, 1993). Toutefois, les résultats sont particulièrement encourageants quand il s'agit de construire un espace (Regian *et al.*, 1992), de mémoriser des localisations (Witmer *et al.*, 1996 ; Johnson, 1994), d'apprendre à piloter un hélicoptère (Johnson et Wightman, 1995), d'adopter des conduites d'urgence (Bliss *et al.*, 1997), d'acquérir des habiletés sensori-motrices

(Rose *et al.*, 2000), ou lorsqu'on vise des compétences exigeantes du point de vue des facteurs cognitifs, affectifs et des capacités sociales (Depover *et al.*, 1998). Ce qui caractérise ces études, c'est l'étroite dépendance entre l'efficacité de la formation et les conditions d'apprentissage proposées aux sujets, ce qui souligne bien le rôle que pourraient jouer les ITS dans la relation apprenant-compétence.

#### **4. Intégration des modèles des systèmes tutoriaux intelligents dans les environnements virtuels de formation**

Cette partie unifie les ITS et la réalité virtuelle dans les EIAH. Nous étudions dans quelle mesure les environnements virtuels de formation actuels intègrent les modèles des ITS présentés précédemment. Nous montrons quels sont les apports engendrés pour la formation. Afin de structurer cette présentation, nous proposons *trois catégories* d'environnement virtuel. Cette division se base sur les modèles des ITS qu'ils intègrent.

La première catégorie (section 4.1) regroupe les applications n'intégrant aucun de ces modèles. Aucun raisonnement sur le domaine d'apprentissage ne peut alors être proposé par le système. De même, n'ayant pas de représentation de l'apprenant, le système ne peut adapter l'environnement. Enfin, n'ayant pas de connaissances pédagogiques, il ne peut guider l'apprenant dans son apprentissage, et ne peut pas aider le formateur à organiser ses sessions de formation. Ces environnements offrent tout de même la possibilité d'appréhender et de manipuler l'environnement comme dans le réel. Ils sont alors destinés à l'acquisition de savoir-faire.

La deuxième catégorie d'environnements virtuels pour la formation (section 4.2) est constituée des applications intégrant un modèle du domaine et/ou un modèle de l'apprenant. Le système peut alors adapter l'environnement à l'apprenant, lui proposer des explications sur le sujet de la formation et agir à sa place. Ces systèmes sont également capables d'assister le formateur dans le suivi et l'évaluation de l'élève. Ils permettent donc, non seulement de manipuler l'environnement et de favoriser l'acquisition de savoir-faire, mais également d'accéder à des connaissances sur le sujet de la formation. Il s'agit là des deux composantes de la compétence. Néanmoins, le système ne dispose pas de connaissances pédagogiques qui lui aurait permis de décider (aide à l'apprenant) ou de suggérer (assistance au formateur) quand, comment et pourquoi intervenir lors de la session de formation.

La dernière catégorie (section 4.3) rassemble les environnements virtuels qui présentent non seulement les modèles du domaine et de l'apprenant, mais également un modèle pédagogique. Ainsi, le système peut s'adapter à l'apprenant et lui proposer des aides, et également intervenir de manière autonome pour favoriser chez l'apprenant l'acquisition de compétences transférables.

##### **4.1. Environnements n'intégrant aucun des modèles**

Le premier niveau d'utilisation de la réalité virtuelle dans la formation est représenté par les simulateurs. Aucun des modèles présentés précédemment n'est représenté explicitement dans le système. Les connaissances sur le domaine, utilisées lors de la simulation ou lors de la phase de paramétrage, ne sont pas réifiées (aucune représentation interne) (Winn, 1993), il n'est donc pas possible pour le système de raisonner dans un but pédagogique. Enfin, l'utilisation de tels outils est de la

responsabilité du formateur ; c'est lui qui doit gérer les *scenarii* ou les niveaux de difficultés, même si certaines de ces simulations fournissent des outils pour l'aider. Les exemples les plus connus et utilisés sont issus de la formation professionnelle, nous en étudions ici quelques uns. Ces applications se placent selon le repère (A, I, I) proposé en section 3 en un point (0,1,1).

EDF R&D développe un atelier d'aide à la maintenance et à la conduite des ponts polaires. Le « projet polaire » simule l'utilisation d'une grue pour la manutention de charges dans le bâtiment réacteur des centrales nucléaires (Levesque, 2003). Le pontier, n'ayant pas toujours la visibilité sur la charge qu'il transporte, doit communiquer avec le chargé de manœuvre. Le pontier est immergé dans l'environnement par le biais d'un visiocasque et d'une console à leviers contrôlant la grue. Le chargé de manoeuvre est représenté par un avatar contrôlé par un *joystick* ou par une commande vocale. Le simulateur permet de représenter les conséquences qui découleraient de certains choix de manutention (voir figure 3). Il s'agit pour le formateur d'observer, d'accompagner et d'évaluer plutôt que de transmettre des connaissances. Dans cet environnement, l'objectif pédagogique n'est pas la manipulation de la grue, mais la communication entre les différents acteurs de la tâche à réaliser.



**Figure 3** — Le projet polaire vu par le chef de manoeuvre (Levesque, 2003).

Thalès Training & Simulation propose un simulateur de formation, dans lequel l'objectif est de former à l'utilisation d'un outil professionnel et de mettre l'apprenant en conditions réelles ou extrêmes. Ce simulateur est destiné à la conduite de poids lourds TRUST 800 (<http://www.tsl.co.uk/products/roads.htm> accédé le 01/04/05). Il est présenté comme un outil au service de la pédagogie, puisque le formateur peut créer des situations particulièrement dangereuses. L'apprentissage se déroule en trois parties. La première phase correspond à un apprentissage de base de la conduite. La seconde permet le transfert en situation réelle, le simulateur est utilisé pour reprendre des apprentissages non acquis. La dernière développe les compétences comportementales liées à des événements dangereux ou critiques (déversement de camion, verglas, etc.). Après chaque utilisation, une phase de « débriefing » est organisée favorisant la prise de conscience et la représentation des comportements, ce qui devrait favoriser le développement d'une compétence généralisable, un savoir « juger les risques ».

Ces deux derniers environnements sont destinés à la formation professionnelle, il existe également des environnements virtuels pour l'éducation scolaire. L'application EVE (Environnements Virtuels pour les Enfants) est un environnement virtuel destiné aux enfants de classes primaires (Popovici *et al.*, 2004). Il concerne l'apprentissage de la lecture, la compréhension de l'écrit et la construction de phrases. Il forme

également les enfants au travail en équipe faisant coopérer des enfants de Roumanie, du Maroc et de France *via* Internet. Lors de la phase de reconstruction de phrase (voir figure 4), le système indique à l'enfant si la position des mots est correcte ou incorrecte. Dans le premier scénario, les enfants travaillent en parallèle dans des salles différentes. Le second scénario propose aux enfants de se retrouver dans une salle commune et de reconstruire ensemble une histoire en utilisant un mécanisme de vote électronique. Les interactions sociales sont utilisées pour une prise de décision à la majorité (introduction au principe de démocratie). EVE permet des interactions sociales, des apprentissages coopératifs ou des conflits socio-cognitifs, favorables au développement de nouvelles compétences (modèle socio-constructiviste de l'apprentissage cf. section 1.3). Selon le repère proposé pour classer les environnements virtuels, EVE est plus proche de l'origine sur les axes immersion et interaction que les deux applications précédentes. La caractéristique principale de EVE est le partage de l'environnement virtuel par plusieurs utilisateurs.



**Figure 4** — L'application EVE (*Environnements Virtuels pour les Enfants*) propose aux enfants la reconstruction de phrase (à gauche en français, à droite en japonais) (Popovici et al., 2004).

Ces exemples d'environnements virtuels utilisent la simulation qui présente des avantages en terme de formation (Patrick, 1992 ; Gruau et al., 1998). En effet, elle permet de simuler des situations proche de la réalité, mais sans les contraintes de leur actualisation (Mellet d'Huart et al., 2001). De plus, des fonctionnalités supplémentaires à une simple reproduction de la réalité peuvent être ajoutées et ainsi fournir des outils pour la formation (gel de la situation, rejeu, répétition, etc.). Bien plus, l'apprenant intervient dans l'environnement informatique et peut observer les conséquences de son action. L'utilisation de cette information rétroactive est à la fois une caractéristique et une nécessité pour l'apprentissage par l'action (George, 1983). Ainsi, ces environnements favorisent l'apprentissage, cependant ils n'intègrent aucune possibilité d'assistance automatique élaborée. La responsabilité de la formation est déléguée aux formateurs. Même si certains environnements proposent des outils pour le formateur, ce dernier a la charge de leur intégration dans le cursus de l'apprenant. Or, dans la formation professionnelle, le formateur n'est pas souvent un pédagogue, mais un expert du domaine, il risque alors de peu se soucier de l'impact pédagogique de tels outils.

#### **4.2. Environnements intégrant les modèles du domaine et/ou de l'apprenant**

Un niveau plus élevé de l'utilisation de la réalité virtuelle pour la formation est représenté par les environnements intégrant un modèle du domaine et/ou de l'apprenant. Le modèle du domaine permet notamment de répondre automatiquement à des questions et d'effectuer une tâche à la place de l'apprenant. Comparant le modèle du domaine et le modèle de l'apprenant, le système est

capable de détecter des erreurs potentielles. Par contre, ces environnements n'intègrent pas de connaissances pédagogiques qui pourraient les guider pour réagir aux erreurs de l'apprenant.

MASCARET est un modèle permettant la création d'environnements virtuels de formation en situations réalistes et collaboratives (Querrec, 2002). Il permet de décrire l'environnement physique dans lequel l'apprenant évolue ainsi que son environnement social collaboratif. La dimension sociale n'est pas utilisée ici comme un moyen permettant de favoriser l'apprentissage, mais constitue un des éléments de la compétence à acquérir (cf. définition de la compétence section 1.3). MASCARET s'appuie sur la méthodologie des systèmes multi-agents pour représenter les éléments constituant ces environnements ainsi que leurs interactions. SécuRéVi (Sécurité et Réalité Virtuelle) est une application de MASCARET à la sécurité civile (Querrec *et al.*, 2003) (figure 5). Elle est destinée à la formation des officiers sapeurs-pompiers à la gestion opérationnelle et au commandement.



**Figure 5** — Exemple de scène dans SécuRéVi, d'après (Querrec *et al.*, 2003).

Les phénomènes mécaniques, chimiques et thermiques (feu, nuage de gaz...) subis ou influencés par l'apprenant sont modélisés sous forme d'un ensemble d'agents en interaction. Les influences entre les éléments constituant le phénomène sont fixés par l'expert du domaine et forment un graphe d'influence régi par une organisation d'agents. L'ensemble de ces organisations forme le modèle du domaine sur l'environnement physique. Ce modèle peut alors renseigner l'utilisateur (formateur ou apprenant) sur les liens de causalité entre phénomènes (le vent détermine la direction de propagation d'un nuage de gaz) et permet également au formateur de modifier le comportement de ces phénomènes (modification du sens du vent par exemple). L'environnement social est constitué des intervenants participant à la tâche collaborative qui doit être réalisée par l'apprenant. Cette tâche est définie par une procédure qui agence les actions à réaliser. MASCARET représente cet environnement social par une organisation multi-agents. Chaque intervenant (agent) y est représenté par le rôle qu'il joue dans l'organisation. Un rôle décrit l'ensemble des actions qui sont de la responsabilité de l'agent. La procédure ordonnance (avant, pendant...) les actions qui sont définies par leurs pré-conditions et post-conditions. L'ensemble de ces organisations forme alors le modèle du domaine sur l'environnement social. Le système fournit toutes les explications sur les actions, procédures et rôles de chaque équipe. Par conséquent, il est capable de fournir un raisonnement déductif et explicatif sur la procédure. L'apprenant peut prendre ou

rendre dynamiquement la main sur un agent qui devient alors son avatar. Ce dernier dispose alors des connaissances sur le domaine et connaît également les actions réalisées. Le modèle MASCARET permet donc de représenter explicitement les comportements et les interactions des agents. L'application SécuRéVi utilise cette capacité dans un but déductif, et non explicatif. Les agents peuvent agir de manière autonome dans l'environnement grâce à ces connaissances. Selon le repère proposé en section 3, SécuRéVi, et plus largement les applications dérivant de MASCARET, peuvent être placées aux coordonnées (1,1,1). Si Buche *et al.* (2004) ont montré que MASCARET représente efficacement le modèle du domaine et une partie du modèle de l'apprenant, il reste à définir le mécanisme permettant d'intégrer un raisonnement pédagogique.



**Figure 6** — STEVE explique et réalise une procédure, d'après (Rickel et Johnson, 1999).

STEVE est un agent virtuel animé (Rickel et Johnson, 1999). Il évolue avec l'apprenant dans un environnement conçu pour la formation à des tâches procédurales. STEVE fournit quelques aides pédagogiques automatisées. Il sait montrer la procédure, l'expliquer en répondant aux questions de l'apprenant, et surtout observer et valider (ou non) les actions de l'apprenant. STEVE a été appliqué à la formation de maintenance de moteurs de bateaux (figure 6). Il existe une version nommée ADELE intégrant des capacités d'apprentissage distant (Shaw *et al.*, 1999).

Dans STEVE, l'expertise du domaine est modélisée par un ensemble de tâches. L'exemple de la figure 7 montre une tâche définie par un ensemble d'actions atomiques ou de sous-tâches (`press-function-test ...`), de l'explicitation des effets des actions (`achieves test-mode...`) ainsi que leur ordonnancement (`press-function-test before check-alarm-light..`). Un texte est associé à chaque tâche et action, ce qui permet à STEVE de répondre aux questions de l'apprenant. Ainsi, si l'apprenant pose la question « Pourquoi ? », STEVE peut lui répondre ; si après cette réponse l'apprenant lui repose la même question, STEVE donne la réponse qui est associée à la tâche de niveau immédiatement supérieur. STEVE mémorise en permanence l'état du monde, ainsi il peut suivre l'évolution de l'apprenant pour le conseiller (« Que dois-je faire après ? »), lui expliquer (« Pourquoi ? ») ou exécuter lui-même l'action. Selon le repère (A, I, I), l'application STEVE s'approche des coordonnées (1,1,1) même si seul le tuteur est autonome et non le reste de l'environnement.

```

Task: functional-test
Steps: press-function-test, check-alarm-light, extinguish-alarm

Causal Links:
press-function-test achieves test-mode for check-alarm-light
check-alarm-light achieves know-wether-alarm-functional for end-task
extinguish-alarm achieves alarm-off for end-task

Ordering constraints:
press-function-test before check-alarm-light
check-alarm-light before extinguish-alarm
    
```

**Figure 7** — Exemple de tâche dans *STEVE*, d'après (Rickel et Johnson, 1999).

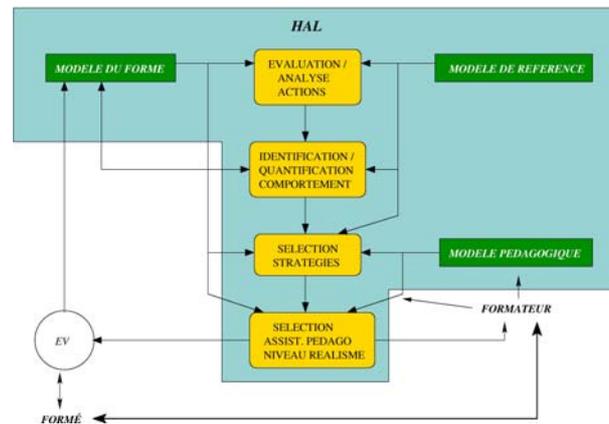
Par ces deux exemples, nous pouvons voir qu'une étape importante dans les environnements virtuels de formation est franchie, car ils permettent d'accéder aux connaissances du domaine et/ou sur l'apprenant. Ces informations peuvent être exploitées pour favoriser la relation d'apprentissage compétence-apprenant. Par exemple, dans le télescope *Hubble Space*, les informations du domaine permettent de colorer d'un vert intense les objets liés à la tâche à effectuer (Loftin et Kenney, 1995). De plus, les connaissances du domaine et celles portant sur l'apprenant peuvent être analysées automatiquement, pour diagnostiquer les erreurs de l'apprenant (Aka et Frasson, 2002) et en déterminer la cause. Plus généralement, elles permettent d'effectuer un suivi automatique de l'apprenant. Le formateur peut alors utiliser ces informations dans la relation pédagogique qui le lie avec l'apprenant. Toutefois, ces systèmes informatiques ne disposent pas de « compétences pédagogiques » leur permettant de prendre l'initiative de médiation au sein du processus enseigner-apprendre. Même si certains proposent une diversité d'outils pour des utilisateurs enseignants, ils seront considérés comme un outil pédagogique à part entière, quand ils pourront relayer l'intervention de l'enseignant et proposer, *en toute autonomie*, des aides pédagogiques adaptées à la diversité des apprenants.

### 4.3. Environnements intégrant les modèles de domaine, de l'apprenant et pédagogique

L'utilisation d'un modèle pédagogique permet, soit de remplacer le formateur pour une auto-formation (tuteur, système conseiller, aide), soit de lui apporter des aides et lui permettre de gérer plusieurs apprenants en même temps, ce qui correspond aux situations réelles.

*HAL (Helpful Agent for Learning)* est un agent pédagogique qui a été spécifié pour optimiser les processus d'apprentissage en environnement virtuel (Lourdeaux, 2001). Cet agent tutoriel permet de tirer parti de l'utilisation de la réalité virtuelle dans le cadre de la formation des conducteurs de TGV à l'intervention sur infrastructure ferroviaire à la SNCF (descente sur les voies et manipulation d'appareils de voie). Cette application s'approche des coordonnées (1,1,1) du repère (A, I, I) ; en effet, l'environnement est décrit à l'aide d'un système multi-agents. *HAL* aide les formateurs à construire un discours pédagogique en proposant deux types de « stratégies pédagogiques » adaptatives. Les premières modifient des aspects du scénario (pannes, conditions météorologiques, etc.). Les secondes fournissent des aides pour la compréhension de la situation (suggérer où le formé peut trouver la connaissance, expliquer une règle, montrer la conséquence de ses erreurs, etc.).

Ces stratégies peuvent être mises en œuvre grâce à différentes formes d'assistance pédagogique gérant différents niveaux de représentation (enrichissement, visualisation de mécanismes cachés, modélisation de concepts abstraits, etc.). HAL s'articule autour de la connaissance du formé (modèle du formé), de l'activité à apprendre (modèle de référence), des connaissances des stratégies d'enseignement (modèle pédagogique) et de la manière de les expliquer (module de diagnostic) (voir figure 8). La connaissance du formé est constituée des caractéristiques individuelles (niveau, expérience, profil, faculté), d'un historique de ses actions et d'une représentation de ses compétences initiales. La compétence à apprendre est composée d'un plan de tâches et de critères relatifs. Enfin, les stratégies pédagogiques utilisent des paramètres correspondants au type d'intervention et aux interventions pédagogiques. Le diagnostic compare le modèle du formé et le modèle de référence afin d'évaluer, d'analyser, d'identifier et de quantifier le comportement du formé.



**Figure 8** — Architecture de HAL (Helpful Agent for Learning), d'après (Lourdeaux, 2001).

Pour chaque comportement attendu ou problématique de tâche, les assistances pédagogiques et les niveaux de réalisme associés sont décrits (figure 9). Par conséquent, le formateur doit lister de manière exhaustive les comportements attendus (erreurs types) pour chaque connaissance. De plus pour chacune de ces erreurs (colonne 2), il doit préciser la manière dont les stratégies pédagogiques (colonne 3) sont réalisées par des assistances pédagogiques (colonne 4) et cela pour chaque exercice.

Tâche : T				
<b>Connaissances conceptuelles</b>				
Connaissance 1	Erreur A	Montrer la conséquence	Animation	
		Expliquer	Simplification	
		Suggérer connaissance	Décentrage	
	Erreur B	Etc.	Enrichissement	
		Expliquer	Animation	
		Montrer la conséquence	Décentrage	
Connaissance 2		Suggérer connaissance	Modification	
		Etc.		
<b>Connaissances procédurales</b>				
Connaissance 1	Erreur A	Expliquer	Enrichissement	

Figure 9 — Assistances pédagogiques associés aux stratégies et aux comportements dans HAL, d'après (Lourdeaux, 2001).

HAL commence par identifier le comportement du formé c'est-à-dire identifier la connaissance mise en jeu par ses activités. Il quantifie la maîtrise de cette connaissance par l'apprenant (calcul du critère de performance). Ce critère évolue en fonction des actions réalisées par l'apprenant et du temps. Lors de l'exercice, le formateur choisit une « méthode pédagogique » (explicative ou active). Pour chacune de ces méthodes, HAL propose une base de connaissances sur le choix des stratégies pédagogique, en fonction du niveau de l'apprenant et du critère de performance (figure 10). Dès que le critère de performance descend sous le seuil précisé dans cette base de connaissances (colonne 1), HAL sélectionne la stratégie suivante (en dessous). Par exemple dans le cas d'un débutant, après avoir « montré la connaissance », HAL « montre l'écart » puis « explique » et enfin « montre la conséquence ».

	Débutant	Intermédiaire	Confirmé
$Cp > S_{SRK1}$	Montrer la connaissance	Laisser faire	Laisser faire
$S_{SRK1} > Cp > S_{SRK2}$	Montrer l'écart	Suggérer la connaissance	Laisser faire
$S_{SRK2} > Cp > S_{SRK3}$	eXpliquer	Suggérer l'écart	Montrer la Conséquence
$Cp < S_{SRK3}$	Montrer la Conséquence	eXpliquer	eXpliquer

Figure 10 — Initialisation des stratégies liées au guidage pour la méthode explicative, d'après (Lourdeaux, 2001).

Le formateur n'a accès qu'à deux types de méthode pédagogique et le modèle doit être repensé si le pédagogue désire intégrer d'autres méthodes, ou stratégies pédagogiques. De plus, l'enchaînement de stratégies pédagogiques est figé et non accessible au formateur.

Cet exemple montre qu'actuellement les modèles pédagogiques dans les environnements virtuels de formation restent des modèles très *ad hoc* et ne sont pas forcément fondés sur des concepts issus de la pédagogie, mais plutôt sur des expertises de métiers.

## 5. Bilan et perspectives

L'objectif de l'article était d'évaluer l'intégration des ITS au sein de la réalité virtuelle dans une perspective d'apprentissage de compétences.

Nous avons présenté la réalité virtuelle comme un domaine prometteur pour concevoir des situations de formation à fort potentiel de transfert. Complémentairement, nous avons montré que les ITS permettent d'individualiser la relation apprenant-compétence (apprentissage) et de diversifier, au sein des EIAH, les relations formateur-apprenant (pédagogie). L'intégration des ITS au cœur de la situation de formation permet alors d'assister le formateur et d'aider l'apprenant. Plus précisément, l'utilisation de la réalité virtuelle permet la variabilité des conditions d'apprentissage et l'intégration des ITS l'adaptation à l'apprenant. Ces deux facteurs sont favorables, sur un plan théorique, au transfert de compétences acquises. Nous avons analysé quelques utilisations des ITS au sein des environnements virtuels de formation. La plupart n'incorporent que la représentation des connaissances sur le domaine. Pour les systèmes qui proposent un module de diagnostic, ils ne fournissent que très rarement un mécanisme d'assistance pédagogique. Nous considérons que HAL est le système le plus abouti. Néanmoins, le formateur doit lister les erreurs et préciser les stratégies pédagogiques pour chaque exercice.

Les travaux de recherche à venir devront s'orienter sur la définition d'un système tutorial intelligent au sein d'une application de réalité virtuelle. Les connaissances du modèle pédagogique et les expériences passées pourront être utilisées pour proposer automatiquement les interventions appropriées, en considérant l'apprenant et le contexte de simulation. Contrairement à une formation classique où les formateurs ne sont pas toujours des pédagogues ou des spécialistes de la réalité virtuelle (Lourdeaux, 2001), ce système permettrait de bénéficier d'une réflexion pédagogique simulée et d'utiliser toutes les potentialités de la réalité virtuelle. Nous pensons que la décision finale d'intervention devrait être du ressort du formateur, et non pas appliquée automatiquement, puisqu'il existera toujours des éléments qu'un programme informatique ne pourra prendre en compte : éléments de l'environnement, caractéristiques liés au groupe d'apprenants, vécus des apprenants, niveau de stress, interactions directes entre humains...

Complémentairement, des expérimentations sur les impacts de l'utilisation de la réalité virtuelle et des ITS sur l'acquisition de compétences devront être effectuées. En effet, si l'intérêt de l'utilisation des assistances fournies par les ITS dans un environnement virtuel de formation pour l'apprentissage a pu être vérifiée au travers de quelques applications (Loftin et Kenney, 1995 ; Thibault, 2002), les résultats des quelques évaluations réalisées à ce jour (voir section 3.3) témoignent de la difficulté d'identifier des conditions optimales d'apprentissage. Par exemple, une étude de Wilson (1999) cherche à évaluer l'efficacité respective de deux conditions d'apprentissage en réalité virtuelle. Dans une première, des sujets doivent mémoriser des objets et leur localisation dans un environnement tout en se déplaçant au sein de cet environnement virtuel (condition active). Dans une seconde, qualifiée de passive, les sujets observent simplement l'écran, à côté d'un sujet « actif ». Alors que l'auteur attendait des performances plus élevées dans des tests de rappel et de reconnaissance pour les sujets « actifs », les résultats de l'analyse de variance ne montrent aucune différence significative entre les deux groupes. Cette étude démontre toute la prudence avec laquelle on peut envisager de futures formations à l'aide d'environnements virtuels. Non seulement il est nécessaire de tester leur efficacité réelle dans la perspective de transférer des acquis vers le monde réel, mais

il reste encore à définir et à évaluer des conditions d'apprentissage optimales face à un ordinateur, ou des conditions d'apprentissage alternant des situations de simulations et des situations réelles. Cette variabilité des contextes au sein et autour de la situation simulée reste, actuellement et d'un point de vue théorique, une condition *sine qua non* du transfert de compétences.

## Remerciement

Les auteurs souhaitent remercier Karen Martinaud, tant pour sa disponibilité que pour la pertinence, toujours constructive, de ses remarques.

## Bibliographie

- Aka M., Frasson C. (2002). ASIMIL: overview of a distance learning flight-training system. *Actes Intelligent Tutoring Systems*. Biarritz, France. 484-495.
- Anderson J.R. (1988). The expert module. In Polson M.C., Richardson J. (éd.), *Foundations of Intelligent Tutoring Systems*, Hillsdale, NJ : Erlbaum. 21-53.
- Anderson J.R. (1990). Analysis of student performance with the lisp tutor. In Fredericksen N., Glaser R., Lesgold A., Shafto M. (éd.), *Diagnostic monitoring of skill and knowledge acquisition*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. 27-50.
- Anderson J.R., Reiser B.J. (1985). The lisp tutor. *Byte*. Vol. 10, 159-175.
- Aïmeur E., Frasson C., Dufort H. (2000). Cooperative learning strategies for intelligent tutoring systems. *Applied Artificial Intelligence*. Vol. 14, 465-489.
- Aïmeur E., Frasson C., Labonde M. (2001). The role of conflicts in the learning process. *ACM Journal of SIGCUE Outlook*. 27(2), 12-27.
- Balacheff N. (1998). Eclairage didactique sur les EIAH en mathématiques. *Colloque annuel du groupe de didactique des mathématiques du Québec*. 11-42.
- Bliss J.P., Tidwell P.D., Guest M.A. (1997). The effectiveness of virtual reality for administering spatial navigation training to firefighters. *Presence*. Vol. 6, 73-86.
- Brown J.S., Burton R.R., Bell A.G. (1975). SOPHIE: a step towards a reactive learning environment. *International Journal of Man-Machine Studies*. Vol. 7, 675-696.
- Bruillard E. (1997). *Les machines à enseigner*. Paris : Hermès.
- Bruner J.S. (1983). *Le développement de l'enfant. Savoir dire, savoir faire*. Paris : PUF.
- Buche C., Querrec R., De Loor P., Chevaillier P. (2004). MASCARET: a pedagogical multi-agent system for virtual environment for training. *International Journal of Distance Education Technologies*. 2(4), 41-61.
- Burkhardt J.M., Lourdeaux D., Mellet d'Huart D. (2003). *La conception des environnements virtuels pour l'apprentissage*. Le traité de la réalité virtuelle (Deuxième édition). Paris : Les Presses de l'Ecole des Mines.

- Burns H.L., Capps C.G. (1988). Foundations of intelligent tutoring systems: An introduction. In Polson M.C., Richardson J.J. (éd.), *Foundations of intelligent tutoring systems*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. 1-19.
- Burton R., Brown J.S. (1982). An investigation of computer coaching for informal learning activities. In Sleeman D., Brown J.S. (éd.), *Intelligent tutoring systems*. London : Academic Press.
- Carabelea C., Boissier O., Florea A. (2003). Autonomie dans les systèmes multi-agents. Essai de classification, *Actes des Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*. Hammamet, Tunisie. 191-204.
- Card S.K., Moran T.P., Newell A. (1983). *The Psychology of Human Computer Interaction*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Chan T., Baskin A. (1990). Learning companion systems. In Frasson C., Gauthier G. (éd.), *Intelligent tutoring systems: At the crossroads of artificial intelligence and education*. Norwood, NJ: Ablex. 6-33.
- Clancey W.J. (1983). Guidon. *Journal of Computer-Based Instruction*. 10(1), 8-14.
- Collins A., Warnock E.H., Passafiume J. (1975). Analysis and synthesis of tutorial dialogues. *The Psychology of Learning and Motivation*. Vol. 9, 49-87.
- Coutaz J. (1994). Evaluation technique. Exploring the intersection of HCI and Software engineering. *Workshop on Software Engineering and Human Computer Interaction*. 35-48.
- Crowder N. (1959). Automatic tutoring by means of intrinsic programming. In Galander E.H. (éd.), *Automatic Teaching: The State of the Art*. New York : John Wiley & Sons.
- Davies J., Gertner S., Lesh N., Rich C., Sidner C., Rickel J. (2001). Incorporating tutorial strategies into an intelligent assistant. *Actes 6<sup>th</sup> international conference on Intelligent user interfaces*. 53-56.
- De Montmollin M. (1984). *L'intelligence de la tâche*. Eléments d'ergonomie cognitive. Berne : Peter Lang.
- Depover C., Giardina M., Marton P. (1998). *Les environnements d'apprentissage multimédia*. Paris : L'Harmattan.
- De Terssac G. (1996). Savoirs, compétences et travail. In Barbier J.M. (éd.), *Savoirs théoriques et savoirs d'action*. Paris : PUF. 223-248.
- Deutsch D. (2003). *L'étoffe de la réalité*. Traduction F. Balibar. Paris : Cassini.
- Fahlman S. (1979). *Nett: A system for representing and using real-world knowledge*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Flavell J.H. (1985). Développement métacognitif. In Bideaud J., Richelle M. (éd.), *Psychologie développementale, problèmes et réalités*. Bruxelles : Mardaga.
- Fuchs P. (1996). *Les interfaces de la réalité virtuelle*. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris. 210 pages.
- Fuchs P., Arnaldi B., Tisseau J. (2003). *La réalité virtuelle et ses applications*. Le traité de la réalité virtuelle (Deuxième édition). Paris : Les Presses de l'Ecole des Mines.
- George C. (1983). *Apprendre par l'action*. Paris : PUF.
- Gibson J.J. (1958). Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *British Journal of Psychology*. Vol. 49, 182-194.
- Gick M.L., Holyoak K.J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*. Vol. 15, 1-38.

- Gruau J.Y., Doireau P., Poisson R. (1998). Conception et usage de la simulation. *Le Travail Humain*. Vol 61, 361-385.
- Half H.M. (1988). Curriculum and instruction in automated tutors. In Polson M.C., Richardson J.J. (éd.), *Foundations of intelligent tutoring systems*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. 79-108.
- Hoc J.M. (1990). Les connaissances concernant les procédures. In Richard J.F., Bonnet C., Ghiglione R. (éd.), *Traité de Psychologie Cognitive 2*. Paris : Bordas. 46-50.
- Houssaye J. (1988). *Le triangle pédagogique*. Berne: Peter Lang SA.
- Johnson D. (1994). Virtual Environments in Army Aviation Training. *Actes 8<sup>th</sup> Annual Training Technology Technical Group Meeting*. 47-63.
- Johnson D.M., Wightman D.C. (1995). Using virtual environments for terrain familiarization. *ARI Research Report 1668*. Alexandria: U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Kermarrec G., Todorovitch J., Fleming D. (2004). Investigation of the self-regulation components students employ in the physical education setting. *Journal of Teaching in Physical Education*. Vol. 23, 71-95.
- Kozak J.J., Hancock P.A., Arthur E.J., Chrysler S.T. (1993). Transfer of training from virtual relativity. *Ergonomics*. 36(7), 777-784.
- Leman S., Marcenac P., Giroux S. (1996). Un modèle multi-agents de l'apprenant. *Sciences et Techniques Educatives*. 3(4), 465-483.
- Levesque P. (2003). Creation and use of 3D as-built models at EDF. *Actes Fig working week 2003*.
- Loftin R.B., Kenney P. (1995). The use of Virtual Environments for Training the Hubble Space Telescope Flight Team. <http://www.vmasc.odu.edu/vetl/html/Hubble/virtel.html>.
- Lourdeaux D. (2001). *Réalité virtuelle et formation : conception d'environnement virtuels pédagogiques*. Thèse de doctorat, Informatique. Ecole des mines de Paris.
- McClelland J., Rumelhart D., Hinton G. (1987). Une nouvelle approche de la cognition : le connexionnisme. *Le Débat*. Vol. 47.
- Mellet d'Huart D., Richard P., Follut D. (2001). Virtual reality for education and training: State of science and typology of uses. *Actes VRIC 2001*. Laval, France. 47-55.
- Mendelsohn P. (1994). Le transfert des connaissances. *Conférence à l'Université de Lyon II*.
- Miller J.R. (1988). The role of human-computer interaction in intelligent tutoring systems. In Polson M.C., Richardson J.J. (éd.), *Foundations of intelligent tutoring systems*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. 143-189.
- Minsky M. (1975). A framework for representing knowledge. In Winston P.H. (éd.), *The psychology of computer vision*. New York : McGraw-Hill. 211-277.
- Nguyen-Xuan A. (1995). Les mécanismes cognitifs d'apprentissage. *Revue Française de Pédagogie*. Vol. 112, 57-67.
- Nielsen J. (1993). *Usability Engineering*. Boston : Academic Press.
- Norman D.A. (1980). Twelve issues for cognitive science. *Cognitive Science*. Vol. 4, 1-32.
- Ong J., Ramachandran S. (2000). Intelligent Tutoring Systems: The What and the How. *On line magazine Learning Circuits*.
- Papert S. (1981). *Jaillissement de l'esprit*. Paris : Flammarion.
- Patrick J. (1992). *Training: research and practice*. London: Academic Press.

- Pavlov I. (1935). Réflexe conditionné. *Grande encyclopédie médicale soviétique*.
- Perrenoud P. (1996). *Enseigner, agir dans l'urgence, décider dans l'incertitude*. Paris : ESF.
- Piaget J. (1974). *La prise de conscience*. Paris : PUF.
- Popovici D.M., Gerval J.P., Chevaillier P., Tisseau J., Serbanati L.D., Gueguen P. (2004). Educative Distributed Virtual Environments for Children. *Journal of Distance Education Technologies*. 2(4),18-40.
- Py D. (1998). Quelques méthodes d'intelligence artificielle pour la modélisation de l'élève. *Sciences et Techniques Educatives*. 5(2), 123-140.
- Querrec R. (2002). *Les systèmes multi-agents pour les environnements virtuels de formation. Application à la sécurité civile*. Thèse de doctorat, Informatique, Université de Bretagne Occidentale.
- Querrec R., Buche C., Maffre E., Chevaillier P. (2002). SecuRevi : Virtual environments for fire fighting training. *Actes VRIC 2003*. Laval, France. 169-175.
- Quillian M.R. (1968). Semantic memory. In Minsky M. (éd.), *Actes Semantic information processing*. Cambridge, Mass : MIT press. 227-270.
- Rasmussen J. (1986). *Information processing and human-machine Interaction: an approach to cognitive engineering*. Amsterdam: North-Hollands.
- Regian J.W., Shelbilske W.L., Monk J.M. (1992). Virtual reality: An instructional medium for visual spatial tasks. *Journal of Communication*. Vol. 42, 136-149.
- Richard J.F. (1990). *Les activités mentales*. Paris : Armand Colin.
- Richard J.F. (1996). Attention, contrôle et gestion des ressources. In Mellier D., VomHofe A. (éd.), *Attention et contrôle cognitif : mécanisme, développement des habiletés, pathologies*. Rouen : PUR.
- Rickel J., Johnson L. (1999). Animated agents for procedural training in virtual reality: Perception, cognition, and motor control. *Applied Artificial Intelligence*. Vol. 13.
- Rose F.D., Atree E.A., Perslow D.M., Penn, P.R. Ambhaipahan, N. (2000). Training in virtual environments : transfer to real word tasks and equivalence to real task training. *Ergonomics*. 43(4), 494-511.
- Schiffirin R.M., Schneider W. (1977). Controlled and automatized human information processing: perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*. Vol. 84, 127-190.
- Self, J. (1988). Student Models: What Use are they ? In Ercoli P., Lewis R. (éd.). *Artificial intelligence tools in education*. North-Holland: Elsevier Science Publishers B.V. 73-85.
- Shaw E., Johnson W., Ganeshan R. (1999). Pedagogical agents on the web. *Actes Third annual conference on autonomous agents*. 283-290.
- Shute V.J., Regian J.W. (1990). Rose garden promises of intelligent tutoring systems: Blossom or thorn ? *Space operations and research (soar) symposium*.
- Skinner B.F. (1958). Teaching machines. *Science*. Vol. 128, 969-977.
- Skinner B.F. (1974). *About behaviorism*. New York: Knopf.
- Sowa J.F. (1984). *Conceptual structures: Information processing in mind and machine*. Boston : Addison-Wesley.
- Stansfield J., Carr B., Goldstein I. (1976). *Wumpus advisor 1: a first implementation of a program that tutors logical and probabilistic reasoning skills* (Tech. Rep.). Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory.

- Stevens A., Collins A., Godin S.E. (1982). Misconceptions in students' understanding. In Sleeman D.H., Brown J.S. (éd.), *Intelligent Tutoring Systems*. London: Academic Press. 13-24.
- Tardif J. (1999). *Le transfert des apprentissages*. Montréal : Editions logiques.
- Tchounikine P., Baker M., Balacheff N., Baron M., Derycke A., Guin M., Nicaud J.F., Rabardel P. (2004). Platon-1 : quelques dimensions pour l'analyse des travaux de recherche en conception d'EIAH. *Rapport de l'action spécifique « fondement théorique méthodologique de la conception d'EIAH » département STIC du CNRS*.
- Thibault G. (2002). EDF : 5 ans d'expérience de formation avec la réalité virtuelle. Communication présentée lors de la session « Réalité virtuelle et formation : Une autre approche du réel ». *Conférence internationale de la réalité virtuelle*.
- Thorndike E. (1932). *The fundamentals of learning*. New York : Teachers College.
- Tisseau J. (2001). *Réalité virtuelle - autonomie in virtuo*. Habilitation à diriger des recherches, Informatique, Université de Rennes I.
- Tisseau J., Harrouet F. (2003). *Autonomie des entités virtuelles*. Le traité de la réalité virtuelle (Deuxième édition). Paris: Les Presses de l'Ecole des Mines.
- Tulving E. (1976). *Ecphoric in recall and recognition*. Recall and recognition. New York: Wiley.
- VanLehn K. (1988). Student modeling. In Polson M.C., Richardson J.J. (éd.), *Foundations of intelligent tutoring systems*. Hillsdale, NJ: Erlbaum. 55-78.
- Varela F. (1989). Autonomie et connaissance. *Essai sur le vivant*. Paris : Seuil.
- Vergnaud G. (1995). Dossier compétences : introduction. *Performances Humaines et Techniques*. 7-12.
- Vygotski L. (1985). *Pensée et langage*. Paris : Editions Sociales.
- Wall A.E. (1986). A knowledge-based approach to motor skill acquisition. *Motor development in children : aspect of coordination and control*. 33-50.
- Webber C., Pesty, S. (2002). Emergence de diagnostic par formation de coalitions - Application au diagnostic des conceptions d'un apprenant. *Actes Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents*. Lille : Hermes. 45-57.
- Wenger E. (1987). *Artificial intelligence and tutoring systems*. Los Altos, California: Morgan Kaufmann.
- Wilson P.N. (1999). Active exploration of a virtual environment does not promote orientation or memory for encountered objects. *Environment and Behavior*. 31(6), 752-763.
- Winn W. (1993). A Conceptual Basis for Educational Applications of Virtual Reality. Technical Publication R-93-9.
- Winn W. (2002). What can students learn in artificial environments that they cannot learn in class? *First International Symposium Open Education*.
- Witmer B.G., Bailey J.H., Knerr B.W., Parsons K.C. (1996). Virtual spaces and real world places: transfer of route knowledge. *International Journal of Human Computer Studies*. 45(4), 413-428.
- Woolf B.P. (1992). Building knowledge based tutors. *Actes ICCAL '92*. 46-30.
- Zampa V. (2003). *Les outils dans l'enseignement: conception et expérimentation d'un prototype pour l'acquisition par expositions à des textes*. Thèse de doctorat. Sciences de l'éducation, Université de Grenoble II.
- Zorola R. (1995). *L'évaluation des IHMs Multi-utilisateurs dans le Travail Coopératif*. Thèse de doctorat, Informatique, Université de Toulouse 1.

---

## Les auteurs



Cédric Buche a reçu le titre d'ingénieur en Juin 2002. Il a intégré l'équipe Simulation Participe et Immersive (SPI) en septembre 2002 du Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV). L'objectif du projet est de simuler des systèmes complexes intégrant des humains étant spectateurs, acteurs ou créateurs. Il prépare une thèse dont l'objectif est de proposer un modèle de Système Tutorial Intelligent intégrant un comportement pédagogique adaptatif, dans le but de fournir une éducation différenciée en environnement virtuel de formation.



Ronan Querrec est maître de conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB). Il fait partie de l'équipe SPI du CERV. Ces recherches portent sur les modèles de comportement mono et multi-agents. Ses travaux sont basés sur l'idée que les environnements virtuels sont des systèmes multi-agents hétérogènes et ouverts faisant participer des utilisateurs humains.



Pierre Chevaillier est maître de conférences et dirige l'équipe SPI du CERV. Ces travaux portent sur l'utilisation du paradigme multi-agents pour construire des simulations numériques où les utilisateurs doivent jouer un rôle actif et collaboratif. Il est le responsable du projet MASCARET. Ces activités de recherche sont centrées sur les interactions et les processus collaboratifs dans les systèmes multi-agents hétérogènes (où des agents artificiels et humains sont impliqués).



Gilles Kermarrec est maître de conférences à l'Université de Bretagne Occidentale. Il fait parti de l'équipe Apprentissage Stratégie Attitudes et Performances (ASAP) du CERV. Ses recherches ont porté sur l'autorégulation l'apprentissage en contexte scolaire. Il participe actuellement au sein du CERV au développement d'environnements virtuels de formation. Il s'agit notamment d'évaluer le transfert des compétences acquises en situation simulée vers des situations réelles.