HAL
open science

Les rétroactions épistémiques dans les Environnements Informatiques pour l Apprentissage Humain

Vanda Luengo

To cite this version:

Vanda Luengo. Les rétroactions épistémiques dans les Environnements Informatiques pour l Apprentissage Humain. 2009. hal-00699802

HAL Id: hal-00699802

https://hal.science/hal-00699802

Submitted on 25 May 2012

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

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

Manuscrit présenté par

Vanda LUENGO

Pour obtenir le diplôme d'

Habilitation à Diriger des Recherches

Spécialité Informatique
de l'Université Joseph Fourier – Grenoble I

Les rétroactions épistémiques dans les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain

Jury :
- Président :
- Rapporteurs :
  - Jean Charlet, INSERM UMRS872 & AP-HP
  - Jean Marc Labat, Université Paris 6
  - Jack Mostow, Carnegie Mellon University
- Examinateurs:
  - Serge Garlatti, TELECOM Bretagne
  - Ulrich Hoppe, University of Duisburg
  - Marie Christine Rousset, Université Joseph Fourier
  - Pierre Tchounikine, Université Joseph Fourier

Table des matières

CHAPITRE I 1
Introduction 1
1. Projet TELEOS pour l'apprentissage de la chirurgie orthopédique 1
2. Brit-Air et UroMasterClass 2
2.1. Brit-Air 2
2.2. UroMasterClass 3
3. Modèles d'apprentissage en sciences 4
3.1. Le projet TPElec 4
4. Projets transversaux 5
5. Organisation du manuscrit 5
CHAPITRE II 7
Caractérisation de la rétroaction épistémique et problématique de recherche 7
1. Définition de la rétroaction 7
2. Modèles en boucle 8
3. Types des rétroactions 8
3.1. Distinctions en sciences humaines 8
3.2. Distinctions dans les environnements informatique pour l'apprentissage humain 11
4. Rétroaction et milieu épistémique 13
4.1. Milieu épistémique et degré de contrainte 14
4.1.1. Faible degré de contrainte vs fort degré de contrainte d'interaction dans les environnements d'apprentissage 15
4.2. Evolution du degré de contrainte 18
5. La rétroaction épistémique à la croisée de plusieurs espaces (modèles) 18
CHAPITRE III 21
Les connaissances en jeu et la rétroaction épistémique 21
1. Les connaissances en jeu 21
1.1. Nos travaux liées à la modélisation des connaissances en jeu 22
1.1.1. La transposition des situations de travail 23
1.1.2. L'analyse des connaissances déclaratives et procédurales 23
1.1.3. L'élicitation des connaissances perceptivo-gestuelles, de l'analyse centré expert à l'analyse centré données 24
2. Du modèle de connaissances en jeu à la conception des rétroactions épistémiques 27
2.1. Domaine de phénoménologie 28
2.1.1. Nos travaux sur le domaine de phénoménologie 29
2.1.2. La notion de fidélité phénoménologique dans nos travaux 34
2.1.3. Interface qui résiste 36
2.2. Du système formel, ou représentation des connaissances, à la conception et au calcul de la rétroaction 38
2.2.1. Nos systèmes formels vis-à-vis des connaissances en jeu 40

3. Résultats liés aux connaissances en jeu et le calcul des rétroactions épistémiques 43
4. Connaissance en jeu et rétroaction épistémiques, quelques perspectives 44
5. Bibliographie de nos travaux sur la connaissance en jeu et les rétroactions épistémiques 46
CHAPITRE IV 49
Le sujet et la rétroaction épistémique 49
1. Le sujet épistémique en tant qu'apprenant 50
1.1. Des théories d'apprentissage 51
1.1.1. La cognition est « traitement de l'information » 51
1.1.2. Le constructivisme 51
1.1.3. La cognition situé forte et la cognition situé faible 52
1.1.4. Le caractère contextualisé des connaissances chez le sujet 52
1.1.5. La didactique professionnelle, à l'intersection de la théorie de l'activité et de la dimension épistémologique constructiviste 53
1.2. La dimension perceptivo-gestuelle chez le sujet épistémique 54
1.2.1. L'énaction ou la connaissance incarnée chez le sujet 55
1.2.2. Des connaissances sensori-motrices aux connaissances perceptivo gestuelles chez le sujet 55
1.3. La prise en compte de l'erreur 56
1.3.1. L'erreur comme une manque de connaissances 56
1.3.2. L'erreur comme une lacune dans la mémoire 56
1.3.3. L'erreur, une misconception 57
1.3.4. L'erreur, problème d'intégration de la connaissance déclarative dans la connaissance procédurale 57
1.3.5. L'erreur, symptôme d'une connaissance 57
1.4. La structure de contrôle comment élément de validation de l'action du sujet 58
1.5. Conceptions, la prise en compte explicite des contrôles 59
1.6. Nos modèles du sujet épistémique 59
2. Diagnostics et rétroaction épistémiques 61
2.1. Modèles génératifs 62
2.1.1. Système de diagnostic 62
2.1.2. Production des rétroactions 63
2.1.3. L'exemple d'Andes 64
2.2. Modèle orienté contraintes 66
2.2.1. Le système de diagnostic : les contraintes violées 66
2.2.2. Production des rétroactions 67
2.3. Le diagnostic des conceptions 68
2.4. L'historique et le contexte épistémique dans les systèmes de diagnostic 70
2.5. Le modèle formel du diagnostic et le calcul de la rétroaction 71
2.6. Nos travaux sur le diagnostic du sujet épistémique 72
2.6.1. Le diagnostic des contrôles 72

2.6.2. La prise en compte du contexte épistémique et de l'histoire dans le diagnostic 74
2.6.3. Nous systèmes formels de diagnostic 78
3. Résultats liés aux modèles du sujet épistémique et le diagnostic 79
4. Le sujet épistémique et le calcul des rétroactions, quelques projets et perspectives 80
5. Bibliographie de nos travaux sur le sujet épistémique et le calcul des rétroactions 81
CHAPITRE V 83
La situation d'apprentissage et la rétroaction épistémique 83
1. La situation d'apprentissage 84
1.1. La zone proximale de développement 84
1.2. La théorie des situations didactiques 85
1.3. L'ingénierie didactique 87
1.4. Nous modèles des situations d'apprentissage 87
2. Orchestration pour la production de parcours guidé par la connaissance 90
2.1. Les scénarios d'apprentissage 90
2.2. La construction automatique des parcours, un problème de planification 93
2.3. Nos travaux sur la construction des parcours 96
2.3.1. Parcours décrits 96
2.3.2. Parcours génératif 100
3. Résultats liés aux situations d'apprentissages et au calcul des rétroactions 104
4. Situations d'apprentissage et rétroaction épistémique, quelques perspectives 105
5. Bibliographie de nos travaux sur la situation d'apprentissage et le calcul de rétroactions 106
CHAPITRE VI 107
La prise de décisions didactiques 107
1. Formes d'interaction basés sur le modèle de l'enseignant 107
1.1. Stratégies d'enseignement dans les tuteurs intelligents 108
1.2. Stratégies de tutorat en formation professionnelle 108
1.3. La décision didactique 109
1.3.1. Des facteurs à prendre en compte dans la décision 110
2. Rétroaction épistémique et décision didactique 111
2.1. Modèle d'instrumentation de l'enseignant (tuteur) pour la prise de décision 111
2.2. Un modèle de décision didactique 112
3. Modèles informatiques pour la prise de décision et la rétroaction épistémique 116
3.1. Notre modèle basé sur la théorie de la décision et les diagrammes d'influence 116
4. Résultats liés à la décision didactique et à la rétroaction épistémique 118
5. Perspectives liées à la décision didactique et à la rétroaction épistémique 119
6. Bibliographie de nos travaux sur la prise de décisions didactiques et le calcul de rétroactions 120
CHAPITRE VII 121
Conclusion et perspectives 121

1. La problématique de la modélisation transdisciplinaire des connaissances dans les environnements informatiques pour l'apprentissage humain 122
2. Lé découplage et la validation des systèmes 123
3. Capitalisation 124
4. Des cycles de conception 125
REFERENCES 127

CHAPITRE I

Introduction

Notre intérêt principal de recherche est la modélisation de la connaissance comme objet d'interaction entre un environnement informatique pour l'apprentissage humain (EIAH) et un utilisateur (enseignant, apprenant), avec l'hypothèse que cette interaction permettra l'émergence de la connaissance et donc de l'apprentissage.

Notre place dans l'équipe MeTAH concerne la représentation informatique de la connaissance à partir d'outils didactiques de modélisation pour :

- produire des modèles de connaissance relatifs au processus d'enseignement et d'apprentissage;
- concevoir des représentations informatiques de ces modèles et des outils de calcul pour le diagnostic et la prise de décisions didactiques.

Au cœur de nos recherches se trouve la question de la nature des rétroactions épistémiques les plus susceptibles de susciter des apprentissages. Ces travaux dépassent les modélisations cognitives classiques dans le domaine de la modélisation de l'apprenant pour entrer dans une problématique didactique : pour un contenu spécifique, ayant analysé l'activité de l'apprenant, choisir la rétroaction à produire pour faire évoluer cette connaissance de façon optimale (choix du moment, de la nature, de la modalité).

Nos recherches sont réalisées à partir de problèmes concrets liés aux EIAH et ont pour objectif de trouver les méthodes, modèles et algorithmes qui permettent de résoudre ces problèmes. Ces problèmes sont considérés dans toutes leurs dimensions, ce qui rend notre domaine de recherche transdisciplinaire.

Cela ne signifie pas que nos recherches en EIAH s'intéressent à l'ensemble de tous les problèmes posés par l'enseignement et l'apprentissage, mais cela signifie que, pour nos problématiques, nous avons fait le choix d'aborder la question en prenant en compte les domaines concernés.

Par ailleurs, et c'est une dimension non négligeable, nous sommes confrontés à des problèmes d'ingénierie qu'il faut résoudre pour pouvoir valider nos problématiques de recherche. Ainsi, pour pouvoir évaluer nos propositions, nous devons construire préalablement des environnements suffisamment robustes pour qu'ils puissent être manipulés par des utilisateurs finaux.

Si nos travaux peuvent avoir pour cadre des apprentissages classiques tels que les mathématiques et la physique, nous nous intéressons plus particulièrement aux activités professionnelles, comme la chirurgie orthopédique et le pilotage d'avion de ligne, activités incluant une richesse de formes de connaissances mis en jeu lors de l'apprentissage. Ce dernier aspect nous permet d'explorer des formes de connaissances particulières telles que les connaissances perceptivo-gestuelles.

Nos recherches s'articulent autour de quelques projets phares et d'autres projets transversaux que nous présentons dans la suite de cette introduction afin de pouvoir les référencer tout au long du manuscrit.

1. Projet TELEOS pour l'apprentissage de la chirurgie orthopédique

Ce projet de recherche a démarré en 2003 et repose sur plusieurs projets financés successifs et dont les partenaires principaux sont le Service de Chirurgie Orthopédique du Centre Hospitalier Universitaire de Grenoble, le Laboratoire d'Informatique Médicale de Grenoble (TIMC), le Laboratoire Inter-Universitaire de Psychologie, Personnalité, Cognition, Changement Social (LIP/PC2S) et le Laboratoire des Sciences de l'Education (LSE). Dans le projet actuel, nous avons également impliqué l'équipe Multicom du laboratoire LIG.

En réponse à des problèmes de coûts et de temps de la formation en chirurgie se développe l'apprentissage de certains gestes sur des simulateurs. Mais ces outils ne prennent pas suffisamment en compte l'aspect de prise de décision et de contrôle de l'activité qui est une part importante de l'activité opératoire du chirurgien. La plupart des systèmes rendent des retours à l'utilisateur en termes de performances comparées avec celles d'un expert, mais on ne trouve pas de systèmes, à notre connaissance, fournissant des retours qui tiennent compte de la cohérence des actions de l'utilisateur par rapport aux contraintes de la situation à résoudre.

Il a été montré dans le cadre du projet européen VOEU (dirigé par le laboratoire TIMC) que trois types de connaissances sont mobilisés lors de la pratique chirurgicale orthopédique : des connaissances déclaratives, des connaissances perceptivo-gestuelles mais aussi des connaissances empiriques qui se construisent au cours de l'expérience professionnelle et qui ne sont que partiellement explicites. Ces connaissances empiriques permettent le contrôle du geste et les prises de décision.

Dans le cadre du projet TELEOS1 (dont nous étions responsables), financé par le programme TCAN du CNRS, nous avons pu progresser sur la formalisation et la représentation informatique des connaissances déclaratives et empiriques concernant la pratique du vissage percutané de la hanche. Nous avons ainsi pu proposer un environnement informatique pour l'apprentissage de ce geste qui prenne en compte l'état des connaissances de l'utilisateur afin de lui renvoyer des retours adaptés et pertinents du point de vue de l'apprentissage. Ainsi, la nature du retour varie en fonction de ce qui est diagnostiqué comme difficulté prioritaire chez l'utilisateur à partir de la résolution du problème qu'il a effectuée.

Le projet Imag-TELEOS nous a permis d'avancer sur l'état de l'art des modèles et des dispositifs haptiques du geste en orthopédie. Le soutien du réseau d'excellence Kaleidoscope dans différentes initiatives, tels que « Learning at Work » et « Learning in Medical Sector », nous ont permis de mettre en commun différentes disciplines (psychologie, didactique, ergonomie, informatique, sciences de l'éducation) et différentes approches pour la conception de ce type d'environnement.

Dans le présent projet TELEOS2, soutenu par l'Agence National de Recherche et dont nous sommes les responsables, nous nous proposons d'étendre le travail précédemment mené dans plusieurs directions. Il s'agit de prendre en compte les connaissances perceptivo-gestuelles relatives aux gestes de la chirurgie orthopédique percutanée, en considérant ces gestes dans leur réalisation conventionnelle et assistée par ordinateur. Nous nous proposons ainsi de réaliser des analyses cognitives complètes de gestes complexes, faisant intervenir des connaissances explicites et tacites de diverses natures. Nous chercherons à caractériser et à spécifier les formes de retour les plus appropriées à l'apprentissage de ce type de geste, dans le même paradigme d'apprentissage constructiviste que celui que nous avons utilisé pour les autres formes de connaissances.

Les résultats attendus sont de deux natures. D'un point de vue théorique, nous progresserons sur la compréhension des mécanismes d'enseignement/apprentissage liés aux contrôles perceptivo-gestuels et empiriques de l'activité, ainsi que sur la formalisation et la représentation informatique de ce type de connaissance. D'un point de vue concret, nous obtiendrons au terme du projet un prototype d'environnement informatique pour l'apprentissage des gestes percutanés en orthopédie.

2. Brit-Air et UroMasterClass

Ces deux projets sont nés à la suite de nos premiers résultats dans le cadre du projet TELEOS. En effet, leur objectif est, comme pour le projet TELEOS, de proposer des outils de formation intermédiaires entre la formation théorique et la formation en situation réelle.

2.1. Brit-Air

Notre collaboration avec la compagnie Brit-Air est partie du constat que l'amélioration de la sécurité aérienne serait désormais centrée sur l'humain, la prise de conscience de ses limites et l'accroissement de sa compétence. Pour parvenir à ces objectifs, les FFS ("Full Flight Simulators", reproduction fidèle d'un cockpit d'avion de ligne) sont utilisés en formation des pilotes de ligne. Les FFS permettent de simuler des situations réelles de pannes complexes dont l'occurrence en

exploitation reste faible mais auxquelles il faut impérativement savoir faire face. Pour que l'apprenant puisse gérer les apprentissages spécifiques des FFS (prise de décision, stress, urgence...), on suppose que les connaissances préalables au traitement de ces situations sont acquises au cours des apprentissages théoriques antérieurs. Or ces enseignements théoriques ne permettent pas l'acquisition opératoire des connaissances. Il en résulte un décalage entre ce qui est attendu d'un apprenant entrant dans un FFS et ce qu'il est en fait capable de traiter. Ce constat amène BritAir à envisager la refonte de son dispositif de formation et le développement de situations d'apprentissage en amont de la phase d'entraînement avec les simulateurs. Ces situations permettraient de travailler séparément les différentes connaissances et aptitudes à maîtriser.

Nous nous focalisons donc sur la conception de situations de formation "intermédiaires" entre théorie et pratique (en simulateur pleine échelle) afin d'atteindre un double objectif : améliorer l'enseignement de certains concepts tout en réduisant les coûts de formation. En effet, certaines procédures de vol sont "encapsulées" dans l'action experte. Il en résulte que les concepts sous-jacents à leurs mises en œuvre ne sont pas opératoires en situations extrêmes. Nous entendons par "situations extrêmes" des situations au cours desquelles les procédures normales de vol ne permettent pas de répondre aux exigences de la situation. Par exemple, un changement de bretelle de décollage demandé par la tour de contrôle au dernier moment ne remet pas en cause spontanément la masse maximale possible de l'avion au décollage car le changement intervient en termes de longueur de piste. Or le ré-calcul de la masse est en fait indispensable pour effectuer un décollage dans des conditions optimales de sécurité.

Suite à ces considérations, nous avons construit des maquettes d'environnements d'apprentissage intermédiaire destinées à la formation des pilotes de ligne. Pour la preuve de concepts, nous nous sommes centrés sur les limitations au décollage, dont nous avons fait l'analyse de connaissances, la proposition d'un modèle de connaissances en jeu et d'un modèle des conceptions du sujet, puis le développement d'une maquette tenant compte de ces analyses.

2.2. UroMasterClass

Cette collaboration est née de l'initiative du docteur Aurel Messas qui est chef de service en chirurgie urologique à l'hôpital Max Fourestier de Nanterre. Les opérations en chirurgie laparoscopique nécessitent l'introduction d'une caméra pour suivre le geste qui est souvent un geste à quatre mains (deux opérateurs). Le docteur Messas a eu l'idée de profiter de ces vidéos pour prototyper un simulateur vidéo d'apprentissage.

Ces travaux préliminaires ont permis de poser les bases d'un outil d'enseignement reposant sur la création d'une banque d'enregistrements vidéo d'interventions chirurgicales réelles réalisées par des chirurgiens urologues durant leur période d'apprentissage. Une séquence vidéo présentant une séquence amenait l'utilisateur à répondre à une question posée sur la situation chirurgicale rencontrée. Les questions posées reposaient sur l'expérience des difficultés rencontrées mais ne respectaient aucune formalisation des connaissances. Dès lors, une telle approche ne pouvait permettre une intégration rapide et reproductible dans un environnement informatique pour l'apprentissage humain.

L'objectif de notre collaboration est de systématiser le processus d'analyse, en proposant une étude des vidéos guidée par les connaissances, puis de rendre ce processus intelligible pour permettre à d'autres personnes de réaliser l'analyse et, enfin, d'en automatiser certaines parties, en particulier le calcul de rétroactions, à partir du modèle de connaissance explicité. L'objectif est également de proposer des outils intelligents afin d'assister la conception et la production de rétroactions intelligentes au sein d'une séquence donnée et entre différentes séquences.

Nous avons démarré la collaboration pendant notre séjour sabbatique à Paris en Février 2008 et nous avons construit une preuve de concepts lors du stage de Master en chirurgie aortique d'Arez Mameli dans le service de chirurgie vasculaire du CHU de Poitiers.

Nous comptons poursuivre cette collaboration dans le cadre de la société SILS qui est en charge de la valorisation du simulateur vidéo.

3. Modèles d'apprentissage en sciences

Nous avons démarré nos collaborations au sein de l'équipe Arcade, ancienne partie de l'équipe MeTAH actuelle, par deux projets en sciences (Ecos-Nord et e-xpérience).

Le projet Ecos-Nord, dont nous étions responsables avec Jean Pierre Peyrin, visait l'intégration de simulateurs informatiques dans les écoles primaires vénézuéliennes à travers la conception de scénarios basée sur une analyse didactique.

Le projet e-xpérience, soutenu par l'IMAG et dont le responsable était Cyrille Desmoulins, avait l'intention d'intégrer les efforts scientifiques de plusieurs équipes de recherche de Grenoble. En particulier les travaux du projet Baghera en mathématique (laboratoire Leibniz), les travaux didactiques en sciences expérimentales (laboratoire LIDSET) et les travaux sur les scénarios et le suivi (laboratoire CLIPS).

En ce qui nous concerne, et étant donné notre expérience en informatique et en didactique, nous avons cherché à étudier les aspects liés aux connaissances ainsi que leur modélisation informatique. Nous avons ainsi encadré un travail préliminaire mené en collaboration avec le LIDSET (didactique des sciences expérimentales) dans le contexte de la chimie afin d'associer l'analyse didactique à la construction des situations actives d'apprentissage dans le cadre d'un logiciel de construction de protocoles. Nous avons co-encadré un travail de master dont le but était de modéliser les contrôles de validité à effectuer sur le protocole construit par l'apprenant et le guidage qui en résulte par l'approche « scénarios » proposée dans l'équipe ARCADE.

Dans ce même cadre, nous nous sommes intéressée, en co-encadrant trois masters, à la réutilisation des méthodes de diagnostic de la plateforme Baghera (plateforme multi-agent pour l'apprentissage de la preuve en géométrie) pour intégrer de nouveaux domaines d'apprentissage (médecine, chimie, architecture des ordinateurs).

3.1. Le projet TPElec

Le projet TPElec, dont le responsable est Jean Michel Adam, est né au sein de 'ancien équipe ARCADE. Il est soutenu par l'Institut National de Recherches Pédagogiques (INRP) qui finance la participation d'enseignants de collège et de lycée.

TPElec est né d'une initiative autour d'un projet interne de l'équipe sur la classe virtuelle active. Dans la classe virtuelle, nous nous intéressions à la mise en œuvre de *situations actives d'apprentissage* (telles que les travaux pratiques) et nous voulions étudier et faciliter la tâche de l'enseignant qui consiste à superviser l'activité de cette classe. Ce *suivi* passe par un partage des responsabilités entre l'enseignant (suivi humain) et le système informatique (suivi électronique). Il doit s'appuyer sur des éléments significatifs et non pas sur de simples manifestations d'activité (clic, navigation dans un hypertexte, etc.). La problématique était de fournir à l'enseignant les moyens de suivre réellement cette classe virtuelle à distance. Nous souhaitions lui donner d'une part la *perception* et la *compréhension* de l'activité de la classe virtuelle et d'autre part la *mémoire* de cette activité.

Pour obtenir un objet commun sur lequel nos recherches pouvaient se reposer, nous avions décidé de développer un micromonde en électricité (TPElec) qui s'appuierait sur une réalisation de l'équipe dans les années 80.

Dans le projet TPElec, nous nous intéressons particulièrement à la dimension *compréhension*. Nous avons ainsi démarre des travaux de master de recherche afin d'étudier les connaissances en jeu d'apprentissage et les conceptions autour de l'apprentissage des circuits électriques. Ces premières analyses ont contribué à la conception du micromonde TPElec.

Dans cette dimension *compréhension,* nous nous intéressons principalement au diagnostic des conceptions de l'apprenant. Pour mieux comprendre ces conceptions, nous cherchons d'abord à donner à l'apprenant les moyens de formulation liées à la démarche expérimentale (formulation d'hypothèse, conclusions, etc..). Nous nous intéressons ensuite, pour le modèle de l'apprenant et le calcul du diagnostic, à la prise en compte du contexte dans lequel l'apprenant agit (l'environnement de formulation, le micromonde, QCM, etc..) et à son histoire. Nous encadrons actuellement une thèse pour chercher à répondre à ces problématiques.

De plus, avec la collaboration des enseignants et le soutien du réseau d'excellence Kaleidoscope (par l'initiative Share Virtual Laboratory), nous avons mis en place plusieurs expérimentations dans les classes et avec les enseignants. Ces expérimentations nous permettent de valider de façon empirique nos systèmes, mais également – et c'est le plus important - de recueillir des données pour l'analyse d'usage et la modélisation à partir des données.

4. Projets transversaux

Nous avons participé à plusieurs projets transversaux en ayant deux objectifs. Le premier objectif est la diffusion des travaux sur les EIAH réalisés à Grenoble. Ainsi, les projets Ecos-Nord et Learn-it nous ont permis de diffuser, en Amérique Latine, les recherches autour des EIAH, et ceci à travers la participation à des formations de troisième cycle et la cotutelle de masters et d'une thèse.

Le deuxième objectif est centré autour des recherches sur l'ingénierie des EIAH. En effet, nous cherchons à mettre en place les processus et méthodes qui nous permettent de passer de l'analyse didactique à la conception des environnements informatiques d'apprentissage humain. Nous nous intéressons particulièrement dans ces processus à la capitalisation et à la validation.

Avec ces objectifs, nous avons participé au projet pluridisciplinaire sur l'évaluation des EIAH, projet dont la responsable était Erica De Vries du Laboratoire des Sciences de l'Education, et qui posait la question de l'évaluation du point de vue de la psychologie, les sciences de l'éducation, la didactique et l'informatique.

Le projet DPULS (Design Patterns for Usage of Learning Systems, dont le responsable était Christophe Choquet de l'Université du Maine) visait ainsi la capitalisation des usages et leurs évaluations. L'initiative SVL (Share Virtual Laboratory, soutenu par le réseau d'excellence Kaleidoscope) et l'initiative nationale pour une plateforme d'expérimentation nous ont permis de nous interroger sur la mise en commun de différentes expérimentations ainsi que d'outils issus des chercheurs en EIAH.

Nous poursuivons ces recherches dans le cadre du projet de personnalisation des EIAH du cluster ISLE, projet soutenu par la région Rhône-Alpes dont nous sommes responsables avec Alain Mille du laboratoire LIRIS, et qui associe les efforts des différents acteurs de la recherche de la région (Chambéry, Grenoble, Lyon et Saint Etienne) autour des modèles de traces et de la personnalisation dans les environnements informatiques pour l'apprentissage humain.

5. Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est organisé autour des différents modèles qui interviennent dans la conception des rétroactions épistémiques. En résumé, le chapitre 2 introduit le cadre de notre problématique alors que les autres chapitres présentent nos cadres théoriques, nos positionnements, nos analyses et nos résultats vis-à-vis de chacun des modèles épistémiques considérés, chaque chapitre (du 3 au 6) finissant par un résumé sur les résultats et les perspectives associées.

Plus précisément, dans le chapitre 2, nous introduisons la notion de rétroaction dans les environnements informatiques pour l'apprentissage humain en résumant des approches en sciences humaines puis en informatique. Nous finissons ce chapitre par la problématique de notre recherche qui est la rétroaction épistémique informatisée. Nous argumentons pourquoi ce type de rétroaction peut se construire à partir du modèle de connaissance en jeu, du modèle du sujet épistémique et des situations d'apprentissage. Ces types de modèle structureront le reste de notre manuscrit.

Le chapitre 3 présente ainsi des différenciations sur les formes de connaissance en jeu et montre les cadres théoriques utilisés pour leurs analyses. Nous illustrons ensuite certaines de nos analyses dont les résultats sont des modèles de connaissance en jeu. Nous exposons après comment ces modèles permettent la conception d'un certain type d'environnement informatique pour l'apprentissage. Enfin, nous montrons l'importance du système formel dans le calcul de la rétroaction, et comment ce système formel est déterminé par la forme des connaissances en jeu.

Le chapitre 4 se réfère au modèle de l'apprenant et aux systèmes de diagnostic. Nous précisons ce que nous entendons par « sujet épistémique » et décrivons les cadres théoriques qui traitent du sujet ainsi que notre positionnement. Ensuite, nous illustrons comment nous avons élaboré des modèles du sujet épistémique à partir de ces cadres théoriques. Nous étudions quelques systèmes de diagnostic ainsi que le type de rétroaction associée, et nous présentons nos systèmes de diagnostics implantés afin d'obtenir les informations désirées pour le calcul de la rétroaction. Nous abordons enfin le problème de la représentation et argumentons notre choix d'utilisation des modèles formels qui tiennent compte de l'incertitude.

Le chapitre 5 aborde la question des situations d'apprentissage et le calcul des rétroactions épistémiques. Ce chapitre aborde la question de la construction de parcours d'apprentissage, dont la conception est centrée *connaissance*. Nous introduisons ici la théorie des situations et l'ingénierie didactique. Nous montrons comment nous avons conçu des modèles de situations et plusieurs méthodes de construction de parcours centrés *connaissance*.

Le chapitre 6 traite des modèles de décision didactique que nous considérons comme les modèles intégrateurs de différentes formes de rétroaction épistémique. Dans ce chapitre, nous présentons quelques travaux sur la prise de décision, leurs cadres théoriques et leurs implémentations. Nous montrons également les deux dimensions sur lesquels nous avons axé nos recherches.

Enfin, le chapitre 7 présente nos perspectives générales et notre effort pour intégrer des travaux pluridisciplinaires dans une démarche d'ingénierie des environnements informatiques pour apprentissage humain.

CHAPITRE II

Caractérisation de la rétroaction épistémique et problématique de recherche

La notion de rétroaction est traitée dans plusieurs domaines. Nous allons présenter ici un état de l'art en sciences humaines, plus particulièrement en sciences de l'éducation, pour ensuite nous intéresser aux caractéristiques de la rétroaction dans le domaine des environnements informatiques pour l'apprentissage humain.

Du point de vue de la rétroaction, nous avons choisi de nous intéresser uniquement à la dimension épistémique, c'est-à-dire à tout ce qui est relatif à la connaissance dans l'interaction entre le sujet et la machine. Ainsi, nous ne nous intéresserons pas aux dimensions affectives ou sociales des interactions, mais nous étudierons en détail la dimension épistémique des rétroactions vis-à-vis des EIAH.

Nous finaliserons ce chapitre par la présentation du cadre de notre problématique de recherche en considérant les modèles pertinents pour la conception et le calcul des rétroactions épistémiques. A savoir : le modèle de connaissance en jeu d'apprentissage, le modèle de l'apprenant et le modèle des situations d'apprentissage.

1. Définition de la rétroaction

"*It has been clear at least since the work of Edward Thorndike in the 1890s that feedback from the environment plays a crucial role in skill acquisition. Feedback includes information about errors, i.e., outcomes that indicate that the action taken was inappropriate or less than useful.* " (Ohlsson S. , skill & errors).

L'état de l'art sur la rétroaction réalisé par Trausan-Matu et al (2008) fait une revue des travaux en psychologie et en sciences de l'éducation. Dans ce cadre, la rétroaction est définie comme une intervention faite par un agent extérieur de façon à fournir de l'information concernant certains aspects liés à l'exécution d'une tâche (Kluger & DeNisi, 1996, p. 255).

Mory (2004, p. 745), paraphrasé par Traisant-Matu et al. (2008, p. 17), fait une synthèse de la définition dans le cas de l'enseignement et l'apprentissage : "*[...] most educational researchers consider the term "feedback" in the context of instruction. Feedback has been widely perceived as an important component of general systems operations and may be viewed under a variety of settings (Kowitz&Smith, 1985, 1987). In the purely instructional sense, feedback can be said to describe any communication or procedure given to inform a learner of the accuracy of a response, usually to an instructional question (Carter, 1984; Cohen, 1985; Kulhavy, 1977; Sales, 1993). This type of feedback acts as one of the events of instruction described by Gagné (1985) and usually follows some type of practice task. More broadly, feedback allows the comparison of actual performance with some set standard of performance (Johnson & Johnson, 1993). In technology-assisted instruction, it is information presented to the learner after any input with the purpose of shaping the perceptions of the learner (Sales, 1993). Information presented via feedback in instruction might include not only answer correctness, but other information such as precision, timeliness, learning guidance, motivational messages, lesson sequence advisement, critical comparisons, and learning focus (Hoska, 1993; Sales, 1993). In fact, Wager and Wager (1985) refer to feedback in computer-based instruction as being any message or display that the computer presents to the learner after a response.*"

Comme les soulignent Trausan-Matu et al. (2008, p. 17), les travaux s'intéressant aux rétroactions pour l'apprentissage, en sciences humaines, proposent plusieurs modèles et classifications : *"The models often are cognitive-based and detail in several tiers how feedback can be designed, delivered*

and understood. The classifications are based on the feedback nature or form, on the feedback degree of complexity, and on the feedback objectives".

2. Modèles en boucle

Plusieurs modèles en boucle sont proposés. Nous pouvons retenir dans ces modèles une notion de boucle au sein de laquelle se succèdent l'action, l'observation, l'interprétation, la validation et la modification. Ces étapes caractérisent fondamentalement le processus de rétroaction, qui peut être appliqué à tout scénario dans lequel le but visé est un changement de comportement ou des connaissances associées.

Dans la boucle classique d'action-rétroaction utilisée dans le contexte des systèmes informatiques, l'action est représentée du côté de l'utilisateur et la rétroaction du côté système. Mais dans une situation d'apprentissage, nous pouvons observer que ce n'est pas toujours l'action qui vient de l'utilisateur et la rétroaction du système, mais que l'action peut aussi être produite par le système et la rétroaction par le sujet. Autrement dit, du point de vue de l'apprentissage, il n'est pas nécessaire que le système attende une action de l'apprenant pour (ré)agir. De même, l'utilisateur n'est pas uniquement en train d'agir mais aussi de réagir. Cela peut être ainsi le cas des systèmes qui vont proposer la résolution d'un problème ou des systèmes de type socratique. Un autre exemple est donné par les tuteurs intelligents qui ont pour caractéristique l'initiative mélangée ou mixte (Mixed initiative) telle que proposée par Woolf (2009, p. 31), c'est-à-dire la capacité des tuteurs à initier des interactions aussi bien pour interpréter que pour répondre aux interactions avec un apprenant. Dans ce type de boucle, le système peut donc être proactif ou prendre des initiatives.

Ainsi, nous pourrons distinguer les boucles d'interaction simples des boucles d'interaction composées. Dans les boucles d'interaction simples l'action est du côté du sujet et la rétroaction est une réponse du système informatique (comme paraphrasé par Moury et défini par Wager dans le point 1 de ce chapitre). Dans les boucles d'interaction composées, le système pourra être proactif, proposant des situations ou des éléments d'information qui n'ont pas été provoqués par l'action de l'apprenant. Le tuteur ANDES donne un exemple de boucle d'interaction complexe initiée par un système de dialogue qui demande à l'apprenant d'expliquer ses réponses quand le système n'est pas capable de diagnostiquer. Dans ce cas il y a une boucle d'interaction imbriquée dans une boucle principale.

Enfin, les modèles de rétroactions ici sont des boucles où la rétroaction n'est pas réactive (stimulus-réponse) mais réflexive. C'est-à-dire une boucle avec en entrée un stimulus, ensuite une réflexion sur des modèles (modèles d'analyse du stimulus et modèle de calcul de la rétroaction) puis une production de la rétroaction. Ici les modèles seront cognitifs, didactiques, etc…

3. Types des rétroactions

Dans les travaux cités précédemment, plusieurs catégorisations sont proposées en ce qui concerne la rétroaction. Ces catégorisations, venant des sciences humaines, vont prendre en compte l'intention, le contenu, le temps, la focalisation, la complexité, la façon dont la rétroaction est transmise ainsi que les conséquences de celle-ci.

3.1. Distinctions en sciences humaines

Du point de vue de l'intention, la rétroaction *formative* est distinguée de la rétroaction *sommative*. Cette catégorisation est souvent associée à l'intention d'évaluation. L'évaluation sommative intervient après un ensemble de tâches d'apprentissage ou de formations constituant un tout et correspondant, par exemple, à un chapitre de cours ou à l'ensemble des cours d'un trimestre. Par cette forme d'évaluation, on se propose d'établir un bilan des acquisitions effectives des élèves à un moment donné de l'apprentissage. L'évaluation formative, quant à elle, se propose de fournir des informations détaillées sur les processus et/ou les résultats d'apprentissage de l'élève. La rétroaction formative est

fournie tout au long du cheminement vers le but. A l'opposé, la rétroaction sommative est fournie après la fin de la tâche.

Shute (2009) présente un tableau comparatif entre l'évaluation sommative et formative et leurs formes de rétroaction :

Tableau 1 variables de l'évaluation sommative et formative, pris de Shute (2009, p. 5)

Variables	Summative Assessment	Formative Assessment
Role of assessment	Assessment *of* learning, to quantify fixed and measurable aspects of learners' knowledge, skills, and abilities. Used for accountability purposes, often with norm-referenced tests. Produces a static/snapshot of the learner.	Assessment *for* learning, to characterize important aspects of the learner. The main focus is on aspects of learner growth, employing criterion-referenced tests, used to help learners learn and teachers teach better.
Frequency of assessment	Infrequent, summative assessments using standardized tests. The focus is on product or outcome (achievement) assessment. Such tests are typically conducted at the end of a major event (e.g., unit, marking period, school year).	Intermittent, formative assessment. The focus is more process oriented (but needn't exclude outcomes). Assessments of this type are administered as often as desired and feasible—monthly, weekly, or even daily. Administration is informal.
Format of assessment	Objective assessments, often using selected responses. The focus is on whether the test is valid and consistent more than the degree to which it supports learning.	Constructed responses and an authentic context, collected from multiple sources (e.g., quizzes, portfolios, self-appraisals, and presentations).
Feedback	Correct or incorrect responses to test items and quizzes, or just overall score. Support of learning is not the intention.	Global and specific diagnoses, with suggestions for ways to improve learning and teaching. Feedback is helpful, rather than judgmental.

Par ailleurs le même auteur (2007, p. 6) a fait une revue complète sur la rétroaction formative dont l'objectif principal est relatif à la connaissance et au savoir faire : *" The main aim of formative feedback is to increase student knowledge, skills, and understanding in some content area or general skill"*.

Shute (p. 6) différencie également rétroaction directive et rétroaction facilitatrice : "*Directive feedback is aimed to tell the learner what to do or to revise, while facilitative feedback is aimed to guide learners in understanding the content*".

Du point de vue de l'intention, Moury (2004, p. 747) oppose la rétroaction pour renforcer à celle pour informer : *"contrasting the two feedback systems (feedback as reinforcement vs. feedback as information) as open-loop versus closed-loop. Feedback acting as reinforcement is an example of an open-loop system, in which errors are ignored because the system is not affected by input information. The operant approach does not provide error-correcting mechanisms. In contrast, the feedback-as-information position acts as a closed-loop system. Because this type of system has ways of correcting errors, errors are of primary importance"*.

Dans l'élaboration de la rétroaction, interviennent d'autres types d'intention pédagogique comme l'intention de confirmer, de corriger, d'expliquer, de diagnostiquer ou d'élaborer. L'exemple suivant (Flemming & Levie, 2009) illustre les différents types de rétroaction suite à la réponse donnée par un élève :

Confirmation	Your answer was incorrect.
Corrective	Your answer was incorrect. The correct answer was Jefferson.
Explanatory	Your answer was incorrect because Carter was from Georgia; only Jefferson called Virginia home.
Diagnostic	Your answer was incorrect. Your choice of Carter suggests some extra instruction on the home states of past presidents might be helpful.
Elaborative	Your answer, Jefferson, was correct. The University of Virginia, a campus rich with Jeffersonian architecture and writings, is sometimes referred to as Thomas Jefferson's school.

Figure 1, Exemple proposé dans (Flemming & Levie, 2009)

La rétroaction *efficace* vs *inefficace* fait référence à la façon dont le message est transmis. Ces termes sont différents de ceux de la rétroaction *positive* (ou de renforcement), *négative* (ou corrective) ou encore de la rétroaction *constructive* (ou *suggestive*) qui elles concernent, dans la boucle de rétroaction, les conséquences du comportement de l'étudiant.

Shute (2007, p. 10) propose une classification par rapport au degré de complexité de la rétroaction, cette classification n'étant pas exclusive par rapport à celles présentées préalablement, mais faisant référence à la question du volume et de la nature de l'information à présenter a :

Tableau 2, types de rétroaction selon leur complexité (Shute 2007, p. 10)

Feedback type	Description
No feedback	Refers to conditions where the learner is presented a question and is required to respond, but there is no indication as to the correctness of the learner's response.
Verification	Also called *knowledge of results* (KR), or *knowledge of outcome*, it informs the learner about the correctness of her response(s), such as right/wrong or overall percentage correct.
Correct response	Also known as *knowledge of correct response* (KCR), it informs the learner of the correct answer to a specific problem with no additional information.
Try-again	Also known as *repeat-until-correct* feedback, it informs the learner about an incorrect response and allows the learner one or more attempts to answer the question.
Error-flagging	Also known as *location of mistakes* (LM), error-flagging highlights errors in a solution, without giving correct answer.
Elaborated	A general term, it refers to providing an explanation about why a specific response was correct, and it might allow the learner to review part of the instruction. It also might present the correct answer (see below for six types of elaborated feedback).
Attribute isolation	Elaborated feedback that presents information addressing central attributes of the target concept or skill being studied.
Topic-contingent	Elaborated feedback that provides the learner with information relating to the target topic currently being studied. This might entail simply re-teaching material.
Response-contingent	Elaborated feedback that focuses on the learner's specific response. It may describe why the answer is wrong and why the correct answer is correct. This does not use formal error analysis.
Hints/cues/prompts	Elaborated feedback that guides the learner in the right direction (e.g., strategic hint on what to do next or a worked example or demonstration). It avoids explicitly presenting the correct answer.
Bugs/misconceptions	Elaborated feedback that requires error analysis and diagnosis. It provides information about the learner's specific errors or misconceptions (e.g., what is wrong and why).
Informative tutoring	The most elaborated feedback (from Narciss & Huth, 2004), this presents verification feedback, error-flagging, and strategic hints on how to proceed. The correct answer is not usually provided.

Dans sa synthèse Shute (ibid. p.12) présente le concept de rétroaction *orientée but* (goal-oriented feedback) qui fournit à l'apprenant des informations sur ses progrès par rapport à un objectif ou à un ensemble d'objectifs, plutôt qu'à des réponses ponctuelles, i.e. des réponses à des tâches individuelles.

Hatie & Timperley (2007) proposent une différenciation par rapport au focus de la rétroaction en proposant quatre niveaux : la tâche (ex : « il est nécessaire d'expliquer mieux le traité de Versailles », « il faut que les droites soient parallèles »), le processus (ex : « cette partie prendra plus de sens si tu expliques les stratégies utilisées », « tu dois faire l'analyse statistique pour soutenir ton argument »), l'auto-régulation (ex : « tu sais déjà les caractéristiques clés pour argumenter, vérifie dans ton texte où tu dois les incorporer », « tu sais utiliser le théorème des milieux d'un triangle, vérifie comment il peut être utilisé ») et l'individuel (ex : « tu es un bon étudiant », « c'est une réponse intelligente »).

Une autre caractéristique étudiée est celle du temps, ou plus exactement du moment de la rétroaction. Nous trouvons dans Shute (2007, p. 15) la distinction entre rétroaction *immédiate* et *différée*. La première est produite juste après l'action du sujet alors que la seconde n'est produite seulement après quelques minutes, heures, semaines ou plus, une fois la tâche de l'apprenant terminée.

Le Tableau 3 ci-dessous présente une synthèse des catégories présentées dans les travaux en sciences humaines. Cette synthèse n'est pas exhaustive mais cherche à montrer la diversité des catégorisations. Par ailleurs, les évaluations qui sont présentées pour mesurer l'efficacité ne concluent pas toujours en faveur d'un type de rétroaction ou de l'autre : le choix dépendra de plusieurs facteurs, comme par exemple le type de connaissance, le type de tâche, le type de situation, etc.…

Tableau 3, Résumé des exemples de catégories des rétroactions identifiées dans la littérature en sciences de l'éducation et psychologie pour l'apprentissage

Catégorie	Différentiation
Intention d'évaluation	Sommative vs formative
Intention pédagogique	Renforcer, informer, confirmer, corriger, expliquer, diagnostiquer ou élaborer.
Façon dont le message est transmis	Efficace vs inefficace
Conséquence	Négatif, positif, constructif.
Niveau de complexité	Sans rétroaction, vérification, réponse correcte, essayer encore, soulignage d'erreur, élaborer, isoler attribut, centré réponse, conseil, erreurs ou misconceptions, tuteur instructif (ou guidée)
Objectif	Orienter but versus ponctuelle
Focus	Tâche, processus, auto régulation, personnel
Temps ou moment	Immédiate versus différée

3.2. Distinctions dans les environnements informatique pour l'apprentissage humain

Les travaux présentés précédemment n'interrogent pas de façon directe la rétroaction produite par un système informatique pour l'apprentissage humain. Cependant ces classifications sont utilisées dans les articles décrivant les rétroactions offertes par les systèmes, comme par exemple les travaux provenant du modèle de traçage (Corbett & Anderson, 1995) qui prônent des rétroactions immédiates de type hints et error flaging que nous étudierons dans le chapitre 4.

Dans la suite, nous présenterons les catégories de rétroactions que nous considérons nécessaires pour la conception et le calcul des rétroactions produites par un environnement informatique pour l'apprentissage humain.

Une des catégories est la modalité des rétroactions. Ainsi la rétroaction pourra être monomodale ou multimodale. Elle sera monomodale si elle utilise un seul dispositif de sortie et multimodale si elle utilise plusieurs dispositifs de sortie.

Concernant la dimension dynamique de la rétroaction nous considérons la notion de rétroaction *adaptative*. Brusilovski (1999) a introduit le concept dans le cadre des systèmes d'apprentissages fondés sur les hypermédias et puis sur le web: "*These systems build a model of the goals, preferences and knowledge of each individual student, and use this model throughout the interaction with the student in order to adapt to the needs of that student"*.

L'adaptation, quant à elle, est différenciée par Arrollo, Woolf et Beal (2006, p. 32) entre *macro*-adaptation et *micro*-adaptation : *"Two forms of adaptation of explanations and hints are used: microadaption to select the content (e.g., problems) to assess or instruct the student and macroadaption to select the best type of feedback/assistance for the learner"*. Pour ces auteurs, les micro-adaptations dépendent de l'apprentissage du domaine alors que les macro-adaptations dépendent des caractéristiques individuelles (habilités perceptives et cognitives). Autrement dit, dans le premier cas les rétroactions seront conçues ou calculées à partir du modèle de connaissances et de

leurs relations vis à vis de l'apprentissage, alors que dans le deuxième cas elles seront calculées à partir d'un modèle de l'apprenant.

Ces termes sont différents de la notion de la rétroaction *personnalisée*, laquelle tient uniquement compte des données personnelles. Cette notion de rétroaction est par exemple utilisée dans le cas des rétroactions produites pour les personnes en capacité réduite. Il faut noter que cette notion est différente de celle de la rétroaction adaptative. En effet, la rétroaction adaptative peut tenir compte des données personnelles mais peut aussi se construire à partir d'autres éléments tels que l'objectif d'apprentissage ou le contexte. Les actes des derniers workshops tels que celui réalisé dans la conférence AIED 2009 (Boticario, Santos, Couchet, Fabregat, Baldiris, & Moreno, 2009) ou de la revue (User Modeling, 2008) traitent de cette problématique dans le cas particulier des EIAH (autour du modèle de l'apprenant) ou de façon plus générale dans le cas du domaine de la modélisation de l'utilisateur.

Du point de vue de l'architecture du système, nous proposons de différencier les modèles de rétroaction *fortement couplés* des modèles *faiblement couplés*. Un modèle de rétroaction faiblement couplé est représenté par une entité indépendante dans le système. Il est donc possible d'y accéder, de le comprendre, de le modifier, voire de proposer plusieurs modèles pour un même système. A contrario, comme par exemple dans le cas classique des micromondes et des simulations où la rétroaction est intrinsèque au comportement des objets mis en jeu dans le système, le modèle est le plus souvent fortement couplé.

Dans la plupart des systèmes le modèle de rétroaction est fortement couplé mais des efforts se font dans le sens du découplage. Par exemple, dans l'architecture de traçage de modèles (Corbett & Anderson, 1995) qui est proposé principalement pour le diagnostic des connaissance des apprenants et dont le modèle de rétroaction est intrinsèque, nous trouvons une proposition d'évolution afin de ajouter un module qui découple un peu plus la rétroaction du modèle de diagnostic (Heffernan, Koedinger, & Razzaq, 2008).

Par ailleurs, la rétroaction pour l'apprentissage peut être *automatique* ou *semi-automatique*. Dans le premier cas, elle est totalement prise en charge par le système alors que dans le second cas elle est en partie déléguée à l'humain. Les plateformes d'enseignement à distance sont typiquement des modèles de rétroaction semi-automatique : elles proposent en effet des outils pour le suivi de l'élève et délèguent certaines tâches de rétroaction à l'enseignant via des modules de communication (chat, courrier électronique, etc…).

Enfin, la rétroaction peut être *intelligente*. Un modèle de rétroaction intelligente utilisera des techniques de l'intelligence artificielle. Ainsi les modèles qui font du raisonnement à partir des modèles représentés dans le système (connaissances, apprenant, scénarios, tuteur, émotions, etc..) seront des modèles de rétroaction intelligents. Ces modèles sont classiquement représentés sous forme logique, réseaux sémantiques, ontologies, réseaux bayésiens, etc.

Par opposition, un modèle de rétroaction sans intelligence ne raisonnera pas sur les modèles du système. Par exemple, un système de rétroaction qui associe une forme de rétroaction à chaque erreur, ou famille d'erreurs sans proposer des techniques de raisonnement, n'est pas un modèle intelligent bien qu'il soit relatif à la tâche ou au problème et qu'il utilise les valeurs des variables de la tâche ou du problème correspondant.

Mayo et Metrovic (2001) ont proposé une classification des rétroactions intelligentes qui est relative à l'optimisation de la rétroaction (qu'ils qualifient de « pedagogical action », p. 131). Selon ces auteurs, étant donné un modèle de l'apprenant représenté sous forme de réseaux bayésiens, le principe est de calculer l'action pédagogique optimale. Ils distinguent ainsi trois approches d'optimisation (ibid. p. 131) : alternative, diagnostic et théorie de décisions.

La stratégie alternative utilise les probabilités à postériori du réseau bayésien (le résultat du diagnostic) comme entrée dans un système de règles de décision heuristiques. Ces règles heuristiques permettront de calculer une rétroaction de type hint (comme dans le système Andes, que nos étudierons en détail dans le chapitre 4), de décider quel est le focus de la rétroaction, ou quel problème doit être sélectionné (comme dans le système SQL tuteur que nos étudierons également dans le chapitre 4).

La stratégie de diagnostic consiste à construire la prochaine action (ou rétroaction) de façon à maximiser la valeur ultérieure de certains nœuds du réseau bayésien qui représente le modèle de

l'apprenant. L'exemple cité est celui d'un modèle de rétroaction construit à partir de plusieurs niveaux d'un modèle d'apprenant (Millán, Pérez-de-la-Cruz, & E., 2000): « *For example, Millán et. al.'s domain is test question selection, and questions are selected to maximise the system's certainty that the student has mastered the domain concepts. This strategy has limited applicability outside of diagnostic tests* » (Mayo & Mitrovic, 2001, p. 132).

La stratégie basée sur la théorie de la décision utilise la notion d'utilité : la prochaine action est alors calculée de façon à optimiser l'utilité représentée dans le modèle. Dans les deux cas présentés par Mayo et Mitrovic (2001, p. 132) le modèle d'utilité prend en compte plusieurs facteurs : "*For example, in CAPIT as shall be described, the expected utility of an action (e.g. problem selection) depends on the likely outcomes of the action (e.g. how many errors are made). In DTTutor, the action's impact on many different factors related to the student (e.g. their morale, etc) has an influence on expected utility. Diagnosis, therefore, is only required to the extent that it discriminates between alternate actions*."

Enfin, une dernière forme de rétroaction intelligente est issue d'un type de rétroaction langagière. Dans le cas de systèmes tels que les tuteurs intelligents des techniques avancées de reconnaissance langagière (textuelle ou orale) sont utilisées. Le projet LISTEN (2008) est un des exemples le plus abouti dans ce domaine. En ce qui concerne la rétroaction textuelle, di Eugenio et al. (Di Eugenio, Fossati, Haller, Yu, & Glass, 2008) proposent une analyse détaillée où trois types de rétroaction sont construits à partir de différentes techniques : "*We showed that DIAG-NLP2 , the ITS endowed with more sophisticated language feedback, as based on human tutoring data in this domain, engenders significantly more learning than the other two systems: the original system DIAG-orig, which provides extremely repetitive feedback, and the first NL version we built, DIAG-NLP1 , which aggregates the feedback in terms of syntax and structure of the simulated system. While DIAG-orig could be considered as a non competitive baseline against which to compare DIAG-NLP2 , DIAG-NLP1 instead constitutes a real competitor, since its feedback was conceived on the basis of much previous research*" (Di Eugenio, Fossati, Haller, Yu, & Glass, 2008, p. 339).

Tableau 4. Résume des catégories des rétroactions proposées par rapport aux dimensions informatiques dans les environnements d'apprentissage humain

Catégorie	Différentiation		
Modalité	Monomodale, multimodale		
Adaptation	Non adaptative, adaptative (macro adaptative, micro-adaptative)		
Personnalisation	Non-personnalisée, Personnalisée		
Couplage	Fortement couplée, faiblement couplée		
Automatisme	Automatique, semi-automatique		
Intelligence	Non intelligente		
	Intelligent	Stratégie d'optimisation	Alternative Diagnostic Théorie de décision
		Langagière	Textuelle Orale

4. Rétroaction et milieu épistémique

Comme nous l'avons justifié dans (Luengo, Vadcard, & Balacheff, 2006), la didactique devient indispensable chaque fois que l'environnement considéré a un objectif précis d'apprentissage d'une connaissance (contrairement aux outils généraux, centrés sur l'interaction sociale, par exemple). Elle apporte alors des moyens de modélisation et de compréhension de la construction de la connaissance. La didactique s'attache à comprendre ce que peuvent être les conditions vis-à-vis des connaissances d'un type apprentissage. Cela nous amène à introduire la notion de milieu, composante de la situation d'apprentissage avec laquelle l'apprenant interagit.

Dans la théorie des situations proposée par Brousseau (1998), le milieu est décrit comme le système antagoniste de l'actant. Dans une situation d'action, on appelle "milieu" tout ce qui agit sur l'élève et/ou ce sur quoi l'élève agit. *Exemple : la feuille de papier, la règle graduée et le compas engendrent le milieu de la géométrie plane euclidienne* (Brousseau G. , Glossaire de la théorie des situations didactiques, 2002). Il s'agit moins d'une interaction de l'apprenant avec le milieu, que du milieu comme concept pour modéliser l'interaction.

Le « milieu» est constitué des éléments de l'environnement qui ont une dimension épistémique : quelles connaissances antérieures (chez l'apprenant), quel matériel, quelle organisation... Ces éléments sont spécifiques à l'apprentissage visé et ne concernent pas, par exemple, ni la couleur du tableau, ni les connaissances des élèves sur d'autres thèmes que celui qui est en jeu ou que ceux qui sont susceptibles d'intervenir dans la situation proposée. C'est le milieu qui permet à la situation de produire des rétroactions spécifiques aux connaissances (ou rétroactions épistémiques) de l'apprenant mobilisées à travers l'action.

Une rétroaction épistémique est une rétroaction relative à la connaissance en jeu de l'activité.

En outre, l'EIAH fait partie du milieu, avec, selon sa nature, plus ou moins de responsabilité dans la gestion des interactions. Il joue donc un rôle dans la situation d'enseignement-apprentissage. La nature même de l'EIAH est une indication sur la nature du milieu : du tuteur au micromonde en passant par les environnements d'apprentissage collaboratif (CSCL), les interactions possibles ne sont pas équivalentes (Luengo, Vadcard, & Balacheff, 2006).

Considérer la nature de l'EIAH, en tant que lieu de matérialisation du milieu, est une dimension nécessaire de la caractérisation des rétroactions épistémiques.

Tchounikine dans un travail de synthèse (Tchounikine, 2002) a identifié les EIAH par leurs rôles, non mutuellement exclusifs :

- outil de présentation de l'information (comme par exemple un hypermédia ou une plateforme Web spécialisée),
- outil de traitement de connaissances (comme par exemple un système à base de connaissances résolvant les exercices avec l'élève ou un module de simulation pilotant l'interaction)
- outil de communication entre l'homme et la machine ou entre les hommes à travers les machines.

Cette caractérisation permet d'identifier les courants de recherches dans les EIAH. Il est ainsi nécessaire de caractériser le type d'interaction par rapport aux rôles précédents et vis-à-vis des rétroactions.

Un critère proposé par Balacheff (1994, p. 27) est relatif au degré d'initiative laissé à l'élève, ou de façon duale, au degré de directivité du système.

Nous classons la nature de l'EIAH selon le degré de contrainte d'interaction qu'il propose à l'utilisateur vis-à-vis de la situation d'apprentissage. Ce type de contrainte sera à l'origine de la production de la rétroaction épistémique.

4.1. Milieu épistémique et degré de contrainte

Ainsi un micromonde, un hypertexte ou une simulation, malgré la nature différente de ces environnements, propose à l'utilisateur un espace dans lequel il agit sous des contraintes d'interactions dictées par la nature des objets représentés. Ils sont considérés comme des environnements avec un faible degré de contrainte didactique. A l'opposé, nous trouvons une certaine famille de tuteurs informatiques qui proposent à l'utilisateur un espace dans lequel il agit sous des contraintes d'interaction construites à partir d'un modèle expert implanté et dont l'utilisateur ne peut pas s'écarter. Ce type de tuteur est considéré comme ayant un degré de contrainte didactique élevé. Entre ces deux extrêmes, un grand nombre d'environnements propose des interactions guidées par des objectifs d'apprentissage, des modèles d'apprenant, des modèles de tâche ou des scénarios construits automatiquement ou orchestrés par un formateur ou par un enseignant.

Soulignons que la caractérisation qui nous intéresse n'est pas relative au type de système mais au type de contrainte dans l'interaction proposée par le système, et donc au type de milieu qui peut exister. Ainsi un environnement de simulation qui impose une forme de geste basée sur le geste de l'expert sera un environnement avec un degré de contrainte plus grand qu'une simulation qui laisse à l'utilisateur le soin d'explorer l'environnement au travers de gestes variés. De même, une plateforme d'apprentissage qui propose des scénarios d'activité aura une interaction plus contrainte qu'une plateforme qui met simplement à la disposition de l'utilisateur un ensemble de ressources à consulter.

La notion de contrainte d'interaction n'est pas un élément d'évaluation des systèmes d'apprentissage, elle indique la façon dont le système décide de gérer l'interaction avec l'utilisateur.

4.1.1. Faible degré de contrainte vs fort degré de contrainte d'interaction dans les environnements d'apprentissage

Ainsi, Balacheff (1994, p. 31) montre que l'évaluation des micromondes et des environnements tuteurs conduit à deux remarques. D'une part, un micromonde offre à l'élève un environnement riche, mais il ne peut garantir un apprentissage donné. D'autre part, le suivi serré d'un environnement tuteur peut permettre un apprentissage attesté par des performances et des comportements, mais ne garantit pas non plus la signification des apprentissages.

En effet, un système de type micromonde classique ne connaît ni l'objet d'apprentissage, ni le problème qui doit être résolu par l'apprenant. Il ne peut donc pas produire des rétroactions relatives à ces éléments. Par exemple, comme nous l'avons montré dans (Luengo V. , 2005), si nous construisons une figure avec le micromonde Cabri-géomètre, et proposons une preuve avec le logiciel Cabri-Euclide, les systèmes seront capables de produire des rétroactions par rapport aux propriétés de la figure ou par rapport aux propriétés d'une preuve déductive (Figure 2), mais ils ne seront pas capables de produire une rétroaction en liaison avec le problème posé, ou avec l'objectif d'apprentissage, car ils ne sont pas représentés dans le système.

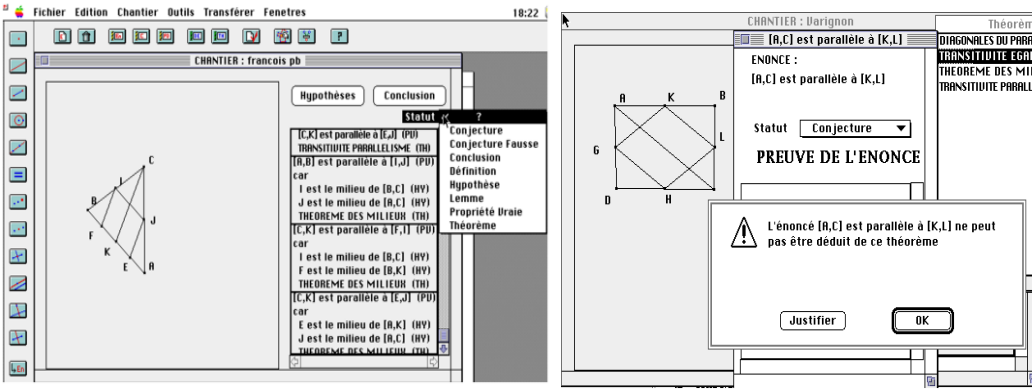


Figure 2, Une preuve et un exemple de rétroaction du micromonde Cabri-Euclide

D'un autre point de vue, un système tuteur tel que Geometry Tutor[1] (Anderson J & Corbett, 1985) empêche l'utilisateur de s'engager sur des voies erronées et le contraint à rester sur les solutions expertes implantées dans la machine. Comme il a été montré par Guin (1991), le logiciel, en protégeant l'élève de l'erreur et en bloquant certaines voies moins optimales, fait en sorte que l'apprentissage soit réduit à une sorte de dressage aux réactions particulières du tuteur, sans que ces réactions soient rapportées à la connaissance en jeu. C'est ce que Baker (Baker R. , 2007) appelle "Gaming the systems" dans des travaux plus récents.

[1] Système qui fournit une visualisation de l'évolution de la construction d'une preuve sous la forme d'un arbre (au terme de la résolution, l'arbre représente la structure de la preuve obtenue)

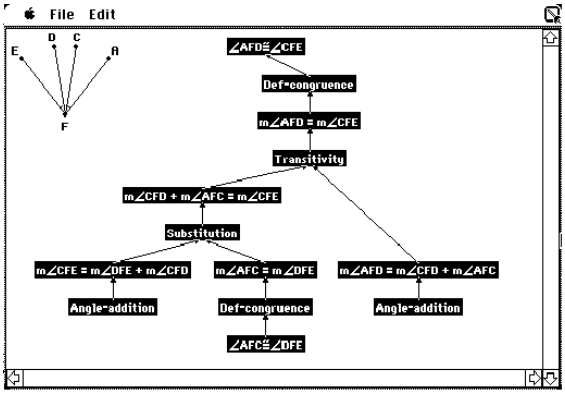


Figure 3, copie d'écran du logiciel Geometry Tutor

Nous pouvons cependant constater une évolution qui conduit à accompagner l'utilisation de micromondes tels que Cabri-géomètre par un ensemble de situations d'apprentissages (dans ce cas précis ces situations ne sont pas matérialisées dans le système informatique) et à ce que les environnements tuteurs relâchent leurs contraintes d'interaction.

Un exemple intéressant est donné par les différentes versions du logiciel Aplusix (Aplusix, 2009), dont le thème est la factorisation en algèbre élémentaire. Dans sa première version Aplusix était un environnement tuteur (Figure 4). Aplusix tuteur laissait ouverte la possibilité d'explorer différentes stratégies de résolution mais il n'acceptait pas les transformations incorrectes d'expressions algébriques et fournissait une rétroaction immédiate.

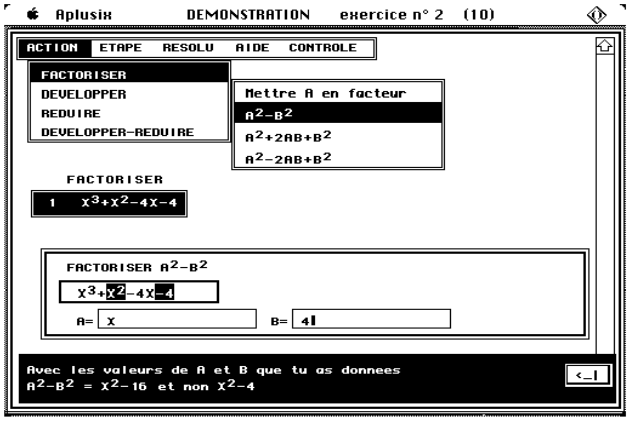


Figure 4, copie d'écran du tuteur Aplusix

Dans la version micromonde d'Aplusix (Nicaud, Bouhineau, Pavard, & Sander, 2001) l'élève résout des exercices pas à pas, en créant lui-même les pas de son choix. Le logiciel dispose d'un éditeur avancé d'expressions algébriques. Il fournit des indications sur l'expression en cours et permet leur modification, en respectant la structure des expressions algébriques. Aplusix-micromonde contrôle les calculs de l'élève en vérifiant que les expressions sont bien équivalentes. Ce logiciel apporte aussi des informations sur l'expression courante (équivalence, bien formée, non réduite, non développée, progression vers une solution).

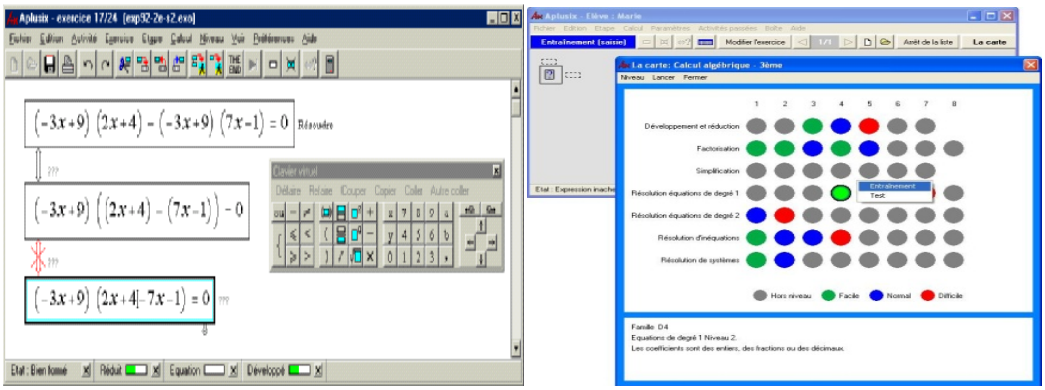


Figure 5, Copies d'écran du micromonde Aplusix.

Cet environnement intègre aussi des propositions de parcours (Figure 5, copie d'écran à droite) où l'ensemble des scénarios ont été construits à partir d'une analyse didactique : "*Dans la barre d'outils, le bouton « La carte » permet d'accéder à 38 familles d'exercices représentées par des points. Chaque famille contient environ 10 exercices. La famille actuellement sélectionnée est décrite dans la partie inférieure de la fenêtre. Les exercices sont construits à partir de patrons, avec un choix aléatoire des coefficients. Par conséquent, les élèves peuvent choisir une même famille plusieurs fois de suite, sans refaire les mêmes calculs*" (http://aplusix.imag.fr/).

En ce qui concerne les tuteurs intelligents Brusilovsky (Brusilovsky P. , 1994) propose de passer des type de systèmes très contraint dans l'interaction à des environnements intelligents pour l'apprentissage munis de nouvelles formes de contraintes dans l'interaction : *An intelligent learning environment is a relatively new kind of intelligent educational system which combines the features of traditional Intelligent Tutoring Systems (ITS) and learning environments. Traditional ITS are able to support and control student's learning on several levels but doesn't provide space for student-driven learning and knowledge acquisition. An intelligent learning environment (ILE) includes special component to support student-driven learning, the environment module.*

Par ailleurs, l'examen de la proposition de Woolf (2009, p. 30) sur les facteurs qui caractérisent un tuteur nous amène à constater l'évolution qui tend à diminuer le degré de contrainte des tuteurs en utilisant les modèles de connaissances, expert et apprenant, davantage pour guider l'activité de l'élève que pour la contraindre (Tableau 5).

Tableau 5, Traduction du tableau proposé par Woolf B (2009, p. 30) de la classification des tuteurs intelligents par rapport aux caractéristiques liées à l'intelligence artificielle.

Composants d'un tuteur intelligent	Description
Générativité	La capacité de générer les problèmes appropriés, indications ou aides adaptés aux besoins d'apprentissage
Modèle d'apprenant	La capacité de représenter et raisonner sur l'état actuel des connaissances de l'apprenant, ainsi que de ses besoins d'apprentissage et d'y répondre en enseignant.
Modèle expert	Une représentation et un moyen de raisonner sur la performance experte dans le domaine et par implication la capacité d'instruire
Initiative mixte	La capacité d'initier des interactions avec l'apprenant et aussi d'interpréter et répondre de façon utile aux interactions initiées par l'apprenant
Apprentissage interactif	Activités d'apprentissage qui demandent à l'apprenant un véritablement engagement et qui sont contextuellement appropriées et adéquates au domaine.
Modèle d'instruction	La capacité de changer le mode d'enseignement basée sur des inférences sur l'apprenant
Auto-amélioration	La capacité du système de se surveiller, d'évaluer et d'améliorer ses propres aptitudes d'enseignement, en se basant sur son expérience des apprenants antérieurs.

4.2. Evolution du degré de contrainte

Nous avons pu observer que les environnements peu contraints (micromondes, simulations, etc.) proposent des moyens d'augmenter le degré de contrainte en orchestrant les interactions par des situations d'apprentissage.

Au contraire les tuteurs intelligents qui proposaient des interactions très contraintes relâchent les en proposant des nouvelles formes d'interaction.

Les environnements intermédiaires incluent des modèles d'apprenants, des modèles de scénarios, ou d'autres modèles, qui guident (contraignent) plus au moins l'activité de l'élève. A titre d'exemple, les plateformes LeActiveMath (http://www.leactivemath.org/) et ActiveMath (http://www.activemath.org/) guident l'interaction à partir des modèles d'apprenants (Morales, Van Labeke, & Brna, 2006), (Faulhaber & Melis, 2008) et/ou à partir des modèles de résolution de problèmes (Ullrich & Melis, 2009).

La gestion du niveau de contrainte est donc réalisée à partir des différents modèles tels que le modèle de connaissances en jeu, le modèle de l'apprenant et le modèle qui orchestre les situations apprentissage.

5. La rétroaction épistémique à la croisée de plusieurs espaces (modèles)

Shute a montré dans son état de l'art (Shute, 2007) que les caractéristiques de la rétroaction ne sont pas évaluées de façon consensuelle. Par exemple en ce qui concerne le critère du moment de la rétroaction : "*For instance, the positive effects of immediate feedback can be seen as facilitating the decision or motivation to practice and providing the explicit association of outcomes to causes. On the downside, immediate feedback may lead to reliance on information that is not available during transfer, and it also may promote less careful or mindful behavior. […] A similar argument could be made for delayed feedback effects on learning. For example, on the positive side, delayed feedback may encourage learners' engagement in active cognitive and metacognitive processing […]. But on the negative side, delaying feedback for struggling and less motivated learners may prove to be frustrating and detrimental to their knowledge and skill acquisition*".

Suivant ces considérations préalables, il n'est donc pas possible de dire *a priori* si une rétroaction épistémique doit être adaptative ou pas, formative ou sommative, intelligente ou non, ou si le cycle de rétroaction doit être simple ou composé.

Pour décider le type de rétroaction il faut considérer certaines variables comme les caractéristiques de l'apprenant et les objectives d'apprentissage. Shute présente ainsi (2007, p. 26) un cadre de conception qui prend en compte des facteurs d'apprentissage et des facteurs liés à l'apprenant (Figure 6).

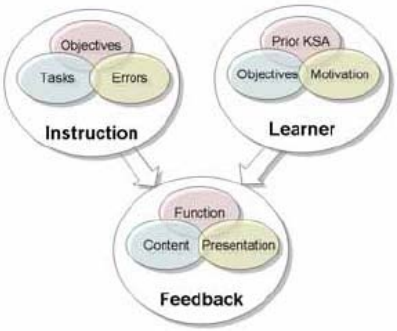


Figure 6 Facteurs en interaction avec la rétroaction et qui vont influencer l'apprentissage. Image reprise de Shute (2007, p. 26).

Nous considérons ces mêmes facteurs dans la modélisation et le calcul de la rétroaction dans le système informatique. Cependant, pour la production de ce type de rétroactions, il est nécessaire de préciser le modèle de connaissance en jeu, implicite dans cette dernière proposition. Si, par exemple, la connaissance en jeu est perceptivo gestuelle, l'interaction devra être multimodale.

Nous proposons donc de considérer la rétroaction épistémique informatique comme un modèle qui se construit à partir de la prise en compte des trois autres modèles, à savoir : les modèles de connaissance en jeu, les modèles du sujet épistémique (learner dans le modèle de la figure 6) et les modèles d'orchestration de l'apprentissage (instructions dans le figure 6).

Notre problématique est centrée sur la dimension épistémique et informatique, dans notre travail :

- La dimension épistémique prend en charge à la connaissance en jeu dans l'interaction entre le sujet et la machine dans des situations d'apprentissage.
- La dimension informatique prend en charge les modèles computables et implantés dans le système.

Le modèle d'interaction épistémique se présente comme un jeu spécifique de la connaissance entre différents sous-systèmes : le système *milieu*, le système *sujet épistémique* et le système *situations d'apprentissage* :

Le système milieu est caractérisé par le modèle des connaissances en jeu, c'est-à-dire toute conception et raisonnement à partir des connaissances d'apprentissage en jeu. Le modèle de rétroaction dans ce système est construit à partir des formes des connaissances en jeu ;

Le système sujet épistémique est caractérisé par le modèle de connaissances de l'apprenant, c'est-à-dire tout ce qui est relatif au raisonnement sur les connaissances (concepts, conceptions, erreurs, etc..) du sujet qui apprend. Le modèle de rétroaction dans ce système est construit à partir des connaissances, concepts, erreurs, etc., du sujet ;

Le système situations d'apprentissage est caractérisé par le modèle d'orchestration des apprentissages, c'est-à-dire ce qui permet d'organiser les situations vis-à-vis des connaissances en jeu et d'un sujet épistémique. Le modèle de rétroaction dans ce système est construit à partir des situations d'apprentissage identifiées.

Nous réduirons également notre espace de recherche au sous-ensemble des systèmes matérialisés dans l'environnement informatique. Ainsi, lorsque dans une situation d'apprentissage le sujet épistémique travaille en partie avec l'environnement informatique et en partie avec du papier et un crayon, nous ne considérerons que ce qui est fait dans l'environnement informatique. De même, si l'enseignant construit la situation d'apprentissage en dehors du système informatique, la situation ne sera pas prise en compte pour la production de la rétroaction puisque cette dernière ne sera alors renseignée dans le système informatique.

A partir des modèles que nous considérons, notre objectif est de proposer des modèles, méthodes et algorithmes de rétroaction qui permettront la gestion de l'interaction pour qu'elle soit épistémique.

Dans les chapitres suivants, nous considérons chacun de ces modèles et la façon dont ils déterminent la conception et le calcul de la rétroaction épistémique.

CHAPITRE III

Les connaissances en jeu et la rétroaction épistémique

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux types des connaissances en jeu, leur formalisation et la production de rétroactions dans les environnements informatiques pour l'apprentissage. Ces rétroactions sont produites à partir des modèles de connaissance en jeu. Cette partie traite d'une problématique d'ingénierie de connaissances. En effet, les travaux dans ce domaine sont fondés sur la nécessité de modéliser de manière explicite les connaissances. Il s'agit de construire des modèles adaptés à la nature des connaissances à décrire pour pouvoir ensuite les représenter dans des formalismes adéquats (Charlet, 2002).

Mais c'est également une problématique de didactique car nous interrogeons les connaissances dans un système d'interaction enseignement-apprentissage, c'est-à-dire les connaissances enjeux d'apprentissage.

La première partie de ce chapitre introduit quelques cadres théoriques et modèles qui interrogent les formes des connaissances. Nous présentons également nos travaux sur l'ingénierie des connaissances et de la didactique, principalement sur la modélisation des connaissances dans un contexte d'apprentissage particulier qui est celui de la chirurgie orthopédique. Il est particulier parce qu'il est construit avec des objectifs non didactiques et porte sur des connaissances souvent implicites.

La deuxième partie de ce chapitre présente les caractéristiques des modèles de connaissances en jeu pour la conception de rétroactions épistémiques. Une de ces caractéristiques est le domaine de phénoménologie, à propos duquel nous verrons comment il permet de concevoir la manipulation de ces connaissances en jeu dans l'interface utilisateur, introduisant ainsi les idées de fidélité phénoménologique et d'interface qui résiste. Une seconde de ces caractéristiques est liée au système formel, dont nous montrerons comment il peut se déterminer par rapport au type de connaissances et comment son choix influence le calcul des rétroactions.

1. Les connaissances en jeu

"*In literature on learning and instruction, knowledge plays a pivotal role, and is attributed a wide variety of properties and qualities. Among the examples we encountered are: generic (or general) and domain specific knowledge, concrete and abstract knowledge, formal and informal knowledge, declarative and proceduralized knowledge, conceptual and procedural knowledge, elaborated and compiled knowledge, unstructured and (highly) structured knowledge, tacit or inert knowledge, strategic knowledge, knowledge acquisition knowledge, situated knowledge, and metaknowledge.*" (de Jong & Ferguson-Hessler, Types and qualities of knowledge., 1996, p. 105)

Un des problèmes encore largement ouvert au débat de la psychologie cognitive est donc celui de la nature et de la variété des connaissances (Weil-Barais, 1994, p. 371). Comme nous pouvons le constater, ces travaux proposent plusieurs classifications que nous ne présenterons pas in extenso.

Une différentiation courante est faite entre les connaissances procédurales et les connaissances déclaratives. Pour Weil- Barais (1994, p. 433) cette distinction est analogue à celle entre savoir et savoir-faire. Les connaissances déclaratives donnent ainsi des informations sur les objets du monde et les connaissances procédurales donnent des indications sur les procédures et les conditions d'utilisation de ces procédures (ibid. p 434).

Le même auteur (1994, p. 380) propose la définition suivante *« Une connaissance a le statut de connaissance déclarative lorsqu'elle est manipulée par une autre connaissance, la même connaissance a le statut de connaissance procédurale lorsqu'elle manipule d'autres connaissances ».*

En théorie les connaissances procédurales sont déductibles des connaissances déclaratives, parce que les procédures font partie de l'explicitation d'une connaissance. En revanche, des procédures peuvent rester implicites (ne pas accéder au niveau déclaratif). Il faut considérer ces aspects du point de vue de l'apprentissage : « *Ces faits incitent à considérer que dans des contextes d'apprentissage organisés il est nécessaire de gérer le processus de procéduralisation des connaissances, tout comme il est nécessaire d'accompagner les processus de généralisation* » (ibid. p 434).

Comme l'explique Weil- Barais (1994, p. 381), il y a plusieurs moyens pour formaliser l'activité procédurale. Un des plus classiques est le système de règles de production. Son principe de fonctionnement est une boucle sélection-exécution qui se fait à partir de l'analyse et de la sélection d'un ensemble de règles. C'est dans la phase de sélection que les connaissances décisionnelles apparaissent.

Dans la typologie des connaissances on distingue également les connaissances sensori-motrices. Ces connaissances, une fois stabilisées, « se révèlent disponibles à la demande sans que ceci nécessite de notre par part une mobilisation attentionnelle très soutenue » (Weil-Barais, 1994, p. 383). C'est pour cela que ces connaissances sont souvent appelées des connaissances tacites. Du point de vue de l'ingénierie des connaissances et des environnements d'apprentissage cela pose un problème d'obtention ou d'explicitation de ces connaissances par les experts.

Une autre caractéristique fondamentale est le type de structuration des domaines, ainsi que le résume Weill-Barais (p. 430) : « *les connaissances sont caractérisées en fonction du domaine institué de connaissances auquel elles appartiennent* ». Resnick et Ford (1981) ont travaillé sur des critères de définition des connaissances structurées. Les mathématiques sont ainsi considérées comme un domaine fortement structuré.

Ces deux derniers auteurs montrent que la structure du domaine n'est pas transparente pour le sujet et constitue un élément important de l'apprentissage.

L'analyse didactique est le moyen par lequel nous spécifions les connaissances, objet d'apprentissage, et les rétroactions qui les accompagnent.

Dans le cas particulier de la formation professionnelle, un cadre théorique en ce qui concerne l'analyse de la connaissance est la didactique professionnelle. Comme proposé par Rogalski (2004, p. 113), la première visée de la didactique professionnelle est de comprendre la manière dont se constitue initialement une compétence professionnelle, « *à travers des situations dans lesquelles on peut identifier une intention de formation (cela concerne les situations de formation institutionnelle « en amont » ou « hors » la situation de travail, et les situations « in situ », lors d'apprentissages par l'expérience ».*

Dans ce cadre de la didactique professionnelle, la problématique de transposition des situations de travail concerne en particulier la conservation des fonctionnalités pertinentes pour l'apprentissage (Rogalski J. , 1995).

1.1. Nos travaux liées à la modélisation des connaissances en jeu

Pour la compréhension des formes de connaissances et la conception de nos modèles, nous nous appuyons sur des cadres théoriques issus de la didactique (Luengo V. , 1999), (Luengo V. , 2005).

Dans le cadre de nos travaux sur la preuve en géométrie ou sur les circuits électriques, nous avons utilisé, pour l'élaboration de nos modèles, des travaux préalables de la didactique des mathématiques et de la didactique de la physique. Ces travaux en didactique ne sont pas, dans leur majorité, suffisamment formels. L'effort dans ce cas a été de les formaliser afin de pouvoir ensuite les utiliser dans le système informatique. Ainsi, dans la preuve en géométrie, les résultats en didactique différentient l'argumentation, l'explication et la preuve, puis dans le cas du raisonnement déductif, se référent aux rôles des statuts des énoncés dans la preuve. Il faut en effet, du point de vue du modèle, pouvoir caractériser ces différents éléments de façon à pouvoir les exploiter par la suite. Dans ce dernier exemple, il a fallu caractériser les différents statuts des énoncés et leur organisation dans le raisonnement déductif.

Dans la section suivante, nous présenterons certains des nos travaux en didactique professionnelle, ces travaux ayant été construits avec l'objectif de proposer des environnements informatiques pour l'apprentissage humain. Certaines de ces formations posent également le problème de l'analyse des connaissances tacites, en l'occurrence les connaissances perceptivo-gestuelles.

1.1.1. La transposition des situations de travail

Le cas de la chirurgie illustre parfaitement ces propos. En effet, « *Dans le cadre de la transmission des gestes chirurgicaux en salle d'opération, celle-ci ne peut pas être planifiée à l'avance. Les situations de transmission vécues par les différents professionnels du bloc ne sont pas conçues spécifiquement à des fins d'apprentissage.[…]. Les précautions qu'ils prennent sont donc toujours à la hauteur des préoccupations concernant le pronostic vital du patient. Dans leur activité de transmission, ils s'entourent de garanties et ne laissent « la main » aux internes que dans certaines conditions.* » (Tomás, Méritan, & Kostulski, 2007). Ce ne sont donc pas des situations didactiques d'apprentissage.

Un travail que Vadcard (2003) a mené dans le cadre de la chirurgie orthopédique, a permis de montrer l'écart qui existe entre les contenus de la formation théorique et les besoins de la pratique. La formation théorique n'est pas orientée vers la résolution de problèmes en situation, et la situation réelle, n'étant pas construite à des fins didactiques, ne permet pas à l'apprenant de prendre le temps qu'il lui faut pour comprendre la résolution du problème qui se déroule.

Notre objectif est donc de développer des environnements informatiques qui offrent un terrain d'application entre les connaissances déclaratives issues de la théorie et les situations réelles issues de la pratique. La conception de rétroactions dans ces systèmes d'apprentissage tient compte des caractéristiques issues des résultats de l'analyse et de la transposition. Il est donc nécessaire de modéliser les connaissances déclaratives et procédurales, ainsi que leurs relations.

1.1.2. L'analyse des connaissances déclaratives et empiriques

Nous avons cherché à éliciter les compétences qui émergent du cadre du compagnonnage en chirurgie orthopédique en nous appuyant sur le cadre de la didactique professionnelle [(Vadcard & Luengo, 2005) et (Luengo, Dubois, Vadcard, & Tonetti, 2007)] :

"Nous analysons et décrivons à partir de notre corpus d'observations la situation prescrite et la situation réelle. Les analyses de ces deux facettes de l'activité sont menées parallèlement, et s'enrichissent mutuellement [PASTRE 02].

La situation prescrite est analysée et décrite à partir d'un cours écrit par le chirurgien partenaire du projet [TONETTI 03], et des articles décrivant cette même technique; la situation réelle professionnelle est analysée et décrite à partir d'observations de l'action du point de vue des interactions entre l'apprenant et l'expert : films et entretiens de verbalisation.

Nous nous attachons dans nos analyses à faire apparaître les contrôles sous-jacents aux actions et aux prises de décisions." (Vadcard & Luengo, 2005, p. 133).

Nous avons ainsi identifié un ensemble d'actions organisées, et nous avons associé un ensemble de contrôles à chaque action. Par exemple, dans le cas du vissage ili-sacré, quelques actions identifiées ont été : « choisir le point d'entrée », « choisir l'orientation », « enfoncer jusqu'au contact de l'os », « prendre une radio inlet »… ; toujours pour cet exemple, un contrôle associé au point d'entrée a été « Le point d'entrée est situé dans le quadrant dorso-caudal déterminé par les projections latérale et longitudinale du sacrum », alors qu'un contrôle associé à la prise de radios a été « Si la broche est trop basse sur la radio inlet, alors elle est trop antérieure (ventrale) sur le patient couché » et qu'un contrôle associé à la progression a été « Le passage d'une corticale entraîne une progression plus difficile de la broche ». Dans ce modèle, nous avons différencié les contrôles en fonction de leur nature. Dans notre exemple, le contrôle lié au point d'entrée était de nature déclarative, alors que le contrôle de la prise de radio était de nature empirique et que le dernier contrôle était de nature perceptivo-gestuelle. Cette distinction est liée aux moyens de validations associées (Luengo V. , Vadcard, Dubois, & Mufti-Alchawafa, 2006).

Par la suite, nous avons mis en œuvre la même démarche d'analyse dans le domaine du pilotage d'avions, en particulier des limitations au décollage (Larrieu, Vadcard, & Luengo, 2005), de façon à étudier sa pertinence dans d'autres domaines de formation professionnelle.

Ce même type d'analyse nous a permis d'élaborer un modèle de connaissances en chirurgie aortique laparoscopie (Mameli, Luengo, Cau, & Mesas, 2009).

En effet, dans le cas de notre collaboration en chirurgie laparoscopique, nous avons conçu un modèle formel des connaissances décisionnelles. Chaque intervention chirurgicale est divisée en temps opératoires. Chaque temps opératoire est décrit par des variables de connaissances : anatomie, exposition, stratégie chirurgicale, instrumentation, technique. Au sein d'un temps opératoire interviennent des opérateurs qui correspondent aux actions effectuées et ces opérateurs sont sous le contrôle de règles, lesquelles règles représentent les connaissances décisionnelles.

Par exemple, ***le temps opératoire (P1)*** - exposition péritoine pariétal postérieur - est composé de ***trois opérateurs*** (***r1*** = basculer le patient vers la droite, ***r2*** = fixation épiploon, ***r3*** = fixation colon transverse). Au premier opérateur est associée une règle ***σ1*** : « Si la bascule latérale droite a été bien réalisée, alors les anses grêles retombent vers la droite de l'abdomen ». Au second operateur sont associées deux règles d'actions, ***σ2*** : « Si l'on fixe le grand épiploon alors on obtient une meilleure exposition, sinon il sera une gêne pour la suite de l'intervention » et ***σ3*** :« Si le fil de traction passé pour fixer le mésocolon est trop près du trocart du clamp proximal, alors le trocart est condamné ».

Cette formalisation est faite pour indexer des séquences vidéo issues de bloc opératoire. Ainsi chaque séquence sera qualifiée par des faits qui auront la valeur de vrai, faux ou inconnu. La formalisation des connaissances a permis l'élaboration d'une grille d'analyse. En utilisant cette grille pendant l'observation des séquences vidéo d'opération, nous soumettons chaque temps opératoire à l'analyse critique systématisée, ce qui nous permet d'obtenir une banque de données exploitable par la suite pour la conception de l'EIAH.

Nous considérons qu'il est nécessaire ici d'analyser et de formaliser les relations entre les connaissances déclaratives et les connaissances procédurales, comme nous l'avons souligné dans le cas de notre projet en chirurgie orthopédique (Vadcard & Luengo, 2005, p. 130) : « *car les connaissances du chirurgien ne se limitent pas à une partie déclarative et une partie gestuelle. Nous avons pointé l'existence et la valeur opératoire de connaissances décisionnelles, souvent implicites, tacites, qui permettent l'activité en situation ».*

Dans nos travaux autours des connaissances en chirurgie orthopédique, nous avons montré l'importance de la nature de ces connaissances et mis en évidence la nécessité de prendre en compte la dimension empirique. Nous pouvons par exemple constater que les règles associées aux connaissances procédurales ne sont pas toujours de nature déterministe. Il est de même en ce qui concerne le principe de résolution de conflit (ou prise de décisions). L'expert en chirurgie est ainsi capable de donner un jugement sur une situation, quand bien même il ne disposerait que d'un ensemble incomplet de données. Les connaissances empiriques sont validées par l'expérience. Ces connaissances, dans notre cas, sont pragmatiques, elles sont élaborées dans l'action et pour l'action Pastre (1999).

1.1.3. L'élicitation des connaissances perceptivo-gestuelles, de l'analyse centrée expert à l'analyse centrée données

En outre, dans le cas des connaissances empiriques liées au geste, nous avons été confrontés au problème de la granularité du modèle. En effet, nous avions démarré des analyses afin d'obtenir un modèle empirique de ces connaissances, l'idée étant de décrire les gestes des chirurgiens dans les opérations pour ensuite faire l'analyse des données recueillies et obtenir le modèle empirique correspondant. Pour cela, dans le cadre de quatre stages en psychologie du travail (Mendola, 2007), nous avons choisi de faire l'analyse vidéo des opérations à travers un schéma d'annotation créé à partir d'une grammaire de gestes assez complète et qui décrit la position de la main, le type de préhension et les mouvements (Figure 7).

Position de la paume D	po	po	State Event
MédialeD	md	md	State Event
Latérale D	la	la	State Event
Pronation D	pr	pr	State Event
Supination D	su	su	State Event
MédPro D	mp	mp	State Event
MédSup D	ms	ms	State Event
LatPro D	lt	lt	State Event
LatSup D	ls	ls	State Event
Position de la paume G	ps	ps	State Event
Médiale G	mi	mi	State Event
Latérale G	lr	lr	State Event
Pronation G	pn	pn	State Event
Supination G	sp	sp	State Event
MédPro G	mr	mr	State Event
MédSup G	mu	mu	State Event
LatPro G	lp	lp	State Event
LatSup G	lu	lu	State Event

Partie de la grammaire de gestes liée à la position de la main

Préhension D	ph	ph	State Event	Outils
Digito-palmaire D	di	di	State Event	Outils
Agrippement D	ag	ag	State Event	Outils
Digito thénnarienne D	dg	dg	State Event	Outils
Key pinch D	ke	ke	State Event	Outils
Empaumement serré D	em	em	State Event	Outils
Empaumement directionnel D	ep	ep	State Event	Outils
Tridigitale pulpo-pulpaire D	ch	ch	State Event	Outils
Bidigitale pulpo-pulpaire D	bi	bi	State Event	Outils
Tip Pinch D	ti	ti	State Event	Outils
En étau D	pi	pi	State Event	Outils
Interdigitale latéro-latérale D	in	in	State Event	Outils
Sphérique D	sh	sh	State Event	Outils
Autre D	au	au	State Event	Outils
Aucune D	ac	ac	State Event	
Préhension G	pe	pe	State Event	
Digito-palmaire G	dt	dt	State Event	Outils
Agrippement G	ar	ar	State Event	Outils
Digito-thénnarienne G	do	do	State Event	Outils
Key Pinch G	ky	ky	State Event	Outils
Empaumement serré G	ea	ea	State Event	Outils
Empaumement directionnel G	eu	eu	State Event	Outils
Tridigitale pulpo-pulpaire G	tr	tr	State Event	Outils

Partie de la grammaire de gestes liée au type de préhension

Figure 7 Partie du schéma d'annotation pour l'analyse du geste chirurgical

Dans la Figure 8 nous pouvons voir un extrait d'annotation du geste du chirurgien lors d'un vissage ilio-sacré, où il est indiqué le sujet qui observé (le chirurgien), son comportement (tient avec la paume de la main droite, et…) et les instruments utilisés (le bistouri dans notre exemple). Pour donner un ordre de grandeur, une séquence de 30 secondes demande une dizaine d'heures de travail. Bien que potentiellement intéressant pour calculer les rétroactions, le formalisme pour la conception du modèle des connaissances s'est avéré trop coûteux en temps d'annotation et nous l'avons abandonné.

	Event Time	Subject	Behavior	Behavior Modifier
Start	+0:00:00.000			
1	+0:01:49.018	Chirurgien	MédPro D	
2	+0:01:49.050	Chirurgien	Tridigitale pulpo-pulpaire D	Bistouri
3	+0:01:55.967	Chirurgien	Aucune G	
4	+0:01:56.518	Chirurgien	AlternUp-Down D	Bistouri
5	+0:01:56.610	Chirurgien	MédPro D	
6	+0:01:56.610	Chirurgien	Pronation D	
7	+0:01:56.708	Chirurgien	Right D	Bistouri
8	+0:01:57.130	Chirurgien	Pronation G	
9	+0:01:58.299	Chirurgien	Right D	Bistouri
10	+0:01:59.610	Chirurgien	AlternUp-Down D	Bistouri
11	+0:01:59.786	Chirurgien	Pronation D	
12	+0:02:00.026	Chirurgien	Tridigitale pulpo-pulpaire D	Bistouri
13	+0:02:00.026	Chirurgien	Aucune D	
14	+0:02:01.186	Chirurgien	Aucune D	
15	+0:02:01.186	Chirurgien	Tridigitale pulpo-pulpaire D	Canon
16	+0:02:01.383	Chirurgien	MédialeD	
17	+0:02:01.745	Chirurgien	MédialeD	
18	+0:02:01.745	Chirurgien	MédPro D	
19	+0:02:01.817	Chirurgien	Horaire D	Canon
20	+0:02:02.105	Chirurgien	Horaire D	Canon

Figure 8. Fichier d'observations d'une séquence extraite du film de la simulation d'arthrodèse lombaire, extrait du rapport de Mendola (2007)

Ce modèle continue cependant à être utilisé par les psychologues qui ont choisi l'analyse des quelques parties critiques du geste. Comme, dans notre cas, nous cherchons à faire l'analyse automatique du geste pour produire un modèle informatique des connaissances, ce modèle n'est pas optimal pour l'obtention d'un volume de données satisfaisant.

Dans nos travaux, la problématique d'explicitation des connaissances perceptivo gestuelles nous a donc conduit à passer d'une méthodologie empirique d'analyse de connaissances par analyse de vidéo et entretien (dans le cadre du projet TELEOS 1), à une méthodologie plus systématique où nous avons introduit différents types de capteurs relatifs aux éléments remarquables de l'activité opératoire qui nous intéresse (la chirurgie orthopédique). Pour cela, nous avons introduit, dans le cadre du projet TELEOS 2, un occulomètre et des capteurs de force et de position.

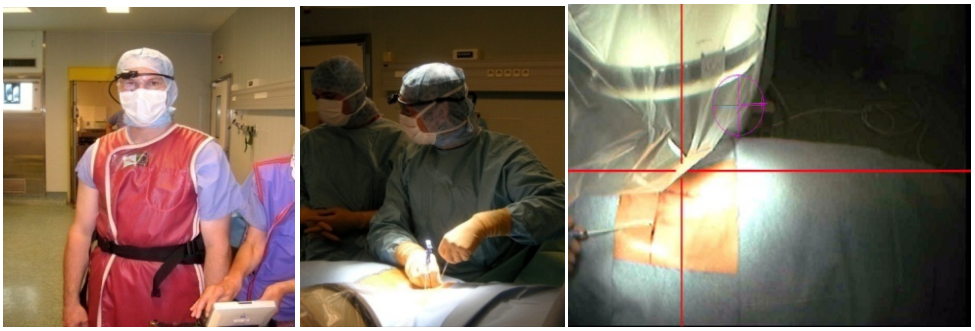


Figure 9. Exemple d'utilisation du capteur occulométrique lors d'une opération en situation écologique (bloc opératoire).

En effet, alors que dans la première version du projet TELEOS nous nous intéressions principalement à l'analyse des connaissances déclaratives et procédurales dans leur dimension décisionnelle, nous avons pu remarquer pour chaque étape de l'activité, l'importance des contrôles de l'action via les radiographies et l'importance des stratégies de diagnostic de situation à partir de ces radiographies (Luengo, Dubois, Vadcard, & Tonetti, 2007). Par exemple, après l'analyse de la représentation 2D, le chirurgien valide ou non le cliché (Flammier, 2005). Si ce dernier ne permet pas de poursuivre l'intervention, il doit effectuer un geste correctif, passant du 2D au 3D, afin de corriger le décalage observé sur le patient. Ces contrôles radiographiques demandent une bonne capacité d'analyse de la part du chirurgien qui effectue son repérage à partir de la position anatomique de référence mais aussi à partir d'indices prélevés, exigeant une rotation mentale pour passer d'une perception visuelle en 2D à un raisonnement mental du geste opératif en 3D.

Ce passage entraîne la mise en œuvre de règles de contrôle de type « si (condition) alors (faits) ». Par exemple, une règle que nous avons identifiée est « si la broche est trop basse sur l'inlet alors elle est trop ventrale sur le patient ». Ce type de règle s'accompagne d'une représentation mentale de l'articulation entre différents registres de représentation (radio, os, patient).

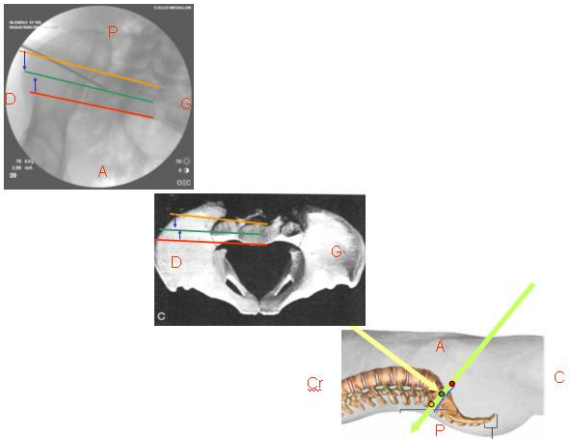


Figure 10, Articulation du registre de représentation en deux dimensions et en trois dimensions.

Ces premières analyses nous confortent dans l'idée de la relation entre les connaissances déclaratives (l'anatomie par exemple), les connaissances procédurales (la résolution du problème liée au cas clinique du patient), les connaissances perceptivo-gestuelles, en particulier la perception visuelle (à partir d'une image 2D dans notre cas) et la perception haptique des propriétés spatiales (accès aux propriétés de forme, taille, orientation, distance, ..) représentée par le geste sur un espace 3D (le patient, les outils chirurgicaux, ..). Actuellement nous cherchons à valider de façon plus systématique ces premières hypothèses grâce à l'analyse de traces de différentes situations recueillies à l'aide des différents capteurs (Luengo V. , 2009).

Dans le cadre de la recherche actuelle du projet TELEOS, nous travaillons sur la compréhension des relations entre les connaissances en chirurgie orthopédique. Nous cherchons des invariants dans la relation entre les différents composantes des connaissances identifiées : procédurales, déclaratives et sensori-motrices, ces connaissances étant de nature empirique et organisées comme des connaissances perceptivo-gestuelles.

L'analyse est faite de façon systématique, à partir des traces obtenues dans différentes situations, réelles ou artificielles, et avec différents capteurs (visuels, sonores, haptiques). Dans cette version du projet, nous souhaitions donc aller plus loin dans la relation entre les connaissances déclaratives, empiriques et perceptivo gestuels.

2. Du modèle de connaissances en jeu à la conception des rétroactions épistémiques

Dans ce chapitre, étant donné que les modèles dont nous disposons sont uniquement des modèles relatifs aux connaissances en jeu, notre objectif est de :

Concevoir des rétroactions épistémiques afin de donner à l'utilisateur les moyens de perception de l'action ainsi que les moyens de décision et de validation relatifs aux connaissances en jeu.

Autrement dit, la rétroaction doit être construite et calculée à partir des représentations des connaissances dans le dispositif informatique, en analysant les caractéristiques pertinentes pour permettre d'avoir des moyens de décision et de validation sur les connaissances manipulées.

Dans ce chapitre, les rétroactions qui nous intéressent sont conçues typiquement dans un système informatique de type micromonde ou de simulation interactive. Il n'y a donc pas de gestion didactique dans le dispositif informatique. Evidemment, l'interaction va être plus au moins contrainte par la situation d'apprentissage et d'autres caractéristiques telles que le contrat didactique, mais ces dernières ne sont pas représentées ni prises en compte dans le dispositif informatique.

Ce type d'environnement doit permettre la manipulation de ses objets de connaissances (création, suppression, modification des caractéristiques, mise en relation), mais il doit aussi déterminer la façon de réagir à la suite des actions produites par le sujet. Dans l'environnement, ces types de rétroactions doivent être définis par rapport à l'objet de connaissance qui intervient au cours de l'action.

Dans nos premiers travaux (Luengo V. , 1999) et (Luengo V. , 1999) nous avions proposé un micromonde de preuve en géométrie (Cabri-Euclide). Grâce à une analyse des travaux en didactique, nous avons pu identifier les connaissances en jeu et leur interaction. Dans ce cas particulier les connaissances étaient liées à la géométrie, à la structure (ternaire) et à l'organisation (enchaînement et inférence) de la preuve déductive. Les rétroactions ont ainsi été organisées autours de ces caractéristiques.

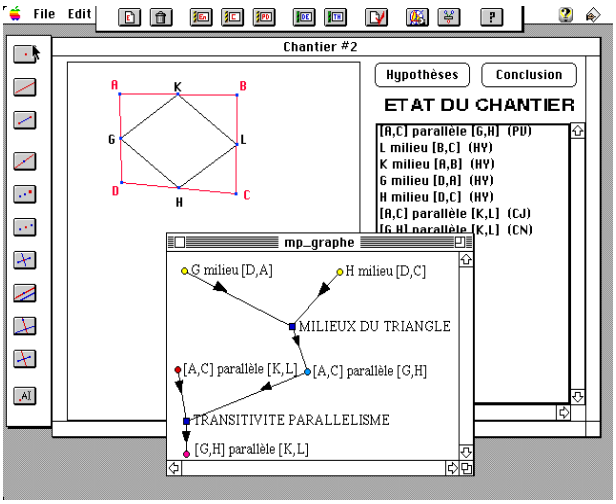


Figure 11, Une copie d'écran du logiciel Cabri-Euclide

Dans des travaux plus récents, dans le cadre du projet TPElec (http://tpelec.imag.fr/), dont le responsable est Jean Michel Adam, nous avons fait la même démarche d'analyse et de conception [(Medina, 2004) et (Michelet, 2005)] pour l'apprentissage de l'électricité.

La modélisation de ces connaissances réalisée préalablement concerne d'une part le domaine de phénoménologie, c'est-à-dire la façon dont l'élève construira et/ou manipulera les objets pour les différentes actions ou ensemble d'actions, et d'autre part la représentation interne à la machine, ou système formel (Balacheff, 1994, p. 33).

2.1. Domaine de phénoménologie

Nous nous sommes intéressée à la notion de phénoménologie, car cette notion ne fait pas appel à des modèles autres que les modèles de connaissances.

« The term phenomenology in science is used to describe a body of knowledge which relates empirical observations of phenomena to each other, in a way which is consistent with fundamental theory, but is not directly derived from theory".

L'idée, du point de vue du milieu, est donc de donner les moyens, à travers l'expérience dans l'environnement, de percevoir des phénomènes en relation à un ensemble de connaissances. Ces connaissances rapportent ainsi des observations empiriques des phénomènes entre eux.

Celui qui a le plus travaillé sur ce concept dans l'apprentissage de la physique et des environnements informatiques est Andy Di Sessa (diSessa, 1983). Il a introduit la notion de primitives phénoménologiques ou en abrégé "p-prims", qui représentent chez le sujet les connaissances liées aux diverses phénoménologies auxquelles celui-ci est confronté.

Par exemple, la primitive décrivant le modèle d'usure du courant est appelée « primitive d'Ohm » par diSessa (par analogie avec les propriétés de la loi d'Ohm rencontrée en physique) : elle serait constituée à partir d'une situation où un blocage, une gêne, une résistance viendrait empêcher qu'une action produise un certain résultat. Ainsi, pour obtenir l'effet escompté, il est alors nécessaire soit d'augmenter l'intensité de l'action, soit de diminuer l'intensité de la cause de la résistance. La primitive d'Ohm peut être visualisée comme la description d'une causalité gênée par une certaine résistance. Par exemple, pour l'allumage de l'ampoule, l'agent causal est la pile, ce qui va gêner cet « élan moteur » initial, pour le passage du courant, c'est l'ampoule elle-même. Pour diSessa (1983) , chaque primitive est en fait associée à une situation phénoménologique prototype caractérisée par un attribut clef (par exemple pour la primitive Ohm, l'attribut clé est l'agent causal plus la résistance et la situation prototype est « pousser une caisse avec un effort »). Il existe une structure constituée de primitives élaborées à partir de l'expérience de l'individu. Ce « noyau dur » de primitives phénoménologiques expliquerait pourquoi les modèles mentaux utilisés par les élèves sont aussi difficiles à modifier.

Un domaine de phénoménologie dans un milieu informatique pour l'apprentissage serait l'ensemble de phénomènes manipulés et/ou observés à l'interface et qui sont proposés par l'environnement vis-à-vis d'un ensemble des connaissances.

Le cas du logiciel Aplusix illustre également cette notion de domaine de phénoménologie. Comme nous pouvons le voir dans le scénario présenté plus bas (Figure 12, exemple 4), issu du site du logiciel (http://aplusix.imag.fr/), le copier-coller n'est pas un copier-coller classique, mais un copier-coller algébrique. De même pour le glisser- déposer (Figure 12, exemple 5). La manipulation est donc une manipulation algébrique, la relation entre les éléments étant de type algébrique. Le domaine de phénoménologie est conçu à partir de la représentation des expressions en algèbre en cherchant garder le principe de représentation 2D habituelle (Nicaud, Bouhineau, Pavard, & Sander, 2001, p. 45)

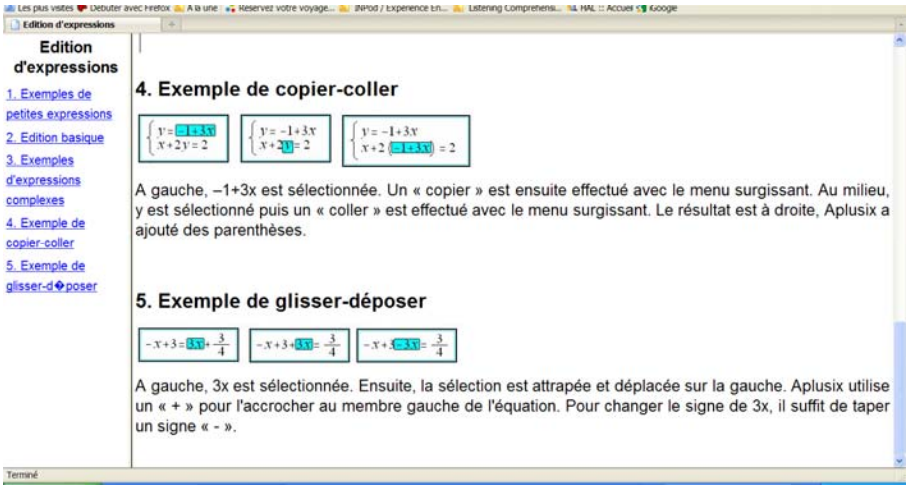


Figure 12, exemple d'édition d'expressions dans le logiciel Aplusix, pris dans le site du logiciel (http://aplusix.imag.fr/)

En relation avec le domaine de phénoménologie et les modèles des connaissances perceptivo-gestuelles, nous nous sommes intéressés à la réalité virtuelle, qui est pour nous une sorte de simulation interactive, et au concept d'énaction. Dans le cas de la réalité virtuelle et de l'énaction, ainsi que le suggère Thouvennin (2009), l'important est que la représentation corresponde à une logique sensorielle. Cette stratégie renvoie à un critère de capacité du calcul : il est inutile de représenter les objets avec tous les détails géométriques et tous les comportements qu'ils peuvent avoir alors que seul un aspect est pertinent. De la même façon, il est inutile d'augmenter de plus de 25 Hz les fréquences de rafraîchissement d'une image étant donné la persistance rétinienne de l'œil humain.

Les travaux menés à Liège par Blavier et al (Blavier, Gaudissart, Cadière, & Nyssen, 2007) sur la chirurgie laparoscopique ont montré, de notre point de vue, que selon le domaine de phénoménologie, les connaissances qui émergent ne sont pas les mêmes. Les auteurs ont comparé deux types de populations, des personnes qui ont appris le geste en utilisant la chirurgie laparoscopie classique et des personnes qui ont appris en s'aidant d'un robot (DaVinci) qui assiste le geste. Ils ont alors observé des différences : " *Data showed that training with these two techniques improved the performance and gesture accuracy of participants differently* ". Alors que souvent dans le développement d'un environnement d'apprentissage pour la chirurgie tous les efforts sont faits pour simuler de plus près le réel du patient afin de permettre le travail de n'importe quel geste, ces auteurs ont mis en évidence qu'il faut faire appel à des milieux différents pour l'apprentissage des deux techniques (classique et laparoscopique) : " *In conclusion, training with both techniques out of the operating room must be differentiated* ".

La conception de la rétroaction épistémique doit correspondre à une logique sensorielle, mais doit surtout être en rapport avec une logique phénoménologique.

2.1.1. Nos travaux sur le domaine de phénoménologie

2.1.1.1. Le domaine de phénoménologie de la preuve géométrie

Dans le cas de nos premiers travaux, Cabri-Euclide (Luengo V. , 1997), le domaine de phénoménologie est l'ensemble des énoncés, des faits et de leur organisation selon un modèle de preuves et réfutations proposé par Lakatos (1976). Autrement dit, les rétroactions produites par Cabri-Euclide sont basées sur le processus des preuves et réfutations, proposé pour modéliser la logique de la découverte et de l'élaboration des concepts en mathématique.

Le moteur de ce processus est une dialectique articulant des phases de proposition de conjectures pour répondre à un problème ou à une question ouverte, des phases de critique des conjectures à l'aide de contre-exemples, et des phases de dépassement de ces critiques grâce à divers moyens tels que l'augmentation du contenu de la conjecture ou la délimitation de son domaine de validité. Nous avons proposé trois types de réfutations à partir du domaine de phénoménologie : la réfutation figurale (exemple Figure 13) qui est en rapport à la figure (comme les contre-exemples) ; la réfutation épistémique, qui est liée aux statuts des énoncés proposés; et la réfutation déductive qui est liée au modus ponens, à la cohérence et à l'exactitude des pas et de leurs enchaînements.

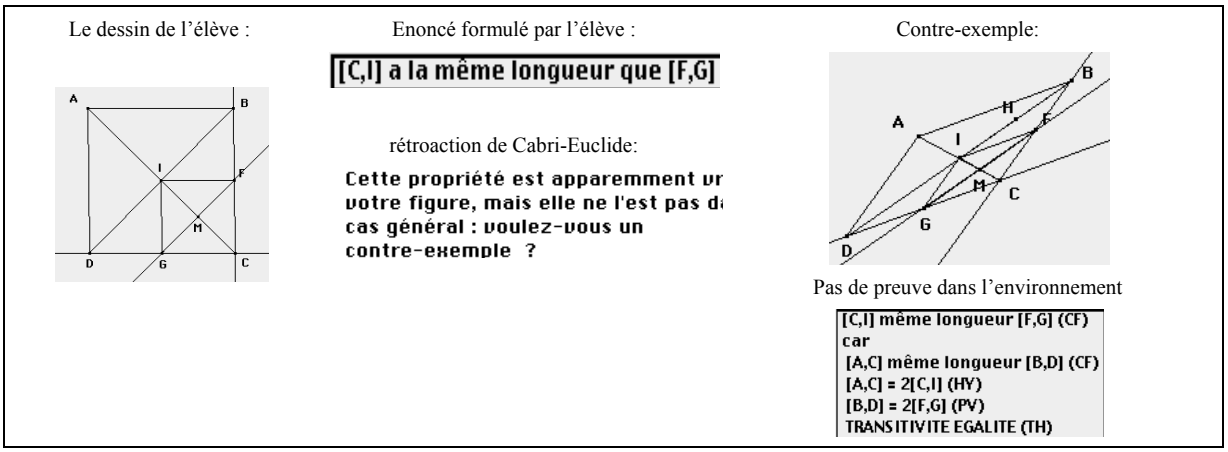


Figure 13, Scénario issu des expérimentations avec Cabri-Euclide (Luengo V. , 1997)

Le choix du domaine de phénoménologie induit des contraintes d'interaction. Dans l'exemple précédent, dans la relation entre construction de la figure et formulation de la preuve, nous avons justifié la contrainte que la formulation de la preuve dépende de la figure car il nous paraît essentiel de pouvoir produire des réfutations dans la figure géométrique, étant donné que notre objectif principal était, du point de vue phénoménologique, de produire une dialectique de preuves et réfutations. Une conséquence, sous forme de contrainte dans l'interaction, est que l'élève ne peut pas formuler un raisonnement correct sur une figure incohérente vis-à-vis des formulations.

Le domaine de phénoménologie induit également la forme des objets et leur manipulation. De ce point de vue et vis-à-vis de l'exemple précédent, nous avons cherché à respecter la contrainte que la création des définitions géométriques soit la plus proche possible du système de représentation manipulé par l'utilisateur dans l'environnement. Cela impose un ensemble de contraintes du point de vue informatique afin que le processus de création d'une définition n'exige pas de l'utilisateur d'autres connaissances que celles relatives à la construction d'une preuve en géométrie. Ainsi, par exemple, même si la création d'une définition implique du point de vue informatique un ajout de nouvelles règles, cet ajout doit se faire, aux yeux de l'utilisateur, dans le domaine de la preuve en géométrie (ajout de propriétés, objets) et non dans un domaine qui exige un autre niveau d'abstraction comme l'est la création de règles en calcul de prédicats.

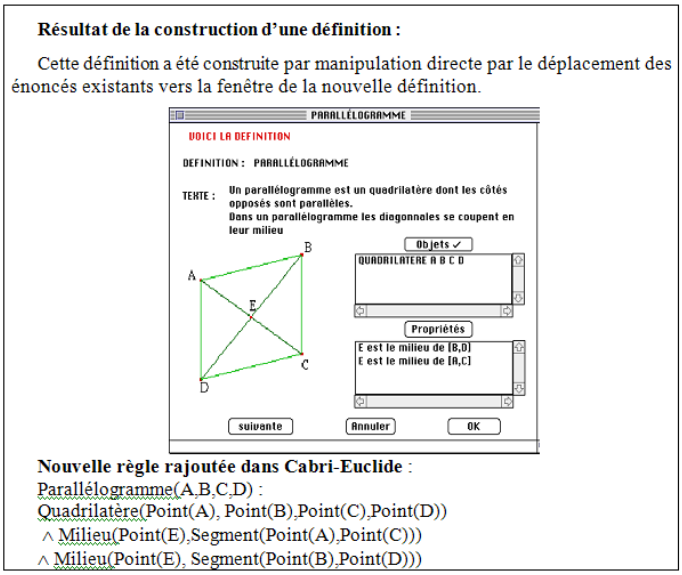
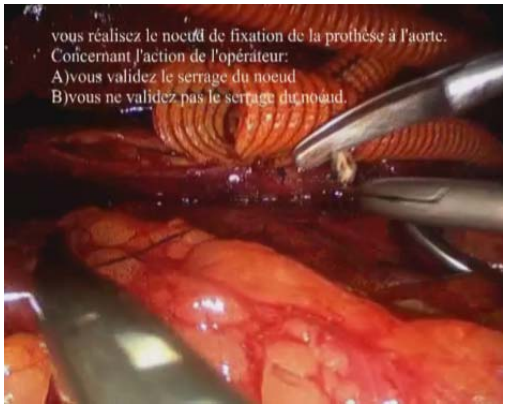


Figure 14, exemple de construction d'une définition dans le logiciel Cabri-Euclide

2.1.1.2. Le domaine de phénoménologie en laparoscopie urologique

Nous nous sommes intéressée au domaine de phénoménologie dans le cas de la chirurgie laparoscopique en Urologie, où le docteur Aurel Mesas de l'hôpital Max Fourestier de Nanterre a construit un simulateur vidéo à partir de vidéos issues des opérations (Messas, 2006). Nous avons proposé un cadre formel, vis-à-vis des connaissances en jeu, avec un processus d'analyse et un modèle de connaissances.

Dans ce cas de l'urologie, puisque le domaine de phénoménologie est centré sur la prise de décisions en utilisant les connaissances déclaratives, nous nous sommes intéressée à proposer un modèle de rétroactions de façon à expliciter des moyens de décision et de validation vis-à-vis de ces connaissances. Le principe était donc de montrer à l'apprenant des séquences vidéo associées à des situations de décision et de validation. Dans cette version l'interaction est sous forme de question-réponse. A partir de ce modèle, nous avons testé et mis en œuvre une première maquette pour la chirurgie laparoscopique aortique. Ce travail a été réalisé dans le cadre du master de chirurgie d'Arez Mameli (2008). L'article présenté à EIAH 2009 (Mameli, Luengo, Cau, & Mesas, 2009) en explique la démarche et les résultats. Dans la figure présentée ci-après, la question et les réponses sont construites à partir du modèle de connaissances. La question est construite, à partir d'un patron relatif à la validation d'une connaissance de technique opératoire et la séquence est choisie selon les valeurs des variables qu'elle contient en relation à l'anatomie, le temps opératoire, les instruments, et l'exposition de l'organe. Selon la réponse donnée par l'apprenant, des séquences seront choisies pour la valider ou l'invalider. Nous pouvons souligner que certaines séquences vidéo ne sont pas issues d'opérations ayant effectivement eu lieu mais ont été construites, en particulier pour mettre en relief certaines erreurs, quand les valeurs nécessaires des variables de connaissance manquaient dans la banque de vidéos.



Vidéo avec une question (associés de façon automatique)

Vidéo de réponse choisie (automatiquement) pour invalider la réponse

Figure 15, exemple d'une question dans la maquette du simulateur vidéo en chirurgie aortique laparoscopique

2.1.1.3. Le domaine de phénoménologie en orthopédie

Dans le cas de notre projet en chirurgie orthopédique, nous cherchons à déterminer le domaine de phénoménologie par l'analyse des relations entre les différentes types de connaissances et leurs interactions, ainsi que nous l'avons expliqué précédemment (§1).

Ainsi, dans les premiers travaux issus du projet VŒU (Vadcard, 2003), un premier simulateur a été réalisé pour permettre de s'entrainer sur le vissage iliaque sacré. Le principe de ce simulateur était de permettre à l'utilisateur d'actionner une broche sur un volume 3D du bassin (placer, orienter et enfoncer une broche) et de visualiser les radios correspondantes (les quatre incidences inlet, outlet, face et profil étaient disponibles, conformément à la pratique opératoire de ce geste). La position de la broche était calculée à chaque action et superposée aux incidences demandées par l'utilisateur sous la forme d'un trait noir.

Comme énoncé plus haut, des analyses didactiques ont montré la nécessité d'expliciter un domaine de phénoménologie qui met mieux en correspondance les relations entre les connaissances déclaratives, les connaissances empiriques, la perception visuelle et la perception haptique des propriétés spatiales.

Cela nous a conduits à développer une nouvelle version du simulateur (Couarraze, 2006), afin de permettre la mise en relation des connaissances déclaratives, des connaissances empiriques et des connaissances perceptivo-gestuelles. De plus, cette nouvelle version du simulateur conserve les traces des actions de l'utilisateur sous un format structuré, ce qui n'était pas le cas dans la première version. Ce système nous permet d'analyser l'action pour calculer la rétroaction correspondante.

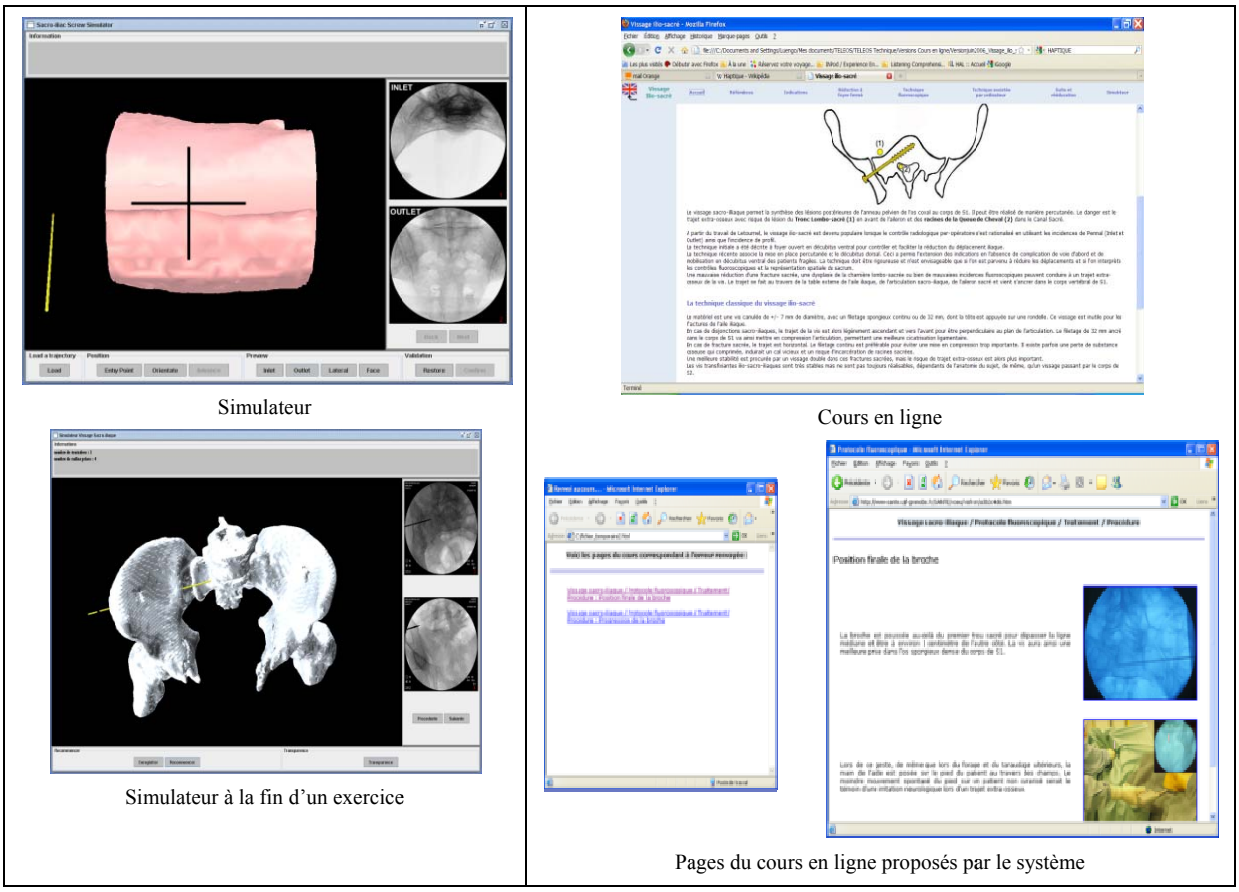


Figure 16. Copies d'écran de la première version du système du projet TELEOS 1

La relation entre la perception 2D (le contrôle radio) et 3D (le corps humain) est devenue tellement significative vis-à-vis du domaine de phénoménologie qu'elle a invalidé les deux premiers simulateurs issus respectivement du projet VOEU et du projet TELEOS1. En effet, les radios proposées à l'apprenant étaient des images radiographiques (2D) réelles d'un même patient. Ces radiographies avaient été segmentées de sorte à distinguer certaines parties du corps significatives du point de vue des connaissances identifiées. La position de la vis dans l'espace lors de la manipulation par l'apprenant sur le modèle 3D était alors transformée en position dans le plan sur l'image de la radiographie (comme on peut le voir dans la partie gauche de l'image qui montre la fin d'un exercice dans la Figure 16). L'analyse pour la rétroaction était établie en fonction des distances relevées entre la position de la vis et la position des parties segmentées des radios. Cette méthode comportait l'inconvénient que les distances entre la vis et une région d'intérêt étaient calculées à partir d'une image en deux dimensions. Dans certains cas, l'absence de la troisième dimension provoquait des décalages et de fait des calculs erronés.

Initialement ces erreurs avaient été considérées comme négligeables mais leur prise en compte s'est avérée fondamentale pour le calcul de la rétroaction. Nous pouvons donc souligner que le domaine de phénoménologie permet de valider ou invalider un environnement.

La nouvelle version du simulateur (Larcher, 2009) a été développée de sorte que l'image radiographique soit calculée et affichée à l'interface à partir du modèle 3D (Figure 17). Ainsi l'insertion du trocart faisant partie du modèle 3D, il ne peut plus y avoir d'erreur de calcul. Les détails techniques de l'implémentation sont présentés dans Larcher (2009).

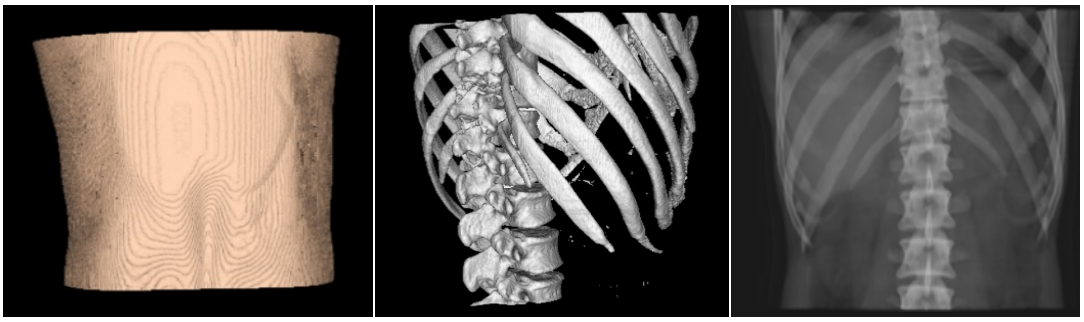


Figure 17, images issus de la troisième version du simulateur pour la chirurgie orthopédique (Larcher, 2009)

Ces techniques implantées dans la nouvelle version du simulateur nous ont également permis de renforcer la relation liée à la dimension visuelle, i.e. le rapport entre le modèle à deux dimensions (radiographies) et le modèle à trois dimensions (le corps) à l'écran. En effet nous avons pu ajouter de nouvelles fonctionnalités qui permettent à l'utilisateur de faire le réglage du fluoroscope (Figure 18) ainsi que de réaliser le repérage cutané[2] entre le modèle 3D et les contrôles radiographiques.

Figure 18. Copie d'écran de la troisième version du simulateur pour la chirurgie orthopédique (Larcher, 2009)

En rajoutant à cette nouvelle version un dispositif haptique (de type phantom Omni) nous voulions également renforcer la dimension phénoménologique liée à l'haptique spatial. En effet, la première version du simulateur étant monomodal et à deux dimensions en entrée (utilisation de la souris), l'utilisateur doit faire deux actions distinctes pour simuler l'action d'orienter la broche et celle de l'enfoncer alors que le dispositif haptique fournit les degrés de liberté suffisants (trois degrés) pour le domaine de phénoménologie associé au type de geste étudié. D'autre part, le traitement de la rétroaction dans la version préalable était centré sur la position finale de la broche (dans sa projection sur les différentes radiographies) cars nous ne pouvions rien dire, de façon déterministe, sur sa trajectoire réelle. Une inférence sur les informations à deux dimensions aurait ici pu induire des erreurs dans le calcul de la rétroaction.

[2] Le repérage cutané permet d'identifier, sur la peau sans incision, la vertèbre sur laquelle sera faite l'opération. Ce repérage est fait en positionnant un objet (le trocart) sur le corps et en prenant des radiographies.

Dans la version actuelle, nous disposons d'un système multimodal, en entrée et en sortie, qui nous permet, d'une part de comprendre l'action sans inférences, et d'autre part de proposer des rétroactions potentiellement plus ancrées dans les relations phénoménologiques des différentes connaissances en jeu, i.e. la relation entre le geste et sa perception visuelle et haptique.

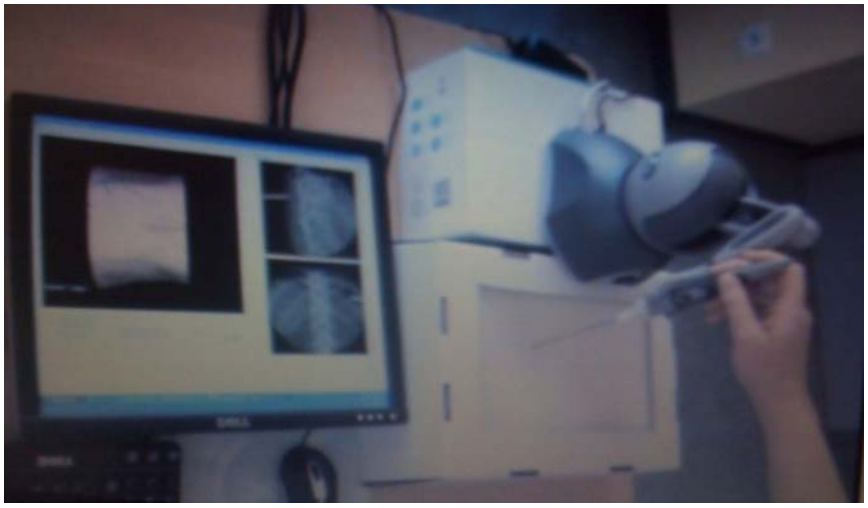


Figure 19, photo du simulateur de vertébroplatie avec l'interface haptique

Ce nouveau dispositif nous permet également d'envisager les connaissances haptiques des textures et en particulier la dureté, caractéristique potentiellement significative dans la mesure où le type d'intervention qui nous intéresse concerne un organe dur : l'os. Actuellement nous progressons dans l'analyse cognitive qui nous permettra, grâce à différents protocoles d'expérimentations (Luengo V. , Description projet TELEOS, 2009), de dégager les éléments phénoménologiques pertinents vis-à-vis de la connaissance en jeu.

2.1.2. La notion de fidélité phénoménologique dans nos travaux

Quelques résultats préliminaires dans les expérimentations citées plus haut nous ont conduits à choisir un dispositif haptique qui n'est pas le plus performant en ce qui concerne la force. En effet, les éléments identifiés et remarquables pour la relation entre les différentes connaissances sont les contrôles liés aux faits suivants : le trocart est rentré dans l'os / le trocart est en contact avec une corticale / l'extrémité du trocart se trouve dans le pédicule / le trocart est dans le corps vertébral (partie plus molle / le trocart est dans un espace fibreux / le trocart est sorti de l'os (trajectoire extra-osseuse). Ces caractéristiques sont différentiables avec le modèle de force que nous pouvons produire vis-à-vis du dispositif choisi. Il semble donc inutile de chercher la fidélité physique par rapport au domaine de phénoménologie. Ces contrôles sont rendus ostensibles par la mise en rapport entre les différents modèles de connaissances représentés.

Ainsi, en ce qui concerne la formation professionnelle et la transposition didactique, nous avons montré qu'il n'est pas nécessaire de proposer une fidélité technique par rapport à la réalité mais qu'il est plus efficace d'avoir une équivalence pertinente entre le problème identifié dans le travail et le problème mis en scène dans la situation didactique pour faciliter l'apprentissage.

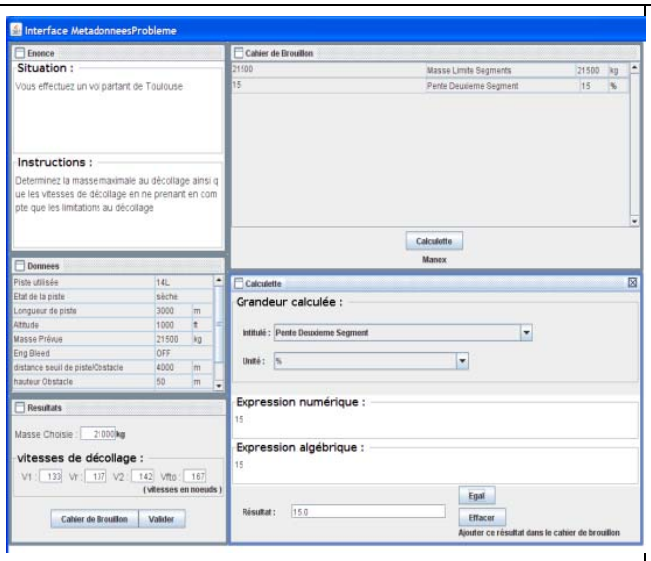
Comme nous l'avons montré (Luengo, Aboulafia, Blavier, Shorten, Vadcard, & J, 2009) : *"The case studies we have presented show that sometimes the training device must be as realistic as possible, as in the spinal anaesthesia example, and at other times the device does not need to recreate this level of "realism", as in the case of the bench models for the minimal invasive surgery."*

Le travail que nous avons mené en collaboration avec des pilotes de ligne de la compagnie Brit-air a été orienté dans ce sens. Après l'embauche par la compagnie, les pilotes doivent suivre une

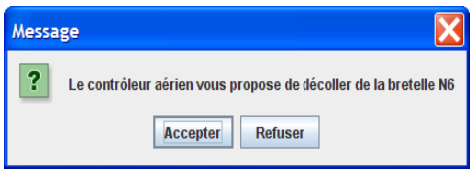
formation appelée « qualification de type »[3]. Cette formation se fait en grande partie sur des simulateurs de vol FFS (Full Flight Simulator). Or l'utilisation de ces simulateurs est très coûteuse et construite sur une conception didactique naïve. Cela pose des problèmes par rapport à certaines formes de connaissances (Larrieu, 2005), telles que les connaissances déclaratives et décisionnelles, ainsi que pour ce qui concerne leur transférabilité dans d'autres situations (Rogalski J. , 1995).

Nos travaux dans ce domaine se sont situés au niveau des notions qui doivent être acquises par le pilote avant qu'il ne débute sa formation avec le simulateur FFS. Ce savoir, vu sous un aspect théorique non encore validé par la pratique, constitue une base au traitement des situations qui seront étudiées avec le FFS. C'est précisément sur cette transition entre savoir théorique et utilisation de cette connaissance en situation de pratique professionnelle que nous avons décidé de nous concentrer.

Notre but était ainsi de fournir un ensemble de situations basées sur un dispositif informatisé d'apprentissage qui permette de construire la connaissance sur ce sujet. Dans le scénario de d'utilisation, montré dans la Figure 20, l'utilisateur doit expliciter (étape 1) toutes les variables à prendre en compte pour le calcul des limitations au décollage en considérant un site de décollage (obstacles, longueur des pistes, segments, etc..) et les variables propres au vol (poids, etc..). Une fois que l'utilisateur valide ces calculs, le système lui propose de changer de bretelle, et quand l'utilisateur l'accepte, il se retrouve dans le simulateur de vol avec les variables du problème (étape 2). Enfin, une fois le vol réalisé sur le simulateur, une restitution de l'activité est proposée (étape 3) et des rétroactions sont proposées (étape 4) à partir de l'analyse. Ici, le système lui propose de consulter une partie des connaissances déclaratives car le contrôle qui a été identifié comme mal utilisé est de nature déclarative (s'il y a un changement de bretelle, certains calculs de décollage doivent être refaits).



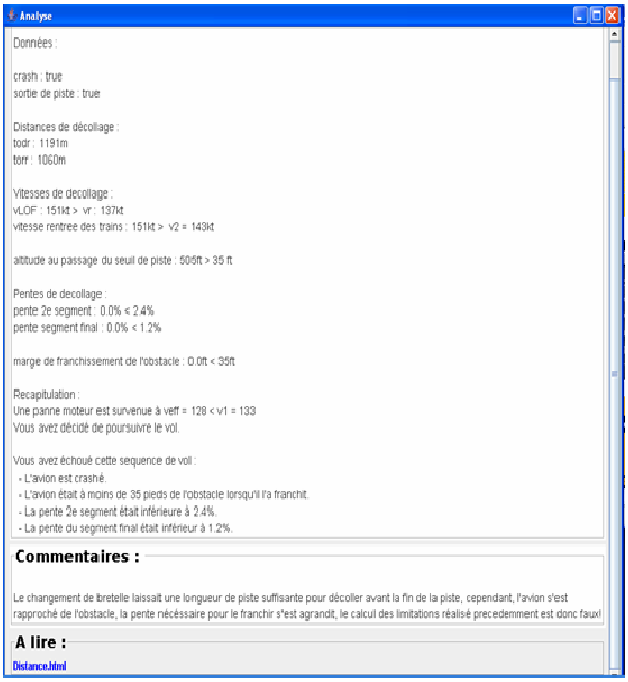
Etape 1 : outil de formulation et calcul des variables



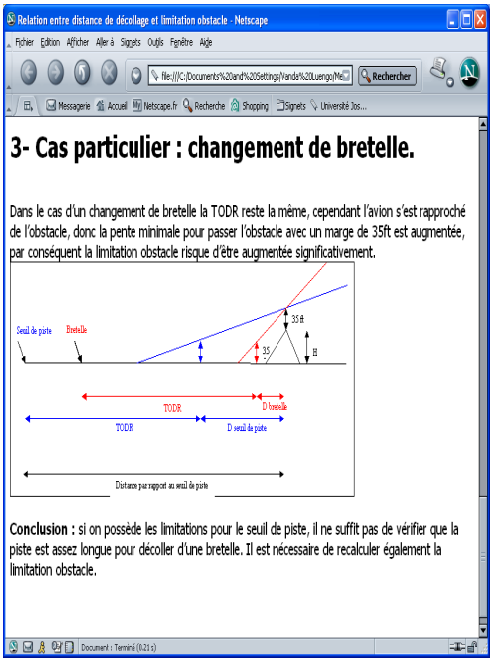
Etape 2 : Un exemple de message donné une fois validé l'étape de décision à propos du décollage

Etape 3 : Initialisation du simulateur Flight Simulator de Microsoft avec les variables du problème.

[3] Une « qualification de type » vise à former le futur pilote sur le type d'avion sur lequel il sera affecté.



Etape 4 : Restitution de l'activité et rétroaction proposant la consultation d'une partie du cours théorique



Etape 5 : consultation

Figure 20, Séquence d'interaction avec la maquette pour l'apprentissage des connaissances décisionnelles du décollage d'avion de ligne

Cet environnement d'apprentissage a été conçu pour permettre la construction de connaissances décisionnelles en relation avec les connaissances déclaratives. Il concerne la phase de décollage d'un avion de ligne en fonction de critères réels tels que masse de l'avion, température, altitude de l'aéroport, obstacles, etc. Cet outil de formation a été conçu pour être utilisé en phase initiale de « qualification du type ».

Certaines informations perceptivo-gestuelles ne sont pas significatives vis-à-vis du domaine de phénoménologie. Il n'est donc pas pertinent de prévoir des rétroactions de type haptique ou visuel. Nous nous attachons à simuler non pas le réel mais le problème (lié à la prise de décisions sur les variables de décollage). Nous parlons ici encore de fidélité phénoménologique plutôt que de fidélité physique (adhérence à la réalité qui est la vocation des FFS).

Nos avons montré que le but dans la conception des interfaces pour l'apprentissage en situation professionnelle n'est pas nécessairement celui de la fidélité technique par rapport à la réalité mais la fidélité phénoménologique par rapport aux connaissances en jeu.

Ainsi, il est essentiel de trouver un équilibre entre réalité et efficacité vis à vis des connaissances en jeu: *"the main challenge is to put forward computer tools, based on educational and cognitive science theories (Lillehaug & Lajoie, 1998), to re-think the TEL system in order to achieve adequate apprenticeship realism and to organize the feedback, which is linked to an interpretation of the user's actions in terms of knowledge used."* (Luengo, Aboulafia, Blavier, Shorten, Vadcard, & J, Novel Technology for learning in Medicine, 2009, p. 120).

2.1.3. Interface qui résiste

Un des objectifs principaux des travaux en interaction homme-machine et ergonomie est de produire des interfaces à usage le plus naturel et transparent pour l'utilisateur, des interfaces qui soient faciles à utiliser, autrement dit qu'il y ait le maximum d'affordance, que l'action soit naturelle et aisée en cherchant à limiter la charge cognitive que la tâche peut imposer.

Ces aspects peuvent conduire à une conception d'interfaces et d'interactions dans les systèmes qui offrent une économie de l'action ou qui assistent l'utilisateur dans sa tâche. Ors, dans le domaine de l'apprentissage, il faut que l'interface puisse garantir la signification de l'action vis-à-vis des connaissances en jeu et qu'elle respecte la charge cognitive demandée pour leur compréhension.

D'une certaine façon le système doit « résister » à une « économie de l'action» [4] et à la facilité de son utilisation de façon à garantir la signification des actions et la charge cognitive nécessaire par rapport aux connaissances en jeu.

Par exemple, si nous faisons le focus (Figure 21) sur l'exemple du logiciel Aplusix présenté plus haut (Figure 12) : si l'utilisateur sélectionne 3X à la droite de l'équation et le déplace à la gauche de l'équation, le terme déplacé garde son signe et c'est l'utilisateur qui doit ensuite changer le signe.

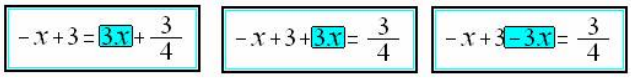


Figure 21, focus sur l'exemple de manipulation d'une équation dans le logiciel Aplusix (http://aplusix.imag.fr/)

Dans un logiciel de manipulation algébrique dédié aux experts, il aurait été possible de faire l'économie de l'action et de faire le changement de signe automatiquement. Faire l'économie de cette action dans un logiciel d'apprentissage enlèverait la signification liée au changement de signe, signification fondamentale dans le domaine algébrique.

Comme l'a montré Trouche (2003), l'utilisation des outils professionnels pour l'apprentissage peut être contreproductive : "*J'ai montré (ibidem) comment la disposition d'un outil sophistiqué, permettant de déterminer des limites de fonction, pouvait aboutir à l'émergence d'une notion «pressebouton » (la limite d'une fonction ayant pour seule référence une touche sur le clavier d'une machine). De façon générale, les systèmes complexes peuvent susciter une perte d'expertise […]. Il faut certes distinguer ce qui se passe dans le processus de travail et ce qui se passe dans le processus d'enseignement, où le discours sur les techniques (la technologie § 2.1) joue un rôle essentiel.*" (Trouche, 2003, p. 18).

2.1.3.1. Nos exemples d'interfaces qui résistent

En ce qui nous concerne, et dans le cas du projet avec les pilotes de ligne de Brit-Air, l'utilisation de méthodes simplifiées est largement répandue dans les situations réelles pour des raisons d'optimisation du temps. Ainsi quand le simulateur pleine échelle est utilisé en situation d'apprentissage il est possible d'utiliser le Manex (manuel d'exploitation) qui propose des procédures simplifiées. En ce qui concerne les connaissances que nous avons traitées, le Manex propose des procédures de vérification lors du décollage qui sont basées sur des tableaux et des raccourcis (Larrieu, 2005, p. 18).

Lors de la conception de notre système nous contraignons l'utilisateur à réaliser toutes les actions de vérification préalables au décollage, telles que celles présentées sous forme de raccourci dans des tableaux du Manex, manuel qui n'est pas accessible dans notre système lors de la résolution de la tâche. C'est par la réalisation des calculs que l'apprenti mobilisera les connaissances nécessaires pour la prise de décisions et la mise en œuvre des contrôles nécessaires pour permettre le décollage. C'est à ce moment que le système permet la mise en relation entre les connaissances déclaratives et les connaissances décisionnelles.

Du point de vue de la charge cognitive, nous trouvons des logiciels d'opération percutanée[5] permettant une double visualisation de l'action. Ils laissent voir le geste sur un modèle 3D du corps et sur un modèle 3D du corps « transparent », cela afin d'aider l'utilisateur à repérer son geste à l'intérieur du corps. Or, ce type d'interface fera l'impasse sur des connaissances fondamentales, que nous avons évoquées plus haut, qui sont des connaissances liées à l'anatomie spatiale du corps et sa représentation mentale. Ce type de facilité cognitive aura comme conséquence que les rétroactions du système ne pourront pas prendre en charge des erreurs liées au problème de repérage spatial de l'anatomie, qui est une connaissance essentielle.

[4] Merci à Nicolas Balacheff qui m'a soufflé cette formulation récemment

[5] Deux types de chirurgie existent : à foyer ouvert (ouvrant le patient) ou percutanée (sans ouvrir le patient).

Dans le système que nous proposons, l'accès à la fonctionnalité de visualisation de la trajectoire dans le volume osseux (sans peau) ne se fait qu'à la fin de la tâche, une fois que l'utilisateur l'a validée.

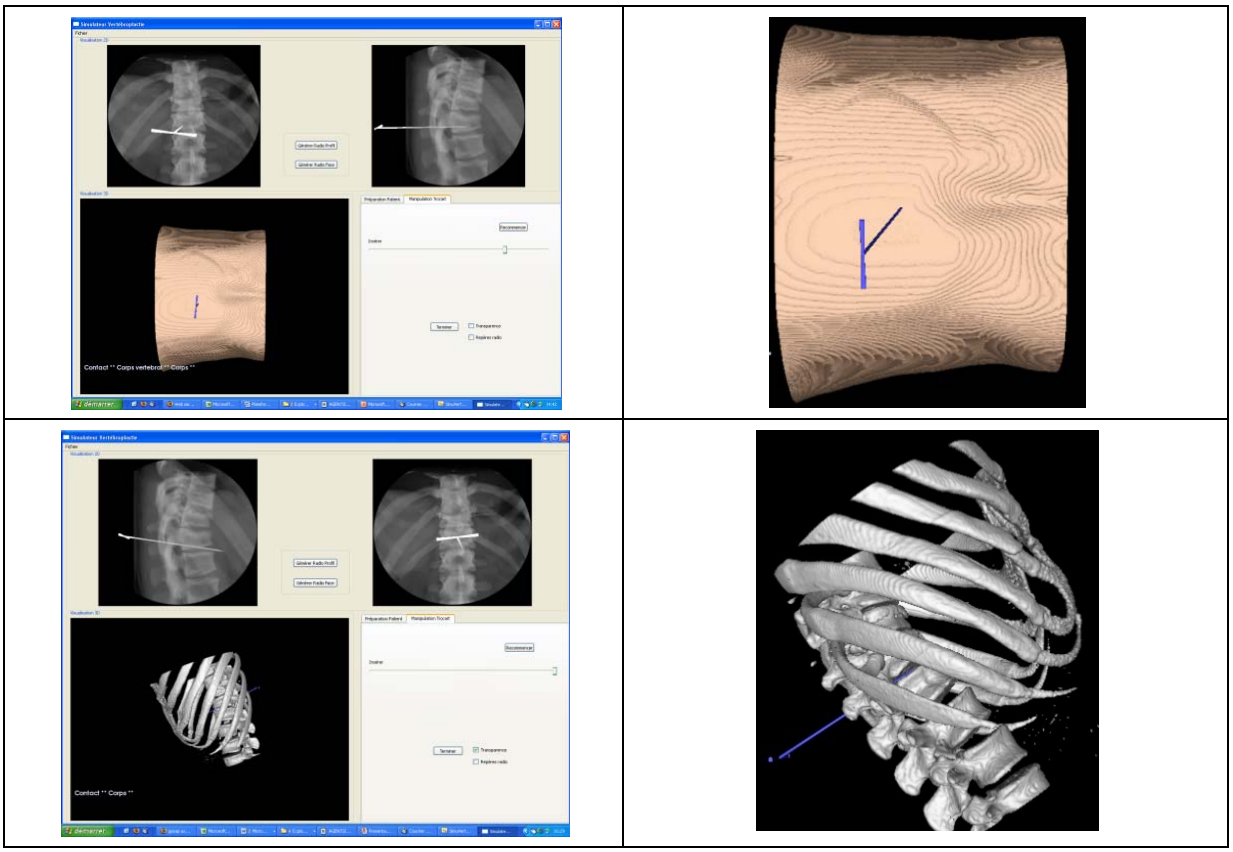


Figure 22, Copies d'écran du simulateur de vertébroplastie

2.2. Du système formel, ou représentation des connaissances, à la conception et au calcul de la rétroaction

La différenciation des connaissances peut se faire aussi par rapport à leur formalisation. Anderson et al (Anderson, Boyle, Corbett, & Lewis, 1990) présentent les connaissances déclaratives selon une représentation propositionnelle et les connaissances procédurales sous forme de règles de production.

Vis-à-vis des connaissances en jeu, le système formel, ou système de représentation, doit permettre la caractérisation des objets primitifs, les opérations qu'il est possible d'exercer sur ces objets et entre ces objets, ainsi qu'un ensemble de règles exprimant les conditions sur les opérations d'association entre les objets.

Nous pouvons observer que, dans le cas des systèmes hypermédia adaptatifs, éducatifs ou non, les systèmes proposés sont basés sur des connaissances déclaratives (Brusilovsky & Millán, 2009) et, s'ils proposent une représentation des connaissances, c'est alors sous la forme de graphes conceptuels ou d'ontologies.

Ainsi, la plupart des travaux en EIAH pour l'apprentissage des mathématiques utilisent un système formel de logique de premier ordre pour la représentation des connaissances du domaine. Dans le cas de la preuve en géométrie les logiciels tels que Geometry Tutor, DEFI ou Mentoniezh organisent les connaissances sous forme de faits et de règles.

Mais, quand les connaissances sont peu structurées ou de nature empirique, ce type de système logique (propositionnel ou de premier ordre) est moins efficace :

Trying to use first-order logic to cope with a domain such medical diagnosis fails for three main reasons:

Lazinnes: too much effort to list the complete set of antecedents or consequents needed to ensure an exception-less rule and too hard to use such rules.

Theoretical ignorance: Medical science does not have a complete theory for the domain.

Practical ignorance: Even if we know all rules, we might be uncertain about a particular patient because all necessary tests have not been or cannot be run. (Russell & Norvig, 2003).

D'autres systèmes formels sont donc proposés, tels que les réseaux bayésiens. Le diagnostic en médecine en est un des domaines privilégiés d'application. En ce qui concerne les EIAH, la plupart utilisent les réseaux bayésiens en raisonnant sur des représentations qui incluent le modèle de l'apprenant [(Hibou M. , 2006) ou (Hibou & Labat, 2006)], comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

Un exemple représentatif est celui du système TeachMed (Kabanza, Bisson, Charneau, & Jang, 2006) car il produit la rétroaction en raisonnant uniquement sur le modèle de connaissances du domaine quand bien même ces connaissances sont transposées pour être appliquées dans un système d'apprentissage.

Ce système contient un réseau bayésien de type diagramme d'influence. Il est construit pour des connaissances liées au diagnostic clinique. Une partie d'un réseau bayésien, extrait d'un exemple présenté dans le même article (Kabanza, Bisson, Charneau, & Jang, 2006), est montré ici (Figure 23).

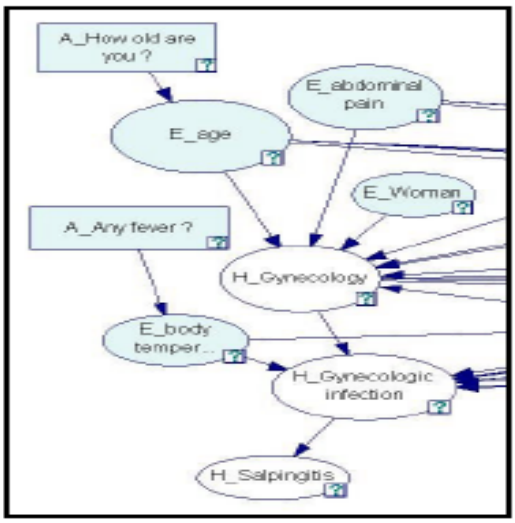


Figure 23, partie du réseau bayésien sur le diagnostic clinique dans le domaine de la douleur pelvienne, proposé par Kabanza et al. (Kabanza, Bisson, Charneau, & Jang, 2006).

Dans ce réseau sont spécifiés les nœuds de causalité tels que les évidences (nœuds commençant par E_) et les hypothèses (nœuds commençant par H_) qui sont l'ensemble des faits (les symptômes et pathologies par exemples). Les actions sont des nœuds d'utilité (nœuds sous forme de rectangle commençant par A _) qui permettent de rechercher les symptômes à partir des valeurs d'utilité.

La rétroaction est construite à partir de ce réseau en utilisant l'état actuel de la situation. Ces deux facteurs déclenchent les règles de rétroaction : *"Tutoring feedback is implemented based on a clinical influence diagram, the current system state, feedback rules triggered by the current system state, and a clinical reasoning automaton that sequences clinical reasoning sub-processes and corresponding feedback rules."* (Kabanza, Bisson, Charneau, & Jang, 2006).

La génération de la rétroaction se construit à partir d'un ensemble de règles appelées « feedback rules » (comme par exemple if student-asks-help (interpret, test, results) then hint-test-interpretation (test, results)). Cette technique, combinée à des patrons de dialogues, permet ainsi de créer des situations d'interaction comme celles montré dans la Figure 24.

Collected Evidences: Young woman, acute abdominal pain not lateralized, temperature (38.5C)
Student: *Added hypothesis*: Salpingitis
TeachMed Tutor: Could you specify your hypothesis hierarchy before proposing that hypothesis? (Yes/No)
Student: Yes.
TeachMed Tutor: Formulate your hypothesis.
Student: *Added hypothesis*: Gynecology
Student: *Added positive link*: Gynecology – young woman
Student: *Added positive link*: Gynecology– abdominal pain
Student: *Added hypothesis*: Salpingitis
TeachMed Tutor: Could you specify your hypothesis hierarchy before proposing that hypothesis? (Yes/No)
Student: No
TeachMed Tutor: How about *pain location* ? *fever* ? Can you give me an hypothesis related to these evidences ?(Yes/No)
Student Yes
TeachMed Tutor: Formulate your hypothesis.
Student: *Added hypothesis*: Gynecologic Infection
Student: *Added positive link*: Gynecology – Young woman

Figure 24 Illustration d'un dialogue. Extrait pris dans (Kabanza, Bisson, Charneau, & Jang, 2006).

Cette rétroaction est donc intelligente et adaptative. Le raisonnement est réalisé à partir du modèle de connaissance du domaine.

De façon générale, les langages formels, par leur position ontologique et épistémologique, sont déterminants pour le calcul de la rétroaction. Ainsi que le montre le Tableau 6, la position ontologique et épistémologique de la logique propositionnelle, conduit à ce que tous les faits existant dans le monde soient considérés comme vrais, faux ou inconnus. En conséquence la rétroaction ne pouvant se concevoir que sur des faits, les calculs ne raisonnent que sur les valeurs vrai, faux ou inconnu. Dans le cas de la logique de premier ordre on peut concevoir d'autres formes de rétroaction, à savoir sur des objets et des relations. Enfin dans le cas d'un langage basé sur la théorie des probabilités la rétroaction pourra se calculer en prenant en compte des degrés de croyance.

Tableau 6, Les langages formels et leur position ontologiques et épistémologique. Tableau pris du livre de Russel et Norvig dans sa version française (Russell & Norvig, 2006, p. 274)

Langage	Position ontologique (ce qui existe dans le monde)	Position épistémologique (attitude d'un agent à l'égard des faits)
Logique propositionnelle	Faits	Vrai/Faux/Inconnu
Logique du premier ordre	Faits, objets, relations	Vrai/Faux/Inconnu
Logique Temporelle	Faits, objets, relations, temps	Vrai/Faux/Inconnu
Théorie des probabilités	Faits	Degré de croyance $\in[0,1]$
Logique Floue	Faits avec degré de vérité $\in[0,1]$	Valeur dont l'intervalle est connu.

2.2.1. Nos systèmes formels vis-à-vis des connaissances en jeu

Dans Cabri-Euclide, le système de représentation est un ensemble de faits et règles, qui font que le système est en logique du premier ordre, bien que dans ce cas nous n'ayons pas utilisé un langage formel de type logique du premier ordre.

Dans le cas de la thèse de Sandra Michelet, où nous nous intéressons aux connaissances en électricité sur des circuits électriques en courant continu, le domaine de connaissances est formalisé en logique du premier ordre (implémenté en Prolog).

Nous avons ainsi proposé un système formel de type logique de premier ordre dans nos travaux où les connaissances sont bien structurées et explicites (démonstration en géométrie, circuits électriques).

Dans le cadre de notre projet en urologie un des objectifs étant de systématiser la méthode de conception des rétroactions et de produire des rétroactions automatiques, et sachant que les enseignants en chirurgie souhaitaient des interactions sous la forme de question-réponse, nous avons étudié la façon dont cela pouvait se faire à partir de ces vidéos structurées par des métadonnées issues

du modèle des connaissances (que nous avons présenté dans le point §2.1.1.2). Ces méthodes sont développées dans (Mameli, Luengo, Cau, & Mesas, 2009). En résumé nous avons proposé la construction de patrons de questions qui sont caractérisés de façon identique à celle des séquences vidéos (dans l'exemple du Tableau 7, le temps opératoire = dissection et les variables des connaissances utilisées : anatomie = veine rénale gauche, instrument = ciseaux,..). Des réponses sont associées aux questions, ces réponses étant l'expression des règles. Les règles sont associées à des messages différents selon la valeur de leur évaluation (vraie ou fausse suivant la vidéo).

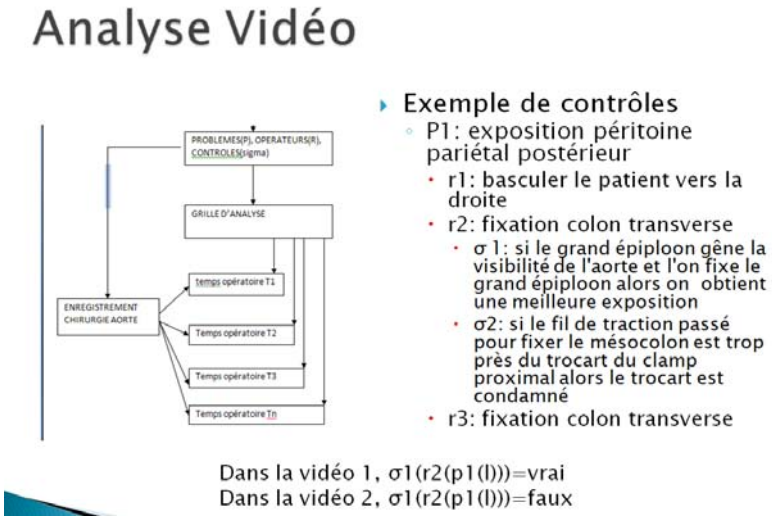


Figure 25 Exemple d'analyse vidéo. Image prise de l'exposé fait lors de la conférence EIAH 2009 (Mameli, Luengo, Cau, & Mesas, 2009).

Ainsi nous pouvons voir dans l'exemple ci-dessous que la réponse « C » fait appel à deux règles (σ1et σ2) et que dans le cas de la séquence S1 la règle σ2 est correcte alors que dans la séquence S2 elle est incorrecte.

Tableau 7, Un exemple d'association d'une question avec des séquences vidéo différentes

Question : Vous menez la dissection de la veine rénale gauche. Concernant cette dissection	**Séquence S1**	**Séquence S2**
A) Vous validez l'utilisation des ciseaux	σ1(r2(p1))=vrai	σ1(r2(p1))=vrai
B) Vous validez la dissection avec les ciseaux à bouts fermés sans coagulation	σ1(r2(p1))=vrai	
C) Vous ne validez pas l'utilisation des ciseaux dans la dissection	σ1(r2(p1))=vrai σ2(r2(p1))=vrai	σ1(r2(p1))=vrai σ2(r2(p1))=faux

Nous avons ainsi établie des règles de navigation entre la question et les possibles réponses, comme par exemple :

Si dans micro-module « question » la réponse choisi correspond σi(r(p(l)))=faux alors module explication où séquence vidéo σ2(r(p(l)))=faux + texte explication suivi de séquence vidéo σ2(r(p(l)))=vrai + texte rémédiation.

Si dans micro-module « question » la réponse choisi correspond σi(r(p(l)))=vrai alors module illustration où séquence vidéo σ2(r(p(l)))=vrai + message correct.

Même si nous n'avons pas utilisé de langage formel correspondant, ce système est en logique de premier ordre, les faits étant les éléments de connaissances en jeu et les règles correspondant aux validations sur les actions et la navigation. L'algorithme de rétroaction calcule l'état de la connaissance et parcourt les règles de navigation explicitées.

Nous avons pu constater ici que le système formel proposé est limité par rapport au type des connaissances étudiées : "*La transcription des connaissances identifiées sous la forme d'un modèle en « temps opératoire », « opérateurs », « règles » [..] n'a pas toujours été applicable de façon fidèle aux problèmes réellement posés durant l'intervention. Ce modèle ne laisse que peu de place à la survenue*

d'incidents, d'évènements inopinés, de variations interindividuelles obligeant à modifier de façon importante l'acte opératoire qui ne sont pas prévus et peuvent survenir même bien après la phase d'apprentissage." (Mameli, 2008).

Ainsi, dans nos premières études, qui comparaient les formes des connaissances entre la preuve en géométrie et la chirurgie orthopédique (Mufti-Alchawafa, 2003), (Mufti Alchawafa, Luengo, & Vadcard, 2004), afin de réutiliser la plateforme d'apprentissage, nous avons déjà souligné la nécessité de recourir à des représentations différentes. Cela tient, en effet, à la qualité de la structuration des connaissances en jeu.

Nous nous sommes intéressées à d'autres systèmes formels, plus particulièrement aux réseaux bayésiens. Nous avons choisi ce système formel d'une part en raison de la théorie sur laquelle ce système de représentation est basé (la probabilité bayésienne), d'autre part pour la structure de causalité proposée, avec des graphes orientés qui permettent d'avoir une représentation visible et interprétable, et enfin parce qu'il est possible de donner une interprétation fréquentiste aux probabilités, ce qui permet de donner du sens aux pondérations modélisant l'incertain. Un réseau bayésien[6] est un graphe orienté sans circuit dont les nœuds sont des variables probabilisées et dont la topologie traduit les dépendances entre celles-ci.

Les types des connaissances nous ont également dirigés vers ce système de représentation. Comme nous l'avons montré plus haut (§1), les connaissances décisionnelles sont au cœur de notre environnement d'apprentissage humain et la plupart des applications qui relèvent de la représentation des connaissances avec des réseaux bayésiens sont des applications d'aide à la décision (ibid. p 191). En effet, par sa nature, et selon le domaine de connaissance, la prise de décision implique une dimension d'incertitude, caractéristique naturelle des réseaux bayésiens.

Dans le domaine médical, nous devons donc associer différents systèmes formels selon le type des connaissances en jeu. Ainsi, des connaissances telles que l'anatomie sont des connaissances déclaratives, bien structurées. Pour le projet TELEOS, nous avons donc choisi les ontologies en tant que système formel (Luengo & Vadcard, 2005). Par contre, nous avons choisi les réseaux bayésiens pour les connaissances de nature empirique (perceptivo gestuelles en lien avec les connaissances décisionnelles). Cette modélisation et la façon dont elle fonctionne seront étudiées plus en détail dans le chapitre suivant.

La rétroaction proposée est aussi calculée à partir de plusieurs systèmes formels. Nous avons développé un agent qui est composé d'une ontologie des connaissances déclaratives sur les techniques du vissage iliaque-sacré. L'ontologie a été conçue avec le langage OWL. C'est donc un ensemble de classes (Anatomie, procédure chirurgicale, imagerie, etc..) organisées de façon hiérarchique, et associées grâce à un ensemble de propriétés (est contrôlé par, utilise, etc..) et des restrictions (Figure 26).

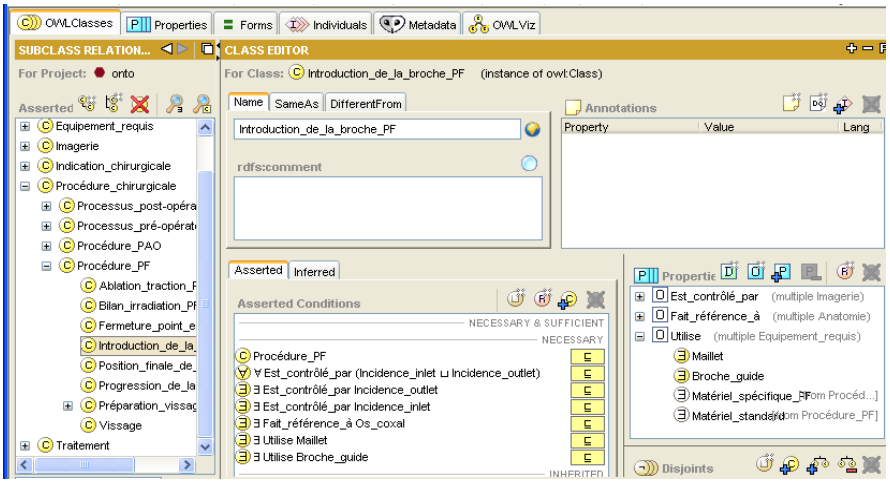


Figure 26, partie de l'ontologie du vissage iliaque-sacré

[6] Pour en savoir plus sur les réseaux bayésiens, nous recommandons l'ouvrage très complet et pédagogique de Naïm, Wuillemin, Leray, Pourret et Becker (1999, 2004, 2008).

Par ailleurs, des cours en ligne ont été conçus et nous y avons ajouté des métadonnées à partir de l'ontologie. Cela nous permet ainsi de raisonner sur l'ontologie à partir d'un ensemble de mots clés et de trouver un ensemble d'instances de classes pertinentes pour ensuite chercher les pages web qui possèdent ces métadonnées. Des interfaces de test on été développées (Figure 27). L'agent que nous avons appelé webSémantique Orthopédie (Luengo & Vadcard, 2005) a été ainsi intégré à la plateforme TELEOS.

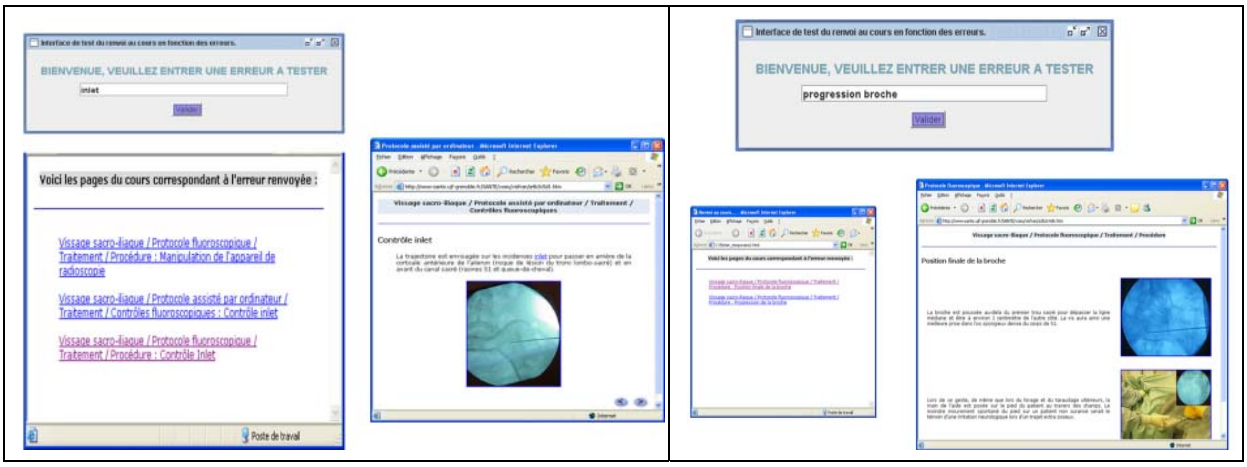


Figure 27, exemples des rétroactions calculés sur des connaissances déclaratives dans le projet TELEOS

Par ailleurs, en ce qui concerne la connaissance de nature empirique, nous pourrions proposer le même type de rétroactions que dans les travaux présentés par Kabanza & al. (Kabanza, Bisson, Charneau, & Jang, 2006), mais nous avons fait le choix de calculer ce type de rétroaction en prenant en considération le modèle du sujet épistémique. En effet ces connaissances étant de nature incertaine, nous faisons l'hypothèse que le calcul de la rétroaction sera plus pertinent si le domaine d'incertitude est réduit par d'autres dimensions épistémiques, c'est-à-dire la prise en compte de l'action du sujet dans le système. Cela sera présenté dans le chapitre suivant.

3. Résultats liés aux connaissances en jeu et le calcul des rétroactions épistémiques

Nos premiers résultats dans ce chapitre sont des modèles de connaissances construits à partir des cadres théoriques de la didactique.

Les modèles de connaissances en électricité et en preuve pour la géométrie sont des modèles déclaratifs parce que les connaissances dans ces domaines sont bien structurées et explicites.

Les modèles en formation professionnelle ont montré la nécessité de différencier la nature des connaissances. En effet, comme certaines connaissances procédurales et perceptivo-gestuelles sont souvent de nature empirique, il a été nécessaire de modéliser cette dimension empirique. L'analyse a également démontré la nécessité de créer des mécanismes qui permettent le passage des connaissances déclaratives aux connaissances empiriques. Nos modèles explicitent la nature des connaissances.

Tous nos modèles sont évalués par introspection. Nous avons validé l'adéquation et la caractérisation de nos modèles auprès des experts.

Nous avons également mis en place une méthodologie pour passer de l'analyse didactique à la formalisation des connaissances. Nous avons mis à l'épreuve cette proposition en l'appliquant à différents domaines de connaissances dans la formation professionnelle : vissage ilio-sacré, vertébroplastie, laparoscopie urologique, laparoscopie cardiaque et décollage pour les pilotes de ligne.

Cette méthodologie prend en compte la pluridisciplinarité des acteurs qui interviennent dans l'analyse. Elle était initialement qualitative et centrée expert mais avec la prise en compte des connaissances perceptivo-gestuelles, souvent tacites, nous cherchons à améliorer cette méthodologie de façon à intégrer des modèles centrés données, qui sont des modèles quantitatifs. Cette modification permettra de nouvelles formes de validation.

Comme nos modèles explicitent les caractéristiques des connaissances mais aussi leur nature, cela permet de dégager les aspects nécessaires pour la conception de nos systèmes informatiques et pour le calcul de rétroactions pertinentes.

En conséquence, nous avons construit des environnements à partir des modèles des connaissances en jeu que nous avions élaborés. Ces environnements sont des micromondes ou des simulateurs car dans leur conception le seul modèle épistémique qui intervienne est le modèle des connaissances en jeu. Ces environnements sont déterminés par rapport au domaine de phénoménologie des connaissances en jeu. Nous proposons de considérer également la notion de fidélité phénoménologique plutôt que de fidélité technique.

Nos premières évaluations sont la réification des concepts présentés dans le développement de ces différents environnements : micromondes et simulateurs. Nous avons également réalisé des validations empiriques auprès des utilisateurs finaux afin d'évaluer l'utilisabilité des nos environnements.

Nous avons montré dans les points précédents que les caractéristiques et la nature des connaissances doivent être explicitement différenciées dans les modèles de connaissances. Nous avons montré ensuite la nécessité de considérer la structure de ces connaissances pour le choix du système formel.

Dans le cas du projet TPElec, comme dans le cas de Cabri-Euclide, nous avons proposé des systèmes formels en logique de premier ordre. Dans des domaines où les connaissances sont partiellement déclaratives mais aussi empiriques, tel que la chirurgie orthopédique, nous avons montré la nécessité d'associer plusieurs systèmes formels.

L'originalité de nos travaux dans cette partie repose sur l'association de plusieurs systèmes formels afin de calculer des rétroactions en fonction de la nature de la connaissance. Une rétroaction à propos d'une connaissance déclarative sera calculée dans le système formel déclaratif (l'ontologie par exemple) et une rétroaction à propos d'une connaissance empirique sera calculée dans le système formel empirique (les réseaux bayésiens, par exemple).

Aussi, selon la nature de ces connaissances, des environnements différents leurs sont associés. Dans le cadre du projet TELEOS, les connaissances empiriques sont mises en jeu dans un simulateur, les connaissances déclaratives sont agrégées à un hypertexte et l'ensemble de ces deux dimensions est associée à des cas cliniques (sous la forme d'une base de données).

Nos validations ici sont de plusieurs types. D'abord nous avons validé par inspection nos systèmes formels. Nos avons ainsi proposé des interfaces de test, comme dans le cas de l'ontologie présentée précédemment (Figure 27). Nous avons ensuite validé l'intégration de ces systèmes formels. Enfin, nous avons validé, par introspection au près des experts, l'adéquation des rétroactions produites vis-à-vis des connaissances en jeu.

4. Connaissance en jeu et rétroaction épistémiques, quelques perspectives

Les perspectives abordées dans ce chapitre concernent principalement l'ingénierie des environnements informatiques d'apprentissage humain qui doit permettre des conceptions centrées *connaissances en jeu*.

Les frontières de ces perspectives avec celles de l'ingénierie des connaissances sont floues. En effet, le problème commun est celui de proposer des modèles, langages et processus pour passer de l'élicitation des connaissances aux conceptions et validation des environnements.

Comme nous l'avons présenté dans ce chapitre, les modèles résultants de l'analyse seront différents selon les caractéristiques des connaissances en jeu. Comme notre objectif est l'apprentissage de ces différentes formes de connaissance, il est nécessaire de différencier de façon explicite leur nature et leurs relations du point de vue de l'apprentissage. C'est dans ces différentes formes de connaissances que nous voyons la différence entre l'ingénierie de connaissance et l'ingénierie des EIAH.

En effet l'ingénierie de connaissance est née de la conception des systèmes experts et son objectif est d'aider les experts d'un domaine dans l'analyse, la capitalisation et les partages de ses connaissances. L'ingénierie de connaissances ne pose pas la question de l'interaction avec des

utilisateurs non experts (les apprenants) et donc le problème de l'évolution des connaissances lors des interactions.

Le principe de capitaliser et de partager les connaissances entre experts explique en partie que les recherches en France dans le domaine de l'ingénierie de connaissance ont une réelle dynamique autour des ontologies. Ceci est également dû à l'influence du web et à la connaissance vue comme une information textuelle: "*Enfin, nous pensons que la problématique et le succès du Web sémantique ont de fortes convergences avec les approches textuelles défendues ici : en effet, le succès du Web vient du fait que les utilisateurs ont eu à leur disposition un énorme fonds documentaire d'une information contextuelle, utilisable : des documents*." (Charlet, 2002, p. 41).

Dans le domaine des EIAH les ontologies ont le même souci de spécification et partage des connaissances déclaratives : "*Ontologies serve many roles in the field of artificial intelligence in education (Mizoguchi and Bourdeau, 2000). As a shared vocabulary they represented domain knowledge and tutoring strategies and address a variety of problems: the lack of authoring tools, incompatible tutors (knowledge and components are rarely sharable or reusable), the need to compare existing systems, and the requirement that agents communicate fluently"*. (Woolf, 2009, p. 370).

En conclusion, les avancées sont ici dans le domaine des connaissances déclaratives. Or, comme nous l'avons montré précédemment, la question se pose également pour des domaines peu structurés. C'est dans cette direction que nous allons consacrer nos efforts futurs.

En effet nous centrons nos recherches actuelles et futures sur l'élicitation des connaissances moins classiques dans le domaine des EIAH, telles que les connaissances empiriques ou les connaissances tacites (connaissances perceptivo gestuelles).

Le courant de recherche appelé ill-defined knowledge, qui a émergé récemment (Aleven & Bodnar, 2007) dans la communauté d'intelligence artificielle et éducation avec l'organisation de workshops lors des conférences associées, pose des questions proches des nôtres : "*Often even well-defined domains are increasingly ill-defined at the edges where new knowledge is being discovered. Ill-defined domains lack well-defined models and formal theories that can be operationalized, typically problems do not have clear and unambiguous solutions. For those reasons ill-defined domains present a number of unique challenges for researchers in Artificial Intelligence in Education. These challenges must be faced if the AIED community is ever to branch out from the traditional domains into newer arenas. Over the past few years a number of researchers have begun work in ill-defined domains such as law, medicine, professional ethics and design."* (Aleven & Bodnar, AIED Applications in Ill-Defined Domains, 2007).

Nous avons dans cette problématique deux objectifs : 1) améliorer la qualité du processus de collecte et d'analyse des données ; 2) proposer des modèles et processus compréhensibles et acceptables pour l'ensemble des personnes qui interviennent dans le processus de conception centré *connaissances* (experts du domaine, didactique, science de l'éducation, psychologie cognitive et informatique).

« Améliorer la qualité du processus de collecte et d'analyse des données » comprend la nécessité de trouver un équilibre entre un modèle centré *expert*, qui peut être efficace mais dont la validation est souvent qualitative et empirique, et un modèle centrée *données*, qui peut être systémique et avec lequel on peut faire une validation quantitative, mais dont la variété et le nombre d'observables sont déterminants vis-à-vis de la pertinence du modèle.

Nous cherchons à produire une démarche itérative en partant d'un modèle centré *expert* pour aller vers un modèle centré *données*. Pour progresser dans cette voie, nous avons établi des collaborations avec l'équipe Multicom du laboratoire LIG et les équipes GMCAO (gestes médicaux chirurgicaux assistés par ordinateur) et SPM (santé, motricité, plasticité) de TIMC. Cette collaboration se réalise dans le cadre du projet TELEOS dont l'objectif du point de vue de la collecte des données est de proposer un ensemble de données structurées qui comprennent les verbalisations des experts, des vidéos annotées à partir du modèle de connaissance centré *expert,* et des données perceptivo gestuelles obtenues avec des capteurs comme l'occulomètre, les goniomètres, l'accéléromètre, etc… L'analyse commun et pluridisciplinaire de ces données est un de nos objectifs.

Une perspective, qui est une conséquence de ce type de données qui sont complexes (plusieurs sources, données événementielles et données des trajectoires), est la fouille et analyse de données

complexes. Nous nous sommes associés au groupe de recherche *Educational data mining* (International Working Group on Educational Data Mining), même si actuellement ce groupe a plutôt une dynamique autour des données dans des systèmes d'apprentissage plus classiques. Nous avons également proposé avec Cristine Conati (University of British Columbia) un projet de collaboration autour de l'apprentissage des données à partir des réseaux bayésiens et nous avons approché (Luengo V. , 2008) l'équipe A3 du laboratoire LIPN, Paris 13, équipe spécialiste du domaine de l'extraction de connaissances à partir de données complexes (A3, 2009).

Concernant le deuxième aspect, plus classique en ingénierie des connaissances, nous prévoyons de proposer des modèles ou des langages permettant de partager les modèles de connaissances en jeu pour pouvoir les traiter ensuite. L'originalité serait d'orienter cette recherche au domaine métier (celui des EIAH). Nous avons ainsi élaboré un projet que nous comptons développer au sein de l'équipe Metah, autour de personnes qui s'intéressent aux modèles de connaissances. Nous avons présenté ce projet lors des journées de travail autour du modèle ck¢ en novembre 2008.

5. Bibliographie de nos travaux sur la connaissance en jeu et les rétroactions épistémiques

Abrial, B. (2003). *Modélisation de la connaissance dans l'enseignement de la chirurgie orthopédique.* Grenoble: Master Environnements Informatiques pour l'apprentissage Humain. Université Joseph Fourier.

Beauvissage, E. (2005). *Amélioration du simulateur pour le vissage sacro-iliaque.* Grenoble: Maîtrisse MIAGE. Université Joseph Fourier.

Blavier A., Zottmann J, Aboulafia A., Vadcard L., Luengo V., Dieckmann P. Learning with Simulations in Medical Education. Validity and Design of Learning Settings in Particular Contexts. *International Conference for Learning Science*s. Netherlands 2008. 8 pages.

Carreras, E. (2005). Utilisation de l'environnement SimQuest pour une simulation des limitations au décollage. Grenoble: L3 MIAGE. Université Joseph Fourier.

Ceaux, E., Vadcard, L., Dubois, M. & Luengo, V. Designing a learning environment in percutaneous surgery: models of knowledge, gesture and learning situations. *European Association for Research on Learning and Instruction*, Amsterdam (The Netherlands). Août 2009.

Coone, T., Lavault, J., Mauvais, F., & Ulpiano, E. (2007). *Agents des cas cliniques dans le projet TELEOS.* Grenoble: Troisième année Département d'Ingénieurs en Technologie de l'Information pour la Santé. Université Joseph Fourier.

Couarraze, L. (2006). *Développement en Java 3D d'un simulateur de vissage sacro-iliaque.* Grenoble: Master 2 Professionel « Ingénierie de l'Image et de la CAO », Université Joseph Fourier.

Herrero, S. (2005). *Modélisation d'une ontologie en chirurgie ortopédique.* Grenoble: Master 1 des méthodes informatiques appliquées à la gestion d'entreprises.

Kiril, G., & François, .. (2007). *Etat de l'art sur le retour haptique pour la prise en compte du geste en chirurgie.* Grenoble: Travail d'etude et de recherche, trosième année informatique. Université Joseph Fourier.

Larcher, A. (2009). Conception d'un simulateur en chirurgie orthopédique. Grenoble: CNAM.

Larrieu, S. (2005). Modélisation de la connaissance des pilotes de ligne : les limitations au décollage. Grenoble: Master 2. Information, Cognition, Apprentissage.

Luengo V., (1996). Un micromundo para la resolución de problemas de demostración en geometría. *Conferencia Latinoamericana de informática*, PANEL, pp.45-59, Bogota, Colombie.

Luengo, V. (1997). Cabri-Euclide: un micromonde de preuve intégrant la réfutation. Principes didactiques et informatiques. Réalisation. Grenoble: Thèse Université Joseph Fourier.

Luengo V., Balacheff N., Contraintes informatiques et environnements d'apprentissage de la démonstration en mathématiques. *Sciences et Techniques Educatives*, vol. 5 no 1-1998, pp. 256-277.

Luengo, V. (1999). A semi-Empirical Agent for learning mathematical proof. *Artificial Intelligence and Education* (pp. 475-482). Amsterdam: IO Press.

Luengo, V. (1999). Analyse et prise en compte des contraintes didactiques et informatiques dans la conception et le développement du micromonde de preuve Cabri-Euclide. *Sciences et Techniques Educatives , 6* (1), 256-277.

Luengo, V., Mufti-Alchawafa, D., & Vadcard, L. (2004). The knowledge like the object of interaction in an orthopaedic surgery-learning environment. *International Conference on Intelligent Tutoring Systems* (pp. 108-117). Macéio, Brésil: Springer.

Luengo, V. (2005). Some didactical and epistemological considerations in the design of educational software : the Cabri-Euclide example. *International Journal of Computers for Mathematical Learning* , 1-29.

Luengo, V., & Vadcard, L. (2005). Design of adaptive feedback in a web educational system. Workshop Adaptive Systems for Web-Based Education: Tools and Reusability. In International Conference on Artificial Intelligence in Education (p. 5 pages). Amsterdam : Springer-Verlag.

Luengo V., Vadcard L., Mufti-Alchawafa D., De la didactique à l'informatique pour la conception d'un EIAH en chirurgie orthopédique. Actes de la conférence « *Extraction et Gestion de la Connaissance* », EGC janvier 2006. 6 pages.

Luengo, V. (2006). Un modelo propuesto a partir de la inteligencia artificial y la didáctica EMA, *Investigación e innovación en educación matemática*, 10, 205-241. Colombia.

Luengo, V., Aboulafia, A., Blavier, A., Shorten, G., Vadcard, L., & J, Z. (2009). Novel Technology for learning in Medicine. Dans N. L. Balacheff, T. de Jong, A. Lazonder, & S. Barnes, *Technology Enhanced Learning. Principles and products.* (pp. 105-120). Berlin: Springer Verlag.

Mameli, A. (2008). *Conception d'un simulateur vidéo de chirurgie aortique laparoscopique.* Paris: Master 2 de Sciences Chirurgicales, Université Paris 12.

Medina, N. (2004). *Simulations, Scénarios et Gestion des Connaissances en électricité.* Grenoble: Master 2, Environnements informatique pour l'apprentissage humain.

Mufti-Alchawafa, D. (2003). *Outil pour l'apprentissage de la chirurgie orthopédique à l'aide de simulateur.* Grenoble: DEA Informatique, Systèmes et Communication. Université Joseph Fourier.

Vadcard L., Luengo V, (2004). Embedding knowledge in the design of an orthopedic surgery learning environment. In : CALIE04, *International Conference on Computer Aided Learning in Engineering* education, Grenoble.

Vadcard, L., & L. V. (2005). Réduire l'écart entre formation théorique et pratique en chirurgie : conception d'un EIAH,. *Environnements informatiques pour l'Apprentissage Humain* (pp. 129-140). Montpellier : INRP.

Vadcard, L., & Luengo, V. (2005). Interdisciplinary approach for the design of a learning environment. *E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, and Higher Education.*, (p. 5 pages). Vancouver.

CHAPITRE IV

Le sujet et la rétroaction épistémique

Le sujet épistémique est l'actant, au sens de Brousseau (1997). Tel que présenté par l'auteur, le sujet agit sur le milieu de façon rationnelle et économique dans le cadre des règles de la situation. En tant que modèle d'un élève ou plus généralement d'un sujet, il agit en fonction de son répertoire de connaissances.

Dans le domaine des EIAH, ce sont les recherches autour des tuteurs intelligents qui se sont intéressées aux modèles informatiques de l'apprenant. Les premiers travaux visaient à obtenir un modèle formel computable qui permettrait au système de piloter l'apprentissage en fonction de l'apprenant. A la fin des années 80, suite à des publications de recherche (Self J. , 1988) ou (Sleeman, Kelly, Martinak, Ward, & Moore, 1989), des équipes de recherche, surtout en Europe, ont abandonné cette direction. Les deux arguments les plus utilisés pour motiver ce désintérêt à propos du modèle de l'apprenant sont alors :

- Les rétroactions spécifiques à l'erreur diagnostiquée ne sont pas plus efficaces que des rétroactions génériques, cet argument est avancé en se reposant, entre autres, sur l'article de Sleeman et al. (Sleeman, Kelly, Martinak, Ward, & Moore, 1989).
- Les problèmes liés à la modélisation de l'apprenant sont insurmontables (ou en anglais intractable problem of student modelling) en utilisant comme appui l'article de Self (1988).

En ce qui concerne le premier argument, l'étude très complète de Sleeman et al. (Sleeman, Kelly, Martinak, Ward, & Moore, 1989) montre des expériences avec un tuteur en algèbre (PIXIE) et compare les résultats des apprenants suite aux remédiations du tuteur artificiel qui ciblent l'erreur identifiée par le diagnostic, avec les résultats des apprenants suite à une remédiaton consistant « simplement » à enseigner à nouveau les cours d'algèbre, sans cibler l'erreur en particulier. Une première conclusion de ce travail est qu'enseigner à nouveau est plus efficace. Une autre conclusion est qu'un enseignement procédural peut être plus efficace en utilisant des outils informatiques classiques (CAI) qu'en ayant recours à des systèmes tuteurs intelligents (ITS). Le même auteur avance que cela ne veut pas dire que la conception d'un ITS est possible, mais qu'elle est plus difficile qu'espéré initialement (ibid. p. 565). Nous pensons que ces travaux ne mettent pas en cause l'utilité du modèle de l'apprenant et les tuteurs intelligents en général, mais plutôt la forme de la remédiation. En effet, le modèle utilisé, appelé MBR (Model based remediation), proposait une orientation procédurale, c'est-à-dire des suggestions sur ce qu'il fallait faire, construites à l'aide de règles associées aux erreurs.

En ce qui concerne le deuxième argument liée à l'article de 1988 de Self, il semble qu'il y ait eu un « malentendu » scientifique, comme le montre un autre article du même auteur :

"The earlier ITS 88 paper on "bypassing the intractable problem of student modelling" (Self, 1988) has been well-referenced but unfortunately by many who have read only the title (although I am grateful for that). The aim was not to say that student modelling is intractable and should be avoided (the paper was poorly titled!) but to argue that the nature of student modelling needed to be reconceived, away from the form which was being heavily criticised at the time, to make it more tractable. The first thread - the aim of 'caring' systems, supported by student models - remained strong for me.

The pessimistic interpretation of the paper was in keeping with the mood of the ITS field at the end of the 1980s, which one might describe in one word as 'opprobriated' (if it were a word). A great deal of opprobrium was being heaped upon ITS research from all directions, including from within itself, for many leading figures (such as Brown, Wenger, Clancey, Sleeman and Soloway) now considered that AIED research was misguided, relying as it appeared to do on out-moded philosophies of knowledge and learning." (Self J. , 1999)

C'est principalement dans des laboratoires de recherche en Amérique du Nord où les travaux sur la modélisation de l'apprenant ne se sont jamais arrêtés. Ces laboratoires, tel que le centre d'apprentissage à Pittsburg (Pittsburgh Science of Learning Center, 2009), ont une hégémonie sur le sujet, que nous pouvons constater par le nombre d'articles lors des conférences phares sur le domaine (AIED et ITS).

De « nouvelles » recherches ont ainsi montré que ce type de modèle aide le suivi intelligent (Baffes & Mooney, 1996) dans le cas où le modèle n'a pas un degré d'interaction trop contraint et à condition que soient prises en compte plusieurs dimensions du sujet, comme l'indiquent Arroyo, Woolf et Beal (Arroyo, Woolf, & Beal, 2006) :

"The results of experiments with two intelligent tutors, AnimalWatch and Wayang Outpost, converge to support the conclusion that enhancing user models with detailed information about user cognitive characteristics can lead to improved instructional response. Incorporating information about young students' cognitive development characteristics allows for more sensitive user models, which in turn can be used to provide qualitatively different kinds of help to students […]".

De plus, ce type d'interaction proposé à partir du modèle de l'apprenant a évolué. Il n'est plus uniquement question de contraindre l'interaction de l'élève vis-à-vis d'un modèle expert en lui suggérant ce qu'il faut faire, mais d'utiliser le modèle pour comprendre le sujet et de s'adapter en conséquence :

Adapt feedback based on performance level: Different levels of support, both amount and type, should be available based on a student's knowledge and problem-solving level. That is, we observed that the expert instructor systematically provided support and feedback with respect to the students' content knowledge levels and their ability to work through the problem solving process. Our ITS should therefore be designed with these capacities. (Lajoie, Faremo, & Wiseman, 2001).

Du point de vue informatique, l'idée de complétude devient moins centrale, en acceptant de travailler sur des modèles incertains ou sur des classes de modèles. Une communauté très dynamique s'est ainsi constituée (www.educationaldatamining.org) autour de travaux visant à faire émerger des classes de modèles en analysant des traces d'apprenant.

Enfin, des systèmes formels plus récents tels que les réseaux bayésiens, des techniques plus avancées et mieux établies dans le domaine du DataMining ainsi que des nouvelles technologies s'intéressent en particulier à l'adaptation (Brusilovsky P. , 1999), font que la recherche sur le modèle d'apprenant connaisse un nouvel essor. Ces nouveaux systèmes cherchent à proposer des degrés de contrainte d'interaction moins élevés. En Europe, le projet européen ActiveMath (Saarland, 2009) en est un bon exemple des nouveaux efforts autour du modèle de l'apprenant et de l'adaptation.

Dans cette partie nous allons présenter des théories d'apprentissage parce qu'elles montrent les positions à propos du sujet vis-à-vis de l'apprentissage sur lesquelles le modèle d'apprenant et la rétroaction sont construits de façon implicite ou explicite. Nous nous intéresserons uniquement aux modèles qui possèdent au moins une implémentation.

Nous avons choisi d'étudier quelques systèmes de diagnostic issus de ces modèles pour illustrer nos propos, sans que les techniques de diagnostic soient le sujet central de notre recherche.

Enfin, comme nous l'avons indiqué dans notre problématique, nous ne nous intéresserons qu'aux dimensions épistémiques. Ainsi des dimensions telles que les émotions ou les affects de l'apprenant ne sont pas discutées ici, même si nous reconnaissons qu'elles peuvent jouer un rôle dans l'interaction et que ces dimensions deviennent incontournables dans les conférences principales du domaine, comme en témoignent les derniers actes des conférences AIED 2009 et ITS 2008.

1. Le sujet épistémique en tant qu'apprenant

En ce qui concerne les théories d'apprentissage, l'approche cognitiviste, par opposition au behavorisme (Weil-Barais, 1994, p. 422), propose d'expliquer les changements de comportements chez le sujet grâce à des opérations mentales. Plusieurs courants cognitivistes expliquent différemment comment ces opérations mentales sont effectuées par le sujet ainsi que les systèmes symboliques utilisés.

1.1. Des théories d'apprentissage

1.1.1. La cognition est « traitement de l'information »

Une des théories les plus représentatives du courant appelé *traitement de l'information* est la théorie ACT proposée par Anderson et dont la dernier version est publiée dans (Anderson, Bothell, Byme, Douglass, Lebiere, & Y., 2004) ; elle est largement utilisée dans les EIAH. Dans ce type de courant, l'intérêt porte sur les formes de stockage des contenus et notamment sur les formes dans lesquelles les concepts sont représentés (Weil-Barais, 1994, p. 423). Les formes de connaissance prises en compte initialement dans cette théorie sont les connaissances déclaratives et les connaissances procédurales. Ce courant fort du cognitivisme (Rogalski J. , 2004, p. 107) pose comme postulat l'invariance des opérations des modules, tels que les modules de mémorisation, catégorisation, inférences, etc.., et donne à la mémoire un rôle central.

Ainsi, selon ACT il y a la mémoire procédurale et la mémoire déclarative, auxquelles sont associés des mécanismes d'apprentissage : " *Declarative recording, Strenghening, Knowledge compilation, generalisation and discrimination* " (Anderson, Boyle, Corbett, & Lewis, 1990).

Tels que présentés par Anderson, Boyle, Corbett et Lewis (1990) les deux modèles cognitifs auxquels s'intéresse la théorie ACT (modèle de performance et modèle d'apprentissage) ont été intégrés dans les tuteurs informatiques et sont utilisés pour comprendre les comportements des apprenants. Les auteurs ont ainsi proposé deux formalismes appelés le traçage de modèles et les traçages de connaissances, dont nous verrons des applications dans le point deux de ce chapitre. Le système de diagnostic, basé sur ces traçages, permet de reconnaître la modification des connaissances des apprenants à travers les problèmes : "*The information that results from knowledge tracing can be used to disambiguate alternative interpretations in model tracing and can be used for selecting problems to optimize learning*" (ibid p. 8).

1.1.2. Le constructivisme

Un autre courant cognitiviste utilisé dans les EIAH est le courant piagétien ou constructivisme. Ce courant valorise essentiellement les opérations mentales. L'évolution de la pensée se traduit par des changements importants dans les opérations mentales. *La formation de concepts et des modèles mentaux est subordonnée au développement des opérations mentales* (Weil-Barais, 1994, p. 423). Ainsi, l'apprentissage est centré sur le développement des opérations mentales. De nombreux EIAH (en particulier les hypertextes et les micromondes) se réclament de l'approche constructiviste, et donc du cognitivisme piagétien. Il n'existe cependant pas pour ce courant de modèle formel informatisé spécifique tel que le traçage de modèle vis-à-vis d'ACT. Nous trouvons dans la littérature un article de John Self (Self J. , 1999) qui interroge l'architecture classique des tuteurs vis-à-vis du constructivisme. Du point de vue du modèle de l'apprenant, il propose non seulement de prendre en considération la comparaison du modèle expert au modèle de l'apprenant en termes de connaissances mais aussi d'identifier dans l'interaction des invariants facilitant l'apprentissage. Self propose donc de superposer le modèle d'interaction au modèle classique de l'apprenant dans les tuteurs intelligents :

Typically, the student model of an ITS is determined by analysing the student's interactions with reference to the model of domain knowledge in order to determine gaps or errors which may form the basis for instructional interventions. If, however, as constructivists argue, the student's individual constructive process (leading to personal constructions perhaps unrelated to any target knowledge) is more important than the particular product of any learning process, then our model of the learner should focus more on the interactive process, extended in time, taking into account the learner's actions, the contexts in which they occurred, and the learner's cognitive structures at the time. Developing such an interaction process model' enables us to consider the kinds of regularities of interaction sequences which lead to properties which benefit or hinder learning. As we have indicated, the learner's cognitive structures may form part of the descriptions of the time-extended interactive process, for the significance of interactive events may depend on individual cognitions. However, the aspects of cognitive structures to be considered are of a different nature and assume different roles than in standard ITSs, as they are taken in relation to the context and activity that constitute learning

interactions. Thus, again, the notion of an interaction process model is, in a way, a superset of (rather than in opposition to) that of an ITS-style student model.(ibid. p 362).

Un autre positionnement vis-à-vis de cette théorie est que si on regarde d'un point de vue purement constructiviste, puisque l'apprenant est le responsable de sa propre connaissance, les efforts de modélisation informatique ne doivent pas porter sur la modélisation informatique de l'apprenant lui même mais plutôt sur l'organisation, ou l'orchestration des ressources et la modélisation des situations d'apprentissage (Woolf, 2009, p. 115). L'orchestration des apprentissages sera étudiée dans le chapitre suivant puisqu'elle relève plus du modèle des situations que du modèle d'apprenant, même si ces dimensions sont intimement liées.

1.1.3. La cognition situé forte et la cognition situé faible

Weil-Barais affirme (2004, p. 423) que, dans des domaines fortement conceptualisés, aucune de ces conceptions (traitement de l'information ou constructiviste) ne s'avère satisfaisante car les connaissances sont fortement contextualisées.

Aussi, le cadre théorique de l'action située, puis de la cognition située, mettent en cause ces modèles, et affirment que les processus mentaux ne peuvent être isolés du contexte de l'action et que celui-ci est nécessairement social.

Une dimension importante de l'action située et de la cognition située est donc celle du caractère social de la cognition, non-isolable dans l'individu : les processus mentaux ne peuvent être isolés de leur contexte extra-individuel, ce contexte est nécessairement social, et la cognition est socialement distribuée (via le langage et/ou des outils cognitifs). La notion de communauté de pratique est centrale : *« Social interaction within an authentic context is critical because learners become involved in a "community of practice" that embodies beliefs and behaviors to be acquired »* (Woolf, 2009, p. 117). Ce courant a été qualifié de cognition située forte (Rogalski J. , 2004).

Ainsi, la cognition située forte et l'action située ont donné naissance à des environnements d'apprentissages de type collaboratif dont la grande majorité est axée vers les interactions sociales et néglige la dimension épistémique. Les travaux d'Engeströom sont à la base de beaucoup de ces systèmes. Comme expliqué dans Rogalsky (2004, p. 113) : *la théorie des systèmes d'activité développée par Engeström (Engeström , 1993), qui considère plutôt l'activité et la cognition individuelles comme des cas singuliers de système d'activité, et ne travaille pas la distinction « tâche / activité ». Il s'agit en fait de « dérivations » différenciées des cadres théoriques initialement élaborés par Vygotsky et Léontiev.*

La cognition située faible est une évolution de la cognition située forte résultant de débats entre cognitivistes. Au sein des EIAH, elle est largement représentée par les travaux de Clancey (1997). Critiquant ses précédents travaux réalisés à partir de modèles d'expertise (Clancey, 1987) et relevant du courant traitement de l'information, il propose une relation entre des perspectives sociales, neurologiques et représentationnelles. Comme expliqué par Rogalski (2004, p. 103) : "*Il prend en compte : le contenu de la connaissance, sa forme (perception, conception, action motrice), et les façons dont le comportement est improvisé. Il insiste sur le rôle de l'interaction sociale, verbale dans les constructions des descriptions du monde. On trouve dans la présentation de Clancey de multiples références aux activités des acteurs, mais sans qu'il y ait pour autant de prise en compte d'une théorie de l'activité. ".*

1.1.4. Le caractère contextualisé des connaissances chez le sujet

Ohlson (1995) insiste sur la différence à faire, du point de vue de la modélisation cognitive, entre l'apprentissage pour faire (learning to do) et l'apprentissage pour comprendre (learning to understand).

Cette différentiation est manifeste par les contextes d'apprentissage. « L'apprentissage pour faire » est le plus développé dans les environnements informatiques d'apprentissage parce qu'il concerne les connaissances procédurales. Les environnements associés offrent des activités telles que la résolution des problèmes et intègrent des modèles d'apprenant.

« L'apprentissage pour comprendre » est relatif à des connaissances que l'auteur qualifie de connaissances évoluées (higher order learning) auxquelles est associé un ensemble de tâches épistémiques : décrire, exposer, prédire, argumenter, critiquer, expliquer et définir.

Des courants de recherche actuels, qui nous semblent proches de ce dernier paradigme et du constructivisme, travaillent sur le raisonnement investigatif (inquired learning) (Slotta & Linn, 2009) ainsi que sur le support intelligent des environnements d'exploration (https://sites.google.com/a/lkl.ac.uk/isee/). Du point de vue des systèmes informatiques, ces recherches consacrent d'importants efforts à construire des environnements permettant à l'apprenant d'observer, collecter, organiser, visualiser, et communiquer l'information afin de mieux comprendre et proposer des résultats. C'est une voie prometteuse mais qui s'intéresse actuellement plus à la démarche d'investigation et aux environnements exploratoires qu'au processus de modélisation propre à l'apprenant et donc ici il n'y a pas, jusqu'à présent, un modèle reconnu et informatisé de l'apprenant.

Nous considérons que, comme avancé par certains auteurs, la notion de contexte n'a donc pas comme seul axe de recherche l'interaction sociale. *La prise en compte du caractère contextualisé des connaissances au plan psychologique est quelque chose de tout à fait important. On confond souvent, en effet, le statut des connaissances individuelles avec celui des connaissances générales faisant l'objet d'une élaboration sociale.* (Weil-Barais, 1994, p. 424).

Le caractère contextualisé des connaissances semble incontournable et il faut mettre en place des mécanismes particuliers de décontextualisation pour qu'elles acquièrent un statut général chez le sujet. Ainsi, d'un point de vue plus épistémique et centré sur le sujet, Vergnaud (1991) prend en compte le contexte avec la théorie des champs conceptuels où une connaissance générale ne peut acquérir ce statut qu'intégrée à un réseau de concepts. Dans l'exemple cité par Weil-Barais (ibid. p 424), l'addition ne deviendra un concept général qu'intégrée à un ensemble de concepts mathématiques, car un enfant qui a appris l'addition comme une composition des parties en un tout (j'ai 4 billes dans une main et 3 billes dans l'autre main…) ne serait pas nécessairement capable de résoudre un problème du type composition de transformations (j'ai joué deux parties, Pierre a gagné trois billes dans la première partie,...).

Un concept est ainsi pour Vergnaud un triplet de trois ensembles : "*l'ensemble des situations qui donnent du sens au concept (la référence), l'ensemble d'invariants sur lesquels repose l'opérationnalité des schèmes (le signifié) et l'ensemble des formes langagières et non langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept, ses propriétés, les situations et les procédures de traitement (le signifiant*)" (Vergnaud, 1991, p. 145). Le schème, ou pensée en acte, est défini comme organisation invariante de l'activité, pour une classe définie de situations. Enfin les champs conceptuels peuvent être considérés comme un ensemble de situations, non au sens didactique (que nous travaillerons dans le chapitre suivant), mais plutôt dans le sens de tâche, avec l'idée principale qu'une situation complexe pourra être analysée comme une combinaison de tâches dont il est important de connaître la nature et la difficulté (ibid., p 146) vis-à-vis du sujet.

1.1.5. La didactique professionnelle, à l'intersection de la théorie de l'activité et de la dimension épistémologique constructiviste

Enfin, nous pouvons voir que la didactique professionnelle propose l'intégration des cadres théoriques issus de la psychologie ergonomique, liés à la théorie de l'activité, et issus de la didactique des disciplines scientifiques et techniques, permettant ainsi de prendre en compte certains aspects ignorés dans la psychologie des apprentissages sous le versant traitement de l'information et mis en avant dans l'apprentissage situé. La notion de contexte sera donc reprise du point de vue de la connaissance et de l'action grâce aux théories auxquelles elle fait appel : *« la didactique professionnelle articule une approche de théorie de l'activité issue de Léontiev (dont le cadre a été résumé en particulier par Savoyant, 1979) et une approche développementale (inspirée de Vergnaud, 1990). L'approche développementale retenue en didactique professionnelle vise à intégrer la dimension épistémologique piagétienne (l'analyse de la tâche est le pendant de l'analyse du savoir disciplinaire) avec la dimension socio-constructiviste vygotskienne (la communauté de pratique étant un médiateur dans l'acquisition des compétences professionnelles). "* (Rogalski J. , 2004, p. 116).

Une notion importante dans ce domaine est celle de compétence. Pour Pastré (2002), c'est la forme opératoire de la connaissance qui est au centre de la compétence. Être compétent n'est pas savoir appliquer un ensemble de connaissances à une activité, c'est savoir organiser son activité pour s'adapter aux caractéristiques de la situation. Pour Rogalski (2004), l'expertise est une compétence professionnelle de haut niveau. La compétence effective est définie comme le système de

connaissances et d'instruments cognitifs mis en œuvre par un sujet, pour l'exécution de la tâche. C'est donc dans l'action que se manifeste la compétence. Rogalski (2004, p. 116) souligne également l'importance, dans le cadre de la didactique et de la formation professionnelle, de tenir compte des différences, divergences et complémentarités des compétences individuelles existant lors de l'action.

Dans nos travaux nous avons fait le choix de prendre en compte la notion de cognition située uniquement par sa dimension épistémique, c'est à dire vis-à-vis des connaissances en jeu. Le sujet possède des connaissances, qui sont situées par les modes de mise en œuvre (actions) qu'il choisi, la tâche à résoudre (le problème) et les représentations associées (registres).

L'objectif est de disposer d'un EIAH qui valide la cohérence interne des solutions et des processus de résolution proposés par le sujet, en tant que sujet épistémique, et qui fournisse des retours appropriés liés à la connaissance en jeu vis-à-vis de son contexte.

Ainsi, si nous regardons le sujet vis-à-vis des connaissances et du processus d'apprentissage, nous nous positionnons comme Weil-Barais (1994, p. 416), pour laquelle il n'y a pas de mécanisme unique d'apprentissage. Elle propose d'abandonner l'idée d'une théorie générale et de centrer l'étude sur les opérations de pensée à l'œuvre dans des domaines de connaissance particuliers. En conséquence, de notre point de vue, il est nécessaire de considérer le type de connaissance et le processus d'apprentissage associé pour établir les formes de rétroactions.

1.2. La dimension perceptivo-gestuelle chez le sujet épistémique

Les connaissances sensori-motrices sont présentés par Weill-Barais (1994, p. 383) comme des répertoires d'habilités (taper à la machine, faire de la bicyclette, ..) dont nous disposons en mémoire et qui sont des produits stabilisés de l'automatisation.

En ce qui concerne le processus de stabilisation des connaissances sensori-motrices, l'auteur indique qu'il s'effectue en plusieurs étapes : l'étape de la découverte des aspects pertinents d'une tâche (phase interprétative), ensuite la phase de compilation où les composants de l'habilité sont assemblés en blocs dans une procédure spécifique à la réalisation de l'habilité, enfin la phase d'automatisation et d'harmonisation.

Dans l'apprentissage de la chirurgie, les connaissances sensori-motrices sont souvent considérées et des processus d'apprentissage sont proposés comme celui présenté par Reznic et MacRae (2006, p. 2) et reproduit dans la figure suivante :

Table 1. The Fitts–Posner Three-Stage Theory of Motor Skill Acquisition.*

Stage	Goal	Activity	Performance
Cognition	Understand the task	Explanation, demonstration	Erratic, distinct steps
Integration	Comprehend and perform mechanics	Deliberate practice, feedback	More fluid, fewer interruptions
Automation	Perform the task with speed, efficiency, and precision	Automated performance requiring little cognitive input, focus on refining performance	Continuous, fluid, adaptive

* Adapted from Fitts and Posner.[11]

Figure 28, reproduction prise de Reznic et MacRae (2006, p. 2).

Les travaux récents autour de la théorie ACT (Anderson, Bothell, Byme, Douglass, Lebiere, & Y., 2004) prennent également en compte la dimension sensori-motrice :

"*Adaptive control of thought–rational has evolved into a theory that consists of multiple modules but also explains how these modules are integrated to produce coherent cognition. The perceptual-motor modules, the goal module, and the declarative memory module are presented as examples of specialized systems in ACT–R.* " (ibid. p 1036).

Dans ces travaux, les auteurs s'intéressent à l'interaction entre ces differents modules : "*The previous example discussed how the perceptual-motor, goal, declarative, and procedural modules interacted in the learning of a complex skill* " (ibid p. 1053).

En résultat, ils proposent que ces modules soient clairement séparés et qu'ils fonctionnent parallèlement. Grâce à l'identification de patrons, le système central de production coordonne l'action, restant ainsi, de notre point de vue, un système cognitif centré sur le traitement de l'information :

"As the emerging consensus in cognitive science, it begins with the observation that the mind consists of many independent modules doing their own things in parallel. However, some of these modules serve important place-keeping functions—the perceptual modules keep our place in the world, the goal module our place in a problem, and the declarative module our place in our own life history. Information about where we are in these various spaces is made available in the buffers of the modules. A central production system can detect patterns in these buffers and take coordinated action. The subsymbolic learning and performance mechanisms in ACT–R work to make these actions appropriate. In particular, the subsymbolic declarative mechanisms work to bring the right memories to mind, and the subsymbolic procedural mechanisms work to bring the right rules to bear."(ibid p. 1057).

Ces travaux, récents, n'ont pas débouché sur des systèmes informatiques d'apprentissage où le modèle d'apprenant prenne en compte la dimension sensori-motrice.

1.2.1. L'énaction ou la connaissance incarnée chez le sujet

Dans le domaine de la réalité virtuelle, la notion d'énaction émerge comme un courant des sciences cognitives inspiré des travaux de Varela, Thomson et Rosch (1993); L'énaction propose la conception des modèles et environnements informatiques centrés sur le couplage action/perception entre utilisateur et système. Une des métaphores utilisées est celle de la cellule vivante qui perçoit son environnement, le structure, décide et agit en restant dans une position de perception active (Thouvenin, 2009, p. 27) : *William H. Warren décrit la « connaissance enactive » [Warren, 2006] comme une forme non symbolique et intuitive de connaissance ancrée dans l'acte de faire. D'après lui, pour concevoir cette notion de connaissance enactive, on doit répondre à deux exigences : premièrement, permettre des interactions avec un monde virtuel ou un espace de contrôle qui soient parallèles à celles de la perception-action naturelle. Deuxièmement il faut permettre l'expérience d'une présence perceptible, capturant l'intentionnalité de la perception -action naturelles. Selon lui la connaissance enactive est constituée par des associations liées à la perception-action, et que celles-ci ne peuvent être comprises que dans le contexte de la dynamique de comportement d'une activité du sujet*.

Ce domaine émergent, qu'un réseau d'excellence européen a accompagné (http://www.enactivenetwork.org/) propose de s'intéresser aux connaissances moins classiques, associées à leur utilisation active multi sensorielle. Ce type d'étude n'a pas fait émerger de modèle d'utilisateurs, en particulier d'apprenant. De notre point de vue cela est dû à la position épistémique de l'énaction, en effet selon l'énaction la connaissance est incarnée.

1.2.2. Des connaissances sensori-motrices aux connaissances perceptivo gestuelles chez le sujet

Vergnaud (2002) propose l'expression «activité perceptivo-gestuelle», à la place de l'expression «activité sensori-motrice» de Piaget, « tant il est vrai qu'il s'agit de sensations et d'actes moteurs organisés en perceptions et en gestes », pas seulement de sensori-motricité élémentaire. Autrement dit, un traitement est un contrôle par la connaissance.

Cela conforte nos travaux en formation professionnelle. Ainsi, dans l'activité d'apprentissage en chirurgie orthopédique, ce ne sont pas, de notre point de vue, des activités purement sensori-motrices qui permettent de comprendre le geste mais leur relation avec les autres connaissances dans la résolution du problème. Ainsi, l'importance de la prise d'information visuelle, ou la prise d'information des sensations de dureté sont complètement liées au fait de la nécessité de décider l'endroit où la broche se trouve et de mettre ainsi en œuvre les connaissances décisionnelles qui permettront de valider sa trajectoire. Cette relation est fondamentale dans le processus de compréhension.

Nous parlerons donc, comme proposé par Vergnaud, de l'activité cognitive perceptivo-gestuelle du sujet engagé dans une activité qui implique le corps.

En conséquence pour nous, l'activité perceptive, comme forme de connaissance liée à la prise d'information, fait partie de l'activité opératoire (Vergnaud, 1991) et (Vergnaud, 2002). Il est donc important que le geste puisse être compris soit en tant qu'action soit en tant que prise d'information pour la prise de décisions. L'activité est ainsi décrite comme un ensemble de «gestes», en relation dialectique avec la pensée, via les schèmes. Le contrôle nécessaire à ce traitement n'a rien de naturel, il nécessite une attention en éveil et résulte d'apprentissages spécifiques.

1.3. La prise en compte de l'erreur

Dans la conception des systèmes informatique en général, un des objectifs de base est qu'ils soient construits de façon à éviter l'erreur. Du point de vue ergonomique dans ces systèmes, si une erreur est commise, c'est un symptôme d'un défaut du système. L'utilisateur doit être protégé de l'erreur par le système.

Les environnements pour l'apprentissage humain sont le seul domaine en informatique ou, au contraire, la possibilité de « faire une erreur » devient une caractéristique nécessaire du système. Il s'agit donc de différencier une erreur signifiante vis-à-vis de l'apprentissage d'une erreur relevant d'un problème d'utilisabilité du logiciel.

La rétroaction suite à une erreur est un des objectifs centraux (chapitre 2, §5) de notre projet de recherche. La signification de l'erreur, ou sa position épistémique, est déterminante pour le calcul de la rétroaction.

En effet, la conception et le calcul de la rétroaction ne seront pas les mêmes si l'intention est, par exemple, d'informer sur l'erreur, de corriger l'erreur ou de donner de moyens à l'apprenant pour redéfinir le domaine de validité d'une connaissance.

Notre problématique nous amène donc à nous interroger sur la façon dont on doit considérer l'erreur. Est-il est profitable de découvrir les mécanismes qui ont conduit les apprenants à telle ou telle erreur ? Faut-il ne considérer que le produit final qui est l'erreur ou aussi le processus qui y a mené ? Est-il nécessaire de catégoriser l'erreur pour déterminer sa nature et produire une rétroaction pertinente ?

1.3.1. L'erreur comme une manque de connaissances

Des modélisations telles que le recouvrement (overlay), par leur représentation et traitement, font l'hypothèse que l'erreur est due à l'incomplétude : les connaissances de l'apprenant sont incomplètes puisque le principe est que la connaissance de l'apprenant est un sous-ensemble de la connaissance experte.

L'évolution de ce modèle vers le modèle de l'apprenant perturbé est un effort pour prendre en compte les erreurs. Cette prise en compte est assurée par différentes méthodes, telles que l'énumérative (le résultat est une libraire d'erreurs), la générative, proposant des techniques pour générer des erreurs (afin de simuler l'apprenant), ou la reconstructive proposant des techniques pour expliquer l'erreur.

Mais, même si du point de vue du diagnostic la plupart des systèmes utilisent des techniques qui ne sont pas trop différentes (comparaison du modèle de l'apprenant avec le modèle de la machine, ce dernier modèle contenant des erreurs) la signification donnée à l'erreur n'est pas la même.

1.3.2. L'erreur comme une lacune dans la mémoire

Dans le cas des théories cognitives de type traitement de l'information, centré sur la mémoire, l'erreur sera vue comme une « lacune dans la mémoire ». La rétroaction doit alors exercer une fonction de rappel ou d'entraînement pour combler ce manque. Ceci explique la rétroaction immédiate (Hint), souvent sous forme d'aide donnant l'action correcte, mise en place par le traçage des modèles issu de la théorie ACT. Nous étudierons cela plus en détail ultérieurement (§2.1).

1.3.3. L'erreur, une misconception

La proposition de misconception est différente (Confrey, 1986). Par misconception on désigne les connaissances que pourraient avoir des personnes faisant des erreurs récurrentes dans certaines situations. Ce sont, comme l'explique Balacheff (2001) des connaissances fausses mais ayant, cependant, un domaine de validité pratique. La différence avec ce qui est présenté précédemment est relative à l'explication de l'erreur. En effet, ces connaissances, même si elles sont fausses, existent parce qu'il y a un domaine où ces connaissances sont valides. L'erreur n'est pas un oubli ou un manque dans la mémoire mais une connaissance à porté limitée et donc utilisée à mauvais escient. Ici du point de vue de la rétroaction, le principe pourrait être de montrer que le domaine de validité est restreint et de présenter au sujet les conceptions vraies dans cette situation.

Vahn Lehn (1990) explique les erreurs d'une façon proche de la précédente : "*This theory's typical explanation for a bug differs significantly from the typical explanation used in the memorize-compile model. In this theory the prototypical "bug story" has the acquisition function generating a procedure that either lacks productions or has overlay specific production*s. *For instance, the procedure may have no code for borrowing [...]. This imperfection causes an impasse. A variety of bugs may be generated, differing only in how the impasse was repaired* " (p. 9). La théorie cognitive sous-jacente est donc que l'apprenant dispose d'une procédure-clé, variante altérée de la procédure correcte. Lorsque cette procédure-clé conduit à une impasse, l'apprenant procède à un bricolage qui lui permet de poursuivre le calcul. L'erreur peut témoigner du bricolage. Pour l'auteur il faut différencier les erreurs basées sur des connaissances imparfaites (misconception) des erreurs aléatoires (glissement ou slip en anglais). Ainsi du point de vue de la rétroaction des systèmes tel qu'Andes (VanLehn, et al., 2005), que nous étudierons dans le point suivante (§2), auront plusieurs stratégies de rétroaction selon l'explication donnée à l'erreur.

1.3.4. L'erreur, problème d'intégration de la connaissance déclarative dans la connaissance procédurale

Pour Ohlsson (1996) la prise en compte de l'erreur est fondamentale dans le processus d'apprentissage. Pour lui, souvent le sujet fait des erreurs lors de la réalisation d'une tâche, même s'il a appris la façon correcte de la faire. Selon sa théorie, les erreurs sont commises parce que la connaissance déclarative apprise n'a pas été intégrée dans la connaissance procédurale ; les décisions devant être prises lors de la réalisation de la procédure sont tellement nombreuses que cela laisse la place à l'erreur. Ainsi la prise en compte de cette erreur, par le sujet ou son enseignant, pendant la pratique de la procédure permet d'intégrer la règle appropriée qui a été violée et de spécialiser la règle procédurale qui était trop générale. La spécialisation choisie par le sujet est fonction de sa perception de ce qui rendait l'action inappropriée ou incorrecte (Ohlsson S. , 1995, p. 44).

Le rôle de la rétroaction ici est d'informer sur l'erreur et de la dépasser en faisant le lien entre la procédure et la connaissance déclarative et en essayant de donner des règles spécialisées vis-à-vis de la tâche identifiée. "*A carefully designed sequence of feedback messages that reflects the action of a human teacher helps the student to overcome problems in his/her knowledge*" (Mitrovic, Koedinger, & Martin, 2003, p. 315). Cette position théorique à donné naissance au modèle de l'apprenant appelé modèle à partir de contraintes dont nous étudierons l'application dans le point suivant (§2).

1.3.5. L'erreur, symptôme d'une connaissance

En France, et du point de vue de la didactique, le paradigme d'erreur a été développé en partant du postulat que l'erreur est un symptôme des connaissances. L'article de Balacheff (2001), résume ce positionnement épistémologique : ce qui sépare le paradigme des misconceptions du paradigme de l'erreur en didactique est le statut de la connaissance : " *Les misconceptions sous-entendent l'existence d'une connaissance de référence globale et juste. Le paradigme de l'erreur, en particulier dans la problématique des obstacles épistémologiques, ne requiert que la mise en relation explicite de deux connaissances dans une perspective de développement."* (ibid. p 4). L'auteur propose de considérer les connaissances comme un état d'équilibre entre le système sujet et le milieu d'interaction. Toute connaissance est donc relative, il n'y a pas de connaissance intrinsèquement correctes.

Dans ce cadre, la rétroaction est donc en rapport à cet état d'équilibre, la rétroaction peut chercher à le conforter ou à le déstabiliser pour produire un nouvel état d'équilibre. La production d'un contre-exemple, ou d'une situation ou l'action n'est plus valide, vis-à-vis des connaissances identifiées chez le sujet, seront des formes des rétroactions possibles. Les informations nécessaires pour faire le calcul de la rétroaction seront donc de nature différente.

Il ne s'agit pas de maintenir le sujet au plus prés du comportement expert, mais de comprendre suffisamment ses conceptions en amont pour apporter une rétroaction qui en permette l'évolution ou, éventuellement, le renforcement.

Pour cela il faut que ces conceptions « s'expriment » et que la rétroaction, suscitée par le diagnostic de l'erreur, permette leur remaniement.

Un exemple, pour illustrer notre propos, dans le domaine de la chirurgie orthopédique, est celui du retour haptique. En effet, certains systèmes (Morris, Sewell, Barbagli, Salisbury, Blevins, & Girod, 2006), proposent des simulateurs qui ne vont pas permettre au sujet de s'éloigner d'une certaine forme de mouvement et de force considérés comme le geste expert. Cette position vis-à-vis de la gestion de la rétroaction et de l'interaction n'est finalement pas trop éloignée des systèmes tuteurs classiques ne laissant pas la place à l'erreur. Dans notre démarche, au contraire, il n'y aura pas de contraintes sur le mouvement (en dehors du modèle physique simulé qui est le corps humain), et l'objectif est de donner la rétroaction en fonction des éléments de décision qui ont conduit le sujet à faire ce geste. Ces éléments de décision seront diagnostiqués par le système informatique.

1.4. La structure de contrôle comme élément de validation de l'action du sujet

Selon Richard (1990, p. 285), le contrôle, mis en œuvre par le sujet, s'exercé aux différents niveaux de l'activité. Le premier niveau proposé est celui de la construction de la représentation de la situation. Ainsi l'auteur a distingué plusieurs processus de construction et le contrôle aura un effet sur la sélection du processus. Le deuxième niveau auquel le contrôle intervient concerne l'élaboration des décisions d'action. Enfin, le troisième niveau s'exerce dans l'appréciation de l'adéquation de l'action aux objectifs de la tâche, c'est donc l'évaluation des résultats de l'action.

En lien avec la question de la détermination de comment fait l'apprenant mais aussi le pourquoi, il a été souligné l'importance de la notion de validation lors de l'action comme un élément clé dans l'interaction pour l'apprentissage :

"*The concluding remark is that a critical survey of the problems of design of TEL environments invites to go beyond our usual focus on knowledge representation, and even beyond interaction, to reach the point where both converge to support and legitimate learning: control and validation. It may well be the case that the value of a learning environment rests in its capacity to support the learners' possibility to question the validity of their activity, and to support the system control of the learning process. In both cases the central issue is the issue of the feedback, which refer to a problem of validation. It is by this problem of validation that knowledge imposes itself as the premier character on the design scene."* (Balacheff, 2004, p. 10).

Ici, la question du contrôle des perceptions, des informations et de l'action est essentielle. La prise d'information et le contrôle sont des conditions essentielles d'efficacité de l'action (Vergnaud, 2002).

Cette nécessité de la mise en évidence des contrôles pour l'apprentissage est aussi soulignée par les systèmes autour d'ACT-R et la méthode de traçage de modèle. Ces systèmes font l'hypothèse que la rétroaction que permet la mise en évidence d'une erreur permettra à l'apprenant le contrôle de son action (Corbett & Anderson, 2001). Par contre le modèle ne représente pas explicitement ces éléments de contrôle, i.e. le système fixe l'erreur, la souligne et c'est ensuite à la charge de l'utilisateur de déterminer le domaine de validité de son action et donc de retrouver la structure de contrôle qui permet de valider ou invalider son action.

Les dimensions contrôle et validation sont de notre point de vue au cœur du modèle de l'apprenant proposé par Ohlsson (1992). En effet, l'auteur propose, dans le cas des connaissances procédurales et de la résolution de problèmes, de considérer chez un apprenant les connaissances, sous forme de contraintes, qui lui permettent d'évaluer si sa solution est correcte.

1.5. Conceptions, la prise en compte explicite des contrôles

Pour Brousseau (1998) les conceptions sont l'ensemble des connaissances fréquemment sollicitées pour résoudre des situations. Il souligne également que les connaissances ne peuvent pas être traitées de façon isolée, mais sous forme d'agrégat : "les connaissances fonctionnent par agrégats que nous appelons conceptions et de même les situations se regroupent en « milieux ».

Balacheff (2001) aborde la notion de conception de façon à "*résoudre le problème de modélisation posé par la coexistence chez un sujet de structures mentales contradictoires, du point de vue d'un observateur, et cependant cohérentes lorsqu'elles sont replacées dans le contexte d'une mise en œuvre particulière dans le référentiel du sujet (en général une classe de situations ou de tâches) "* (Balacheff, 2001).

Ainsi, l'auteur appelle conception C, un quadruplet (P, R, L, ∑) dans lequel :

- P est un ensemble de problèmes sur lequel C est opératoire ;
- R est un ensemble d'opérateurs ;
- L est un système de représentation, il permet d'exprimer les éléments de P et de R ;
- ∑ est une structure de contrôle, elle assure la non contradiction de C. En particulier, un problème p de P est résolu s'il existe r de R et s de ∑ tel que s(r(l(p)))=vrai.

Cette formalisation, qui est une suite des travaux de Vergnaud (1991) sur les champs conceptuels, a l'avantage de spécifier la notion de contrôle, nécessaire pour la compréhension de la signification de l'action. Elle est dans notre cas une information d'entrée pour la conception et calcul de la rétroaction. Ainsi, la structure de contrôle assure la non contradiction d'une conception au sein d'une famille de problèmes. Dans ce modèle, nous accédons au « comment fait l'apprenant », grâce aux opérateurs, mais aussi au « pourquoi » grâce à la structure de contrôle.

1.6. Nos modèles du sujet épistémique

Nous nous attachons dans nos analyses (Vadcard & Luengo, 2005) ou (Vadcard & Luengo, 2005) à faire apparaître les contrôles sous-jacents aux actions et aux prises de décisions car c'est à ce niveau que se joue la conceptualisation de l'action. Dans le cas de la formation professionnelle, nous nous intéressons en particulier, à identifier des contrôles de l'action en situation qui n'apparaissent pas dans la situation prescrite. Ce sont des connaissances forgées par l'expert au cours de sa confrontation à la diversité des possibles de la situation. Elles permettent à l'expert de faire face à la diversité des situations tout en conservant l'invariance globale de la réalisation de l'activité ou de la résolution du problème (Vergnaud, 1996).

Notre objectif, du point de vue des rétroactions, est de donner à l'apprenant les moyens pour qu'il soit capable de questionner ses connaissances en s'appuyant sur les contrôles identifiés.

En ce qui concerne le modèle du sujet en électricité, la thèse qui est en cours de Sandra Michelet propose de considérer les conceptions comme un ensemble de connaissances, compétences et erreurs. Ces conceptions seront dépendantes des situations proposées (des problèmes). Dans ce cas, les contrôles seront décrits dans les règles associées aux erreurs. En effet pour elle, une erreur est formulée comme un contrôle utilisé hors domaine de validité.

Lors de nos analyses dans le domaine de la formation professionnelle (orthopédie, laparoscopie et pilote de ligne), nous avons choisi d'utiliser le modèle ck¢ pour nos formalisations.

Ainsi, dans le cas du vissage sacro-iliaque du projet TELEOS, les éléments de connaissance identifiés lors de la phase d'analyse ont été ensuite organisés de manière formelle afin de permettre un traitement ultérieur par le système informatique. Nous avons produit (Luengo V. , Vadcard, Dubois, & Mufti-Alchawafa, 2006)) dans cette étape de formalisation des données telles que celles présentés dans le tableau suivant:

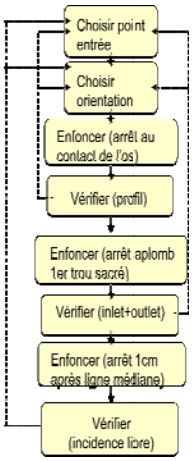
Un ensemble de problèmes

Ils sont définis en fonction de leurs variables didactiques

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	VD	type de fracture		qualité os			repères cutanés		
2		fracture sacrum	disjonction pure	dense	normal	peu dense	projection sacrum	aile iliacue/fémur	zones critiques
3	PA		X		X		X		
4	PB	X			X		X		
5	PC	X			X		X		
6	PD		X		X		X		
7	PE	X				X	X		
8	PF		X			X	X		
9									
10									

Un ensemble d'opérateurs

Dans le cas de TELEOS, et de tous nos modèles de formation professionnelle, les opérateurs sont les actions que l'utilisateur a la possibilité d'entreprendre au cours de la résolution du problème.



Un ensemble de contrôles

Ils sont décrits sous forme de règles (si...alors) ou de prédicats (assertions). Ces contrôles sont des éléments de connaissance, et peuvent être de nature déclarative, procédurale ou perceptivo-gestuelle.

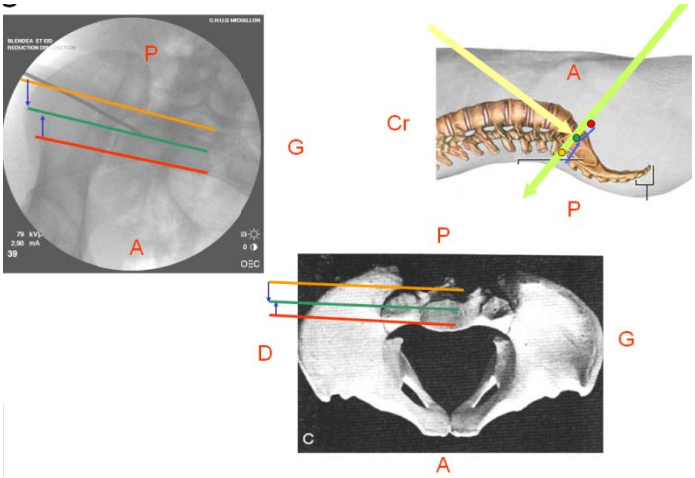
Contrôle relatif à la position du point d'entrée :
- Le point d'entrée est situé dans le quadrant dorso-caudal déterminé par les projections latérale et longitudinale du sacrum

Contrôles relatifs à la correspondance radio/corps :
- Si la broche est trop basse sur la radio inlet, alors elle es trop antérieure (ventrale) sur le patient couché
- Le décalage entre deux points d'entrée cutanés est plus petit que le décalage correspondant au niveau des points d'entrée osseux (épaisseur des tissus mous)

Contrôles relatifs à la progression de la broche :
- Un mouvement spontané du pied lors de la progression de la broche témoigne d'une irritation neurologique
- Le passage d'une corticale entraîne une progression plus difficile de la broche

Les registres de représentation

Dans le cas de la première version du projet TELEOS, les registres sont les radios (2D) et le corps (3D) plus la sémiotique du langage naturel et technique



Nous pouvons voir que la dimension perceptivo-gestuelle se trouve tant dans les opérateurs que dans les contrôles. En effet, comme nous l'avons souligné plus haut, nous prenons en compte l'activité sensori-motrice en tant qu'action, mais aussi en tant qu'élément de contrôle de l'activité.

Enfin, nous avons établi une mise en correspondance des ensembles P des problèmes, R des opérateurs et Σ des contrôles : pour chaque problème (P), nous décrivons l'ensemble des contrôles (Σ) pouvant intervenir dans sa résolution, en fonction des actions effectuées (R). Dans la première version du projet, les registres de représentation étaient implicites dans la représentation informatique, car l'étude était uniquement faite sur les radiographies.

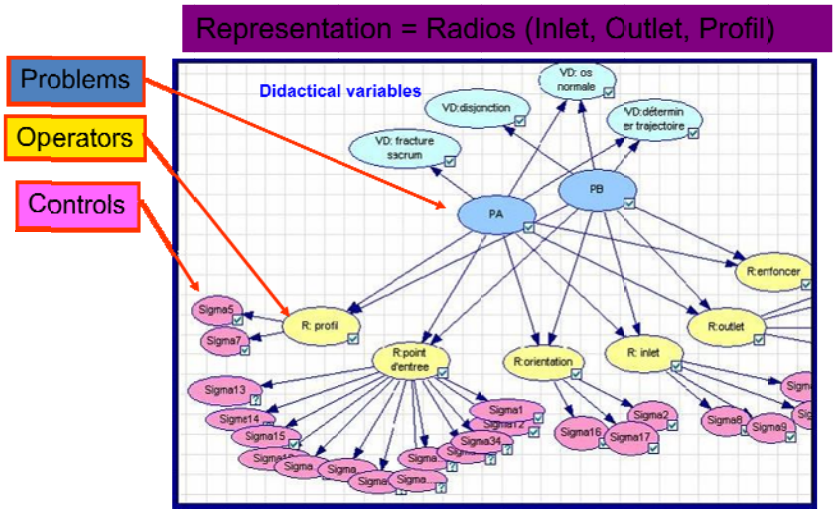


Figure 29. Premier modèle construit dans le projet TELEOS à partir de ck¢

Les autres modèles du sujet épistémique que nous avons conçu en formation professionnelle sont organisés de la même façon que celui que nous venons de présenter.

2. Diagnostics et rétroaction épistémiques

Les travaux centrés sur le diagnostic des apprenants ont l'objectif de calculer, à partir des éléments de la trace de l'activité du sujet et d'un modèle de l'apprenant, les valeurs des variables considérées dans le modèle de l'apprenant. Ces éléments sont de différente nature, comme le résume Woolf (2009, p. 56) en proposant une classification des connaissances sur l'apprenant contenues dans les tuteurs intelligents : "*Topics, Misconceptions and bugs,Student affect,Student experience, Stereotypes*".

Les diagnostics seront étudiés dans ce chapitre comme des entrées (input) pour la conception ou le calcul des rétroactions. Autrement dit, nous nous intéresserons principalement aux résultats des calculs faits sur ces modèles de connaissance.

Pour nous, le diagnostic n'est qu'un support parmi d'autres (la connaissance en jeu, la situation d'apprentissage) pour la conception et le calcul de la rétroaction épistémique.

Malgré cette affirmation, nous montrerons nos réalisations dans le domaine du diagnostic car nous sommes obligée de nous intéresser au développement des systèmes de diagnostic pour deux raisons. La première raison est pragmatique : pour tester des rétroactions basées sur des modèles du sujet épistémique, et étant donné que nous ne pouvons pas réutiliser des systèmes existants, nous devons développer les nôtres. La deuxième raison est que nous posons des hypothèses sur les informations concernant l'apprenant nécessaires en entrée pour la rétroaction, nous devons donc valider que ces informations sont possibles à obtenir à partir d'un système de diagnostic.

Deux grandes approches de diagnostics sont récurrentes dans les tuteurs intelligents (Goguadze & Melis, 2009). La première est l'approche générative qui est fortement représentée par la méthode de diagnostic dite par traçage de modèle (ou model tracing en anglais, (Corbett & Anderson, 1995)) et dont les applications les plus connues sont Geometry tutor, Lisp-Tutor, Algebra tutor et Andes. La deuxième est l'approche appelée évaluative, qui est représentée par la méthode dite orientée contraintes (ou en anglais Constraint-Based Modeling, (Ohlsson S. , 1992)) et dont les applications les plus connues sont SQL-Tutor, CAPIT et KERMIT.

Dans l'approche générative, le système de diagnostic est capable de résoudre le problème. Il génère donc toutes les étapes nécessaires à la résolution, alors que dans l'approche évaluative, ne sont représentées (sous forme de contraintes) que les étapes nécessaires et suffisantes vis-à-vis des concepts du domaine à enseigner. Dans le premier cas, le diagnostic résulte de la comparaison de la solution générée vis-à-vis de celle produite par l'apprenant alors que dans le deuxième cas, il correspond à la vérification du respect des contraintes par la production de l'élève. Dans les deux cas, la notion d'erreur peut exister. Pour la méthode par traçage de modèle, une erreur peut aussi être générée automatiquement grâce à des règles erronées (malrules) alors que dans le cas du modèle orienté contrainte, l'erreur sera le non respect d'une ou plusieurs contraintes.

2.1. Modèles génératifs

Dans les systèmes génératifs le système est capable de produire des rétroactions autour de solutions (comparer, proposer une autre solution, aider dans un pas de solution,…) puisqu'il sait les construire.

2.1.1. Système de diagnostic

Le diagnostic par traçage des modèles produit et utilise un modèle générique de l'apprenant alors que le diagnostic par traçage des connaissances utilise un modèle spécifique à l'apprenant (Mitrovic, Koedinger, & Martin, 2003, p. 314). Le tuteur est construit sur un modèle cognitif du domaine représenté par des règles de production qui décrivent les connaissances nécessaires à l'apprenant pour résoudre la tâche.

Les systèmes fondés sur le traçage des modèles construisent, en parallèle à l'action de l'apprenant, une simulation dynamique de la résolution de l'apprenant qui leur permet d'interagir avec lui à chaque pas de résolution. En d'autres mots, grâce à des règles de production le système reconstruit la solution de l'apprenant et l'utilise pour simuler et interpréter son comportement.

Les erreurs sont diagnostiquées quand une étape proposée par l'apprenant ne correspond à aucune règle ou bien qu'elle correspond à des règles erronées représentant les erreurs typiques.

En résumé, le traçage des modèles vérifie si l'apprenant réalise la tâche correctement en comparant chaque étape de l'apprenant avec une ou plusieurs des étapes correctes ou incorrectes générées dynamiquement par le système de production (système génératif). L'article (Mitrovic, Koedinger, & Martin, 2003, p. 314)) propose l'exemple donné en Figure 30:

"*To illustrate, consider a set of production rules for finding the angles in geometry problems like the one shown at the top of (Figure 3). The first two production rules can be used in sequence to first find angle B (because angles opposite equal sides are equal) and then to find angle C (because the sum of the angles in a triangle is 180). Once the first rule fires and finds the value for angle B, it is possible for the next rule to fire and find angle C (note that the angle label names are arbitrary: these rules apply to a triangle with any point labels.) The last rule in Figure 1 is an example of a buggy rule used to detect particular common mistakes. In geometry, students often over-generalize from common orientations of figures. This buggy production represents the shallow inference that the angles at the bottom of an isosceles triangle are always equal.*"

Angle A is 65.
What is angle C?

Two correct production rules:

IF goal is to find an angle in an isosceles triangle ABC and AC = AB
and angle A is known
THEN set the value of angle B to A.

IF goal is to find an angle in a triangle ABC and angles A and B are known
THEN set the value of C to 180-A-B

Buggy production rule:

IF goal is to find an angle in an isosceles triangle ABC
and angle A and C are at the bottom of the triangle and angle A is known
THEN set the value of angle C to A.

Figure 30, exemple pris de (Mitrovic, Koedinger, & Martin, 2003, p. 314), illustrant des règles dans un système basé sur le traçage des modèles

Le traçage de modèles est donc génératif car les solutions sont produites de façon automatique ; dans certains systèmes les erreurs le sont également. Le diagnostic ensuite se fait par une méthode d'appariement entre le modèle généré et la trace du sujet.

2.1.2. Production des rétroactions

Comme nous l'avons vu, le diagnostic est réalisé étape par étape ; de même, le système réagit à chaque étape faite par l'étudiant. En effet, la méthode de traçage des modèles prône en particulier la rétroaction immédiate (Corbett & Anderson, 1995), qui sera centrée sur chaque action de l'utilisateur ainsi que sur chaque étape du problème que l'utilisateur est en train de résoudre. Ces rétroactions immédiates consistent soit à souligner l'erreur (error flag), soit à donner le prochain pas à suivre ou encore la solution correcte si le système n'arrive à identifier le pas ou la solution proposée. Nous pouvons trouver des exemples de ces modes de rétroactions dans Lisp-tutor (Corbett & Anderson, 1995), Geometry-Tutor (Anderson J & Corbett, 1985) et Practical Algebra Tutor (Koedinger, Anderson, Hadley, & Mark, 1997).

"*Practical Algebra Tutor (PAT) contains an expert system capable of solving the problems that are posed to students. As students take steps to complete the problem (for example, by filling in cells in the spreadsheet), the tutor considers whether or not those steps are consistent with a solution that it would follow. If not, the tutor checks to see if the step is consistent with a common error (or "bug"). In such cases, the tutor is able to provide instruction tailored to that bug. Since the tutor is tracking the student's solution at each step, the tutor is able to give help associated with the student's solution path at any time.* " (Ritter, Brusilovsky, & Medvedeva, 1998, p. 555)

Tel que présenté dans Woolf (2009, p. 113), en ce qui concerne le modèle de traçage et la retroaction vis-à-vis de l'erreur, il n'est pas possible d'apprendre à partir des erreurs : « *Students do learn from errors ; however, cognitive tutors do not allow students to make errors. As soon as student makes and encoded mistake, the tutor intervenes, preventing the student from taking further actions until the step is corrected. Students cannot travel down incorrect paths and see the consequences of their mistakes*".

Ici la question posée porte sur la contrainte liée au degré d'interaction, tel que nous l'avons présenté dans le chapitre 2 de ce manuscrit. Koedinger et Aleven (2007) parlent de dilemme d'assistance, la question étant liée à la façon dont les systèmes tuteurs doivent ou non donner de l'information (par exemple donner la solution ou la prochaine étape à réaliser). En effet, un degré de contrainte d'interaction très forte, tel que les interactions dans les tuteurs présentés préalablement, sont plus efficaces relativement au temps passé et au nombre d'erreurs commises. En revanche, cela peut, tel qu'évoqué par les auteurs, désengager l'étudiant dans son activité de recherche de solutions, puisqu'elles sont données par le système. Au contraire, ne pas produire des rétroactions trop informatives et laisser un degré d'interaction plus faible permet un engagement plus grand mais cela

est moins efficace du point de vue du temps que l'apprenant passe sur un problème et du nombre d'erreurs commis par l'élève.

Les travaux autour du system ASSISTment (Razzaq & Heffernan, 2009), qui ne contraint pas l'interaction dans une démarche étape par étape, proposent de prendre en compte le niveau de la connaissance et la difficulté de la tâche pour décider du degré de contrainte (ou d'aide guidée) dans l'interaction : "*We found that a student's math proficiency determined whether we should withhold information by presenting TPS or give information by presenting a solution to the problem. This was true when we controlled for time or for the number of problems. Students with high proficiency benefited from getting more information and students with low proficiency benefited more from getting information only on the step they were working on. We also found that students differed in how much time they spent reading Solutions. More-proficient students spent more than twice the amount of time reading Solutions as less-proficient students did. We do not know if this is due to a difference in focus, motivation or reading ability, but we believe that this difference may explain why less-proficient students did not learn as much from reading the Solutions*." (Razzaq & Heffernan, 2009, p. 463).

2.1.3. L'exemple d'Andes

Le logiciel Andes (VanLehn, et al., 2005), fondé sur un modèle génératif, nous permet d'illustrer différents types de rétroactions produits à partir des solutions générées par le système. Ici, ces différents types proposés tiennent compte du type d'erreur.

Ainsi, dans l'exemple présenté dans la figure suivante on peut voir une étape du travail d'un élève sur un problème de physique dans deux registres, ou espaces de travail (partie gauche avec les problème et la construction des vecteurs et partie droite avec les formulations) :

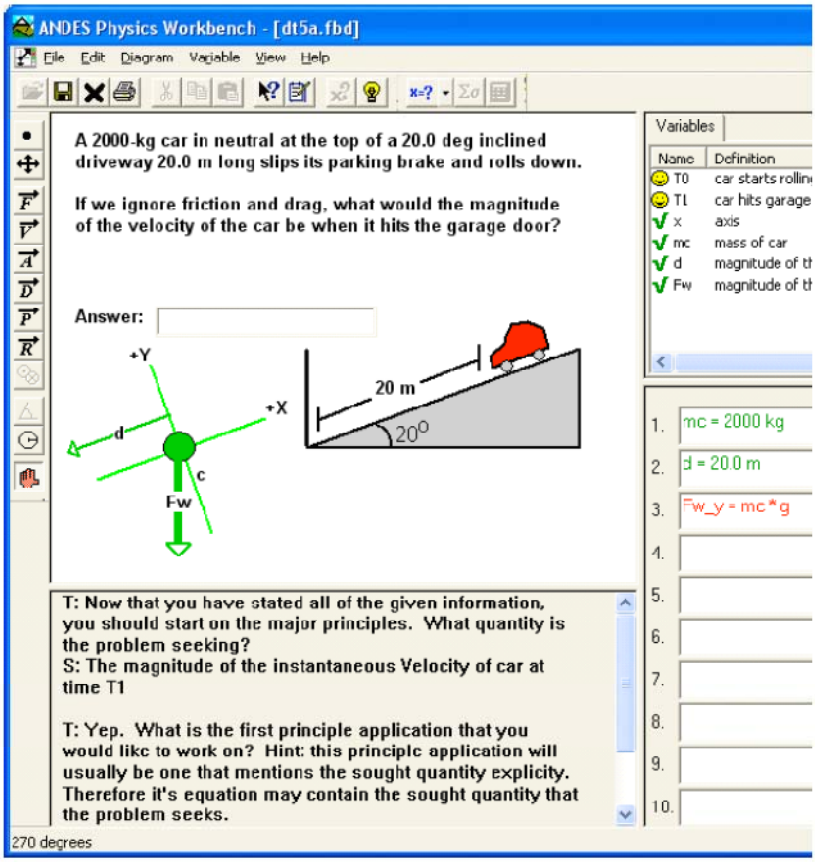


Figure 31, exemple de copie d'écran d'Andes, prise de Van Lehn et al. 05 (p. 154)

Van Lehn identifie trois types de rétroactions dans Andes (i.e. p. 173) :

Flag feedback : quand l'utilisateur rentre une étape du problème, le logiciel peut inférer une erreur d'inattention. Il produira une rétroaction pour montrer l'erreur et demander la

correction (par exemple dans une boîte de dialogue pour spécifier la valeur d'une variable si une case a été laissée vide). Sinon, la proposition faite par l'apprenant sera coloriée en vert si elle est correcte et en rouge si elle est incorrecte (droite de la figure). Pour décider cela, le système utilise d'abord des techniques de vérification syntaxique et ensuite si cette vérification est correcte, compare la proposition avec un graphe des solutions : " *In order to give immediate feedback, the solution graph file needs to contain the set of nonequation entries relevant to solving the problem and the solution point for the problem. In principle, this information could be provided by a human author instead of being generated by Andes*".

Des rétroactions que nous qualifions comme *des rétroactions d'explication* (What's Wrong Help). Ici, le système, s'il reconnait l'erreur, produit une rétroaction qui cherche à aider l'étudiant à identifier l'erreur commise. Le système cherche à identifier l'erreur à partir des techniques de gestion des erreurs (error handlers) : « In order to implement What's Wrong Help, Andes needs only three sources of knowledge: the knowledge base of error handlers, one solution point per problem, and one set of defined quantities per problem. » Le résultat de cette recherche est l'erreur identifiée avec un niveau de priorité. Ensuite concernant la rétroaction elle-même, des messages d'explication génériques sont associés à ces erreurs, et ces messages seront instanciés par les variables du problème.

Des rétroactions que nous qualifierons *d'aide à la résolution* (appelées Next Step Help) qui sont à la demande de l'apprenant. Ici le système propose, s'il reconnaît la procédure de résolution, des rétroactions sous la forme d'informations ou d'indications sur les prochains pas à suivre. Ce type de rétroaction est généré automatiquement à partir de la reconnaissance de plans faite sur le graphe de solution associé au problème.

"*Thus, for errors that are likely to be careless mistakes, Andes gives unsolicited help, while for errors where some learning is possible, Andes gives help only when asked. This policy is intended to increase the chance that students will repair substantive errors without asking help*." (ibid. p 154).

Pour les deux derniers types des rétroactions, le système prévoit des séquences de messages associées à la première rétroaction qui détaillent de plus en plus la (ou les) solution(s) possible(s) (VanLehn, et al., 2005, p. 154) :

> Most hint sequences have three hints. As an illustration, suppose a student who is solving Figure 1 has asked for What's Wrong Help on the incorrect equation *Fw_x = -Fs*cos(20 deg)*. These are the three hints that Andes gives:
>
> - Check your trigonometry.
> - If you are trying to calculate the component of a vector along an axis, here is a general formula that will always work: Let θV be the angle as you move counterclockwise from the horizontal to the vector. Let θx be the rotation of the x-axis from the horizontal. (θV and θx appear in the Variables window.) Then: V_x = V*cos(θV-θx) and V_y = V*sin(θV-θx).
> - Replace cos(20 deg) with sin(20 deg).

Nous pouvons observer que les rétroactions, et les séquences associées, sont basées sur la résolution du problème. C'est-à-dire que pour produire ce type de rétroaction le système doit connaître la solution du problème de façon exhaustive avec toutes les étapes intermédiaires. Dans le cas d'Andes la solution est générée de façon automatique et une partie des erreurs l'est également. Ceci n'est pas le cas d'autres systèmes :

"*One could imagine a human author providing this information on a per-problem basis, thus avoiding the knowledge engineering task of implementing a physics problem solver. Most constraint-based tutoring systems pursue exactly this approach (Mitrovic, Koedinger, & Martin, 2003). They have human authors provide solutions to each problem, and they provide a problem-independent knowledge base of error recognizers*" (VanLehn, et al., 2005, p. 179).

2.2. Modèle orienté contraintes

En ce qui concerne la méthode orientée contraintes (Ohlsson S. , 1992), représentative de l'approche de type évaluation, le principe est que chaque unité de connaissance est représentée par des contraintes.

Chaque état du problème est une pair ordonné <Cr,Cs>, où Cr, conditions pertinentes, identifie la classe des états de problème pour lesquels la contrainte est pertinente, et Cs, contraintes de satisfaction, identifie la classe des états (appropriés) dans lesquels la contrainte est satisfaite : « the semantics of a constraint is: if the properties Cr hold, then the properties Cs have to hold also (or else something is wrong) ».

Voici des exemples des contraintes dans le domaine du Lisp et de l'algèbre :

If the code for a Lisp function has N left parentheses, there has to be N right parentheses as well (or else there is an error).
If (x+y)/d is given as the answer to x/d1 + y/d2, then it has to be the case that d=d1=d2 (or else there is an error).

Figure 32 Exemple de contraintes extraites de Mitrovic et al. (Mitrovic & Ohlsson, 1999, p. 239)

2.2.1. Le système de diagnostic : les contraintes violées

Le diagnostic dans ce type de système est fondé sur la vérification de contraintes. Ce qui est considéré c'est l'état du problème. Pour chaque état du problème, on vérifie que toutes les contraintes associées sont respectées par la proposition de l'apprenant. Ainsi si une contrainte de type Cs n'est pas respectée, c'est un indice d'une erreur.

Dans l'article qui compare ce modèle avec celui du traçage des modèles (Mitrovic, Koedinger, & Martin, 2003, p. 316) et pour l'exemple décrit en Figure 30, les auteurs proposent les contraintes associées que nous avons reproduites dans la (Figure 33).

C_{r1}: A base angle of an isosceles triangle is known (θ_1),
And the student has calculated the size of the other base angle θ_2
C_{s1}: The size of θ_2 is θ_1

C_{r2}: A base angle of an isosceles triangle is known (θ_1),
And the student has calculated that the size of another angle θ_2 that equals θ_1,
C_{s2}: θ_2 is a base angle

C_{r3}: Two angles of a triangle are known (θ_1 and θ_2),
And the student has calculated the size of the third angle θ_3
C_{s3}: The size of θ_3 is $(180-\theta_1-\theta_2)$

Figure 33 Exemple des contraintes sur un problème en géométrie, extrait de (Mitrovic, Koedinger, & Martin, 2003, p. 316)

"The first two constraints jointly define that (only) the two base angles in an isosceles triangle have the same size. The third constraint is equivalent to the second rule in Figure 1(Figure 12 n.a). Constraint 2 catches the same error as the buggy rule from Figure 1(Figure 12 n.a). First, all relevance patterns are matched against the problem state. Then, the satisfaction components of constraints that matched the problem state in the first step (i.e., the relevant constraints) are tested. If a satisfaction pattern matches the state, the constraint is satisfied. Otherwise, it is violated. The short-term student model consists of all violated constraints. " (ibid. p 316).

L'avantage de ce diagnostic est qu'il n'est donc pas nécessaire de connaître les solutions d'un problème. C'est d'ailleurs un des arguments avancés par les auteurs en cherchant à trouver une solution vis-à-vis du problème d'efficacité dans la construction du modèle de l'apprenant et de son diagnostic.

2.2.2. Production des rétroactions

Dans le système SQL-tutor (Mitrovic & Ohlsson, 1999) pour l'apprentissage du langage SQL, qui est basé sur cette approche, nous pouvons voir l'exemple (Figure 34) où les auteurs montrent la rétroaction proposée par le système de gestion de base de données et la proposée par le système SQL-Tutor, cette rétroaction prends en compte des aspects syntaxiques et sémantiques de la solution de l'apprenant : "*The messages provided by SQL-Tutor take both syntactic and semantic aspects of the student's solution into account. For example, the first message is derived from the observation that the student specified two tables in the FROM clause, even though only one of them (MOVIE) is needed. This kind of feedback is crucial for effective learning in this domain*." (p. 242)

Example: For each director, list the director's number and the total number of awards won by comedies he or she directed if that number is greater than 1.

Correct solution:

```
SELECT DIRECTOR,SUM(AAWON)
FROM MOVIE
WHERE TYPE='comedy'
GROUP BY DIRECTOR
HAVING SUM(AAWON)>1
```

Student's solution:

```
SELECT DIRECTOR,SUM(AAWON)
FROM DIRECTOR JOIN MOVIE
ON DIRECTOR=DIRECTOR.NUMBER
WHERE TYPE='comedy'
```

INGRES: E_USOB63 line 1, The columns in the SELECT clause must be contained in the GROUP BY clause.

SQL-Tutor:

- You do not need all the tables you specified in FROM!
- You need to specify the GROUP BY clause! The problem requires summary information.
- Specify the HAVING clause as well! Not all groups produced by the GROUP BY clause are relevant in this problem.
- If there are aggregate functions in the SELECT clause, and the GROUP BY clause is empty, then SELECT must consists of aggregate functions only.

Figure 1. A student error, RDBMS feedback and potential feedback from SQL-Tutor

Figure 34 Exemple des rétroactions dans le domaine des bases de données. Extrait de (Mitrovic & Ohlsson, 1999, p. 242)

Selon les auteurs (ibid. p. 246), les rétroactions ne concernent pas chaque étape de la résolution mais elles sont plutôt centrées sur la solution proposée : "*Unlike ITSs that use the model tracing technique (Anderson et al., 1990), SQL-Tutor does not follow the student step by step and it does not give feedback after individual problem solving steps. Instead, SQL-Tutor postpones evaluation and feedback until the student submits his or her solution. This is appropriate in this domain, because the order of the steps taken while formulating an SQL query is not constitutive of a correct or successful query*."

Ainsi, dans le système SQL-tutor, les rétroactions sont construites à partir des contraintes non respectées dans la solution proposée. Comme plusieurs contraintes peuvent être violées dans une solution, SQL-tutor consulte l'historique des contraintes violées et il choisi la contrainte la plus violée. Les types de rétroactions sont comparables avec celles proposées dans Andes, avec cinq niveaux de détail : « right/wrong, error flag, hint, partial solution and complete solution » (ibid. p. 248). Nous pouvons observer que même si le système ne suit pas les actions des apprenants étape par étape, une solution de référence est utilisée pour comprendre la réponse et pour générer les rétroactions.

Avec ce type de stratégie, et comme une solution peut s'obtenir par plusieurs voies, la rétroaction risque de faire référence à une solution trop éloignée de la stratégie de solution adoptée par l'apprenant (Woolf, 2009, p. 85).

Tableau 8 Comparaison entre traçage des modèles et modèle orienté contraintes, pris de (Mitrovic, Koedinger, & Martin, 2003, p. 319)

Property	Model Tracing	Constraint-Based Modeling
Knowledge representation	Production rules (procedural)	Constraints (declarative)
Cognitive fidelity	Tends to be higher	Tends to be lower
What is evaluated	Action	Problem state
Problem solving strategy	Implemented ones	Flexible to any strategy
Solutions	Tend to be computed, but can be stored	One correct solution stored, but can be computed
Feedback	Tends to be immediate, but can be delayed	Tends to be delayed, but can be immediate
Problem-solving hints	Yes	Only on missing elements, but not strategy
Problem solved	'Done' productions	No violated constraints
Diagnosis if no match	Solution is incorrect	Solution is correct
Bugs represented	Yes	No
Implementation effort	Tends to be harder, but can be made easier with loss of other advantages	Tends to be easier, but can be made harder to gain other advantages

Les rétroactions dans ces deux types de systèmes porteront sur l'ensemble d'actions et leur validité vis-à-vis des actions attendues, caractérisées par les solutions et erreurs attendues.

Nous pouvons conclure que, même si le modèle de l'apprenant, la technique de diagnostic et la technique de la production de la rétroaction sont différentes entre le traçage des modèles et le modèle orienté contraintes (Tableau 8), dans les deux cas la rétroaction est construite vis-à-vis des solutions de référence ou solutions attendues.

Ainsi nous nous posons la question de savoir comment proposer d'autres modes de rétroaction à partir des modèles de connaissances du sujet épistémique qui interrogent les actions, les raisons de ces actions pour ce qu'elles sont et non relativement à une solution attendue.

Parmi ces modes possibles d'interventions nous nous intéressons à deux en particulier : le premier permet la mise en évidence des relations entre les manifestations des connaissances (déclaratives, empiriques, perceptivo-gestuelles) enjeu d'apprentissage et le second met en lumière les contrôles lors de l'action.

Notre position vis-à-vis du sujet et de ses connaissances est que l'erreur est un symptôme de connaissance.

2.3. Le diagnostic des conceptions

Dans ce cadre et tel que nous l'avons présenté plus haut le modèle des conceptions dans cK¢ présente l'erreur comme le symptôme d'une connaissance. L'objectif du diagnostic est donc d'identifier ces connaissances. Dans les systèmes implantés à partir de ce modèle il y a des systèmes qui cherchent à diagnostiquer les conceptions et les systèmes qui cherchent à diagnostiquer les contrôles, comme nous le verrons dans la suite.

Le modèle de diagnostic qui a été développé dans le cadre de la thèse de Karine Webber (2003) et implanté dans le cadre du projet Baghera qui a aussi donné naissance au projet européen BAP (Soury_Lavergne, 2003), propose une plateforme multi-agent pour l'apprentissage en géométrie. Le modèle de diagnostic (Webber K. , 2004) permet l'attribution à l'apprenant d'un ensemble de « conceptions », à partir de l'observation de son activité sur l'interface d'un logiciel de preuve en géométrie. Le diagnostic se base sur la combinaison de plusieurs approches et principes, à savoir le diagnostic émergent, les agents, la théorie du vote et la formation de coalition (Webber K. , 2004, p. 715).

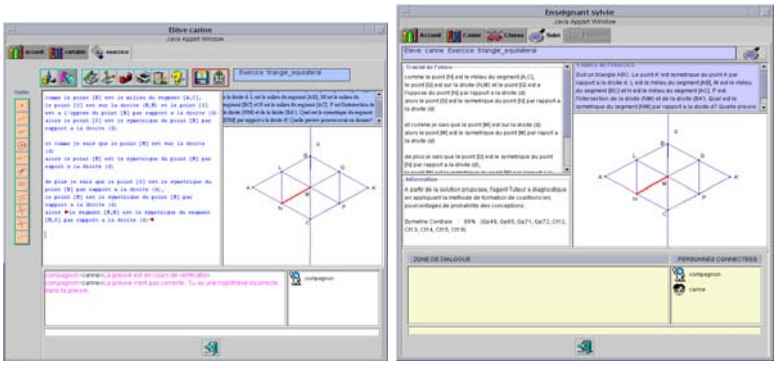


Figure 35, Interface élève et interface enseignant dans la plateforme Baghera

En simplifiant, l'idée essentielle du diagnostic est ici celui du diagnostic émergent. C'est-à-dire qu'il n'y a pas la nécessité de connaître les solutions pour chaque problème de façon exhaustive pour pouvoir les comparer avec celles de l'apprenant, comme dans le cas du traçage de modèles présenté précédemment, mais il émergera par l'identification de certaines conditions. Cette démarche est donc plus proche du modèle orienté contraintes, mais les techniques employées sont différentes.

En effet, dans ce modèle de diagnostic, les conceptions sont représentées par les agents au niveau macro, et tous les éléments du quadruplet ck¢ sont représentés par des agents au niveau micro. Ces derniers agents sont réactifs et observent les activités de l'élève. La Figure 36 illustre cette approche.

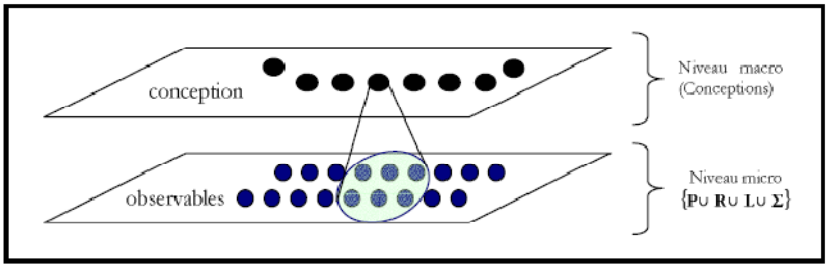


Figure 36. Illustration du diagnostic émergent des conceptions. Image reprise de (Webber K. , 2003, p. 79)

Enfin, l'approche de la théorie du vote et de la formation de coalition représente la tâche du diagnostic. Plus précisément, les agents au niveau macro représentent les candidats et les agents au niveau micro représentent les électeurs. En simplifiant encore, les agents de niveau micro observent les changements de l'environnement (la solution de l'élève pour un énoncé d'exercice), puis si un agent perçoit qu'il est reconnu pour ce changement, il se place dans l'espace de question et participe au vote. Chaque agent représentatif, du niveau micro, donne son avis sous forme d'un vecteur de vote pour tous les candidats. La dimension du vecteur est le nombre de candidats pour l'élection. Par exemple les valeurs suivantes [1, 0, 0, 1] d'un vecteur de vote d'un agent, indiquent qu'il y a quatre conceptions candidates pour le problème donné et que l'agent représentatif propose que les changements dans l'environnement sont les actions qui représentent soit la première conception, soit la quatrième ou soit les deux ensemble (les conceptions qui ont la valeur 1 dans le vecteur).

Après l'obtention des avis de chaque agent représentatif dans l'espace de questions, ces agents forment des coalitions. Les coalitions se forment à partir des différentes préférences des électeurs. L'approche par formation de coalition permet le regroupement des agents qui ont des choix (avis) similaires afin de prendre la décision du groupe qui représente le résultat du diagnostic.

Le résultat du diagnostic est l'ensemble des conceptions qui ont l'utilité la plus grande, c'est-à-dire celui qui a eu le plus de votes, parmi l'ensemble des conceptions identifiées.

Tableau 9 reproduit de (Webber K. , 2003, p. 120)

Coalition	Membres	Utilité	Vecteur	Conceptions
1	op87, op98, ct1, ct5, ct19, pr21	17	(0,1,0,0)	Symétrie Centrale
2	op91, op98, ct5, pr21	10	(0,0,1,0)	Parallélisme

Dans cet exemple nous pouvons voir que les agents de bas niveau op87 (opérateur), ct1 (contrôle), et ct19 ont voté pour l'agent de haut niveau (conception) « Symétrie centrale », l'agent ct91 a voté

pour l'agent Parallélisme, et les agents op98 t pr21 (problème) ont voté pour les deux conceptions. Une fois appliqué les algorithmes de vote et coalition la conception diagnostiquée est celle de la symétrie centrale.

2.3.1.1. Rétroaction à partir des conceptions

Les rétroactions construites à partir du diagnostic de l'apprenant n'ont pas été implantées dans le projet Baghera. Dans la plateforme nous pouvons identifier un agent informatique potentiellement capable de produire ce type de rétroaction, l'agent tuteur, mais aucun modèle informatique n'a été proposé pour la construction de la rétroaction :

"Cet agent implémente les tâches didactiques au regard de son élève et de la situation d'apprentissage. Ses possibilités, dans la maquette actuelle, son toutefois limitées et se borne à proposer à l'élève de nouveaux exercices, lui donner une évaluation de son travail et à gérer son cartable. Pour cela il s'appuie sur les services de l'agent médiateur." (Webber, Pesty, & Balacheff, 2003, p. 6)

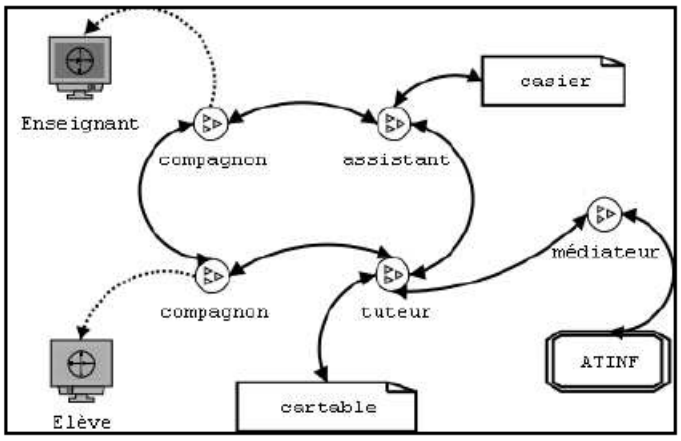


Figure 37 Architecture générale de Baghera pour deux utilisateurs connectés, pris de (Webber K. , 2003, p. 131)

Du point de vue des rétroactions un aspect potentiellement intéressant est d'utiliser la génération de la preuve automatique de l'atelier ATINF (qui est un atelier de preuves automatiques intégré dans la plateforme Baghera), non pour contraindre la construction de l'apprenant à ces solutions générées automatiquement comme dans les systèmes cités précédemment, mais comme élément d'information sur la cohérence et l'adaptation en soi (relatif à la conception) de la solution proposée dans la construction de la rétroaction et la gestion de l'interaction. Les solutions générées par ATINF pourraient ainsi permettre la proposition de preuves analogues ou de contre-exemples, qui sont des formes de rétroactions liées aux erreurs dans la preuve en géométrie tels que nous l'avions montré dans (Luengo V. , 1997).

Par contre, ici comme le produit du diagnostic sont des conceptions, le calcul de la rétroaction doit se calculer sur ces conceptions et non sur les contrôles tels que nous cherchons à le faire.

2.4. L'historique et le contexte épistémique dans les systèmes de diagnostic

Certains systèmes tiennent compte de l'histoire dans le calcul de la rétroaction. Dans le cas du modèle par contraintes, par exemple, la rétroaction du tuteur SQL tient compte de l'histoire car pour donner une rétroaction, il consulte la contrainte qui a été la plus violée (ou l'erreur le plus fréquente), et produit la rétroaction sur cette contrainte (erreur).

Dans les exemples étudiés précédemment, les modèles peuvent raisonner dans un contexte de monde statique, où les variables ont des valeurs fixes. L'exemple présenté par Russel et Norvig (2006, p. 602) illustre ce type de raisonnement : " *quand on répare une voiture, on suppose que ce qui est cassé demeure cassé durant le processus de diagnostic* ". Or dans le cas du diagnostic de l'apprenant, comme dans le cas de diagnostic de maladies d'un patient présenté dans le même ouvrage, les aspects dynamiques du problème sont essentiels : "Si l'on veut pouvoir évaluer l'état actuel à partir de

l'historique des observations et prédire les résultats du traitement, il faut modéliser ces changements" (ibid. p 602).

Des travaux autour du diagnostic dans les EIAH se sont intéressés à cette question, en particulier autour des réseaux bayésiens. Le travail de Reye (1998) a été précurseur dans le domaine. Une solution proposée pour modéliser les relations entre les nœuds de connaissance et les nœuds d'observation sont des modèles dynamiques où les variables peuvent changer au cours du temps.

"At each opportunity, the tutor might use a Bayesien procedure to update the probability that the student already knew a rule, given evidence from past responses (correct or incorrect) and combine this updated estimate with the probability that the student learned the rule at the current opportunity, if not already learned" (Corbett 2002).

Rappelons que Razzaq et Heferman (2009) proposent de prendre compte le niveau de connaissances et la difficulté de la tâche pour décider du degré d'assistance à proposer. Cela implique que le diagnostic doit prendre en compte le contexte, ici la difficulté de la tâche, dans lequel le sujet opère.

De la même façon, et tel que nous l'avons présenté plus haut, certains types d'activités sont associés à des types d'apprentissage, comme, par exemple, les tâches épistémiques associées à « l'apprentissage pour comprendre » ou « l'apprentissage pour faire » proposées par Ohlson (1995). Le diagnostic doit donc prendre compte ce contexte épistémique.

Nous considérerons donc le contexte sur lequel le sujet agit comme un facteur à prendre en compte lors du diagnostic et de la production des rétroactions. En effet, la valeur épistémique que nous pouvons attribuer à une activité du sujet n'est pas la même vis à vis d'une réponse à un QCM, d'une construction à travers un micromonde ou dans une formulation d'hypothèse.

2.5. Le modèle formel du diagnostic et le calcul de la rétroaction

Tel que montré dans le chapitre précédent, le système formel aura un rôle fondamental dans le calcul de la rétroaction. Une autre dimension également importante est la structure des résultats issus du système de diagnostic.

Comme l'expliquent Brusilovski et Millán (2009), la forme la plus simple des modèles de connaissance concernant l'utilisateur est la forme scalaire, qui estime le degré de connaissance d'un domaine par une valeur simple sur une certaine échelle quantitative (entre 0 et 10) ou qualitative (mauvais, moyen, bon,..). Souvent les modèles de stéréotypes des apprenants produisent ce type de résultat. Ce type de modèle permettra du point de vue de la rétroaction de produire des catégories de rétroactions, selon la classe (la valeur scalaire) dans laquelle se trouve le sujet. Dans ces cas, des systèmes à base des règles seront suffisants pour décider de la rétroaction.

L'autre type de modèle, le plus classique en EIAH, est le modèle structurel, qui fait l'hypothèse que le corps des connaissances du domaine peut être divisé en un certain nombre de fragments (ibid. p. 71). Le plus représentatif de ce type de modèle est celui d'ACT-R, où il est proposé de structurer les connaissances de façon indépendante avec une catégorisation qui tient compte des types de connaissance (déclaratif ou procédural) et des types de modèle d'utilisateur (modèle expert, modèle d'expertise partielle, bugs, etc..). Dans ce cas les rétroactions proposées sont calculés à partir de la reconnaissance des plans en allant l'objectif de garder l'apprenant dans la structure identifié.

Par ailleurs, de plus en plus de travaux sur les modèles d'apprenant s'orientent vers des modèles bayésiens. En effet, des modèles de diagnostic des connaissances de l'apprenant, comme dans le diagnostic médical, sont des modèles qui doivent agir dans l'incertitude. Or les modèles logiques classiques (calcul de prédicat et premier ordre) sont soumis à la règle de principe épistémologique selon laquelle les propositions sont vraies, fausses ou inconnues, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent.

C'est dans ce cadre formel que le travail de Mathieu Hibou (2006) pose la question à propos de la structure de ces réseaux bayésiens (ibid. 20) : « *la question de l'adaptation structurelle du réseau aux comportements de l'apprenant a parfois été évoquée [MAYO&MITROVIC 2001], mais uniquement pour signaler l'existence du problème, sans apporter de piste ou d'ébauche de réponse, et ce alors que différents résultats de psychologie cognitive attestent de l'existence de différences structurelles selon le niveau d'expertise [CHI et al 1981]* ».

Brusilovsky et Millan (2009, p. 110) indiquent qu'il semble que les études disponibles (aussi bien théoriques qu'empiriques) encouragent dans le cas du diagnostic l'utilisation de l'orientation de type causale (des nœuds de type connaissance vers les nœuds de type événement) au lieu de l'orientation de type diagnostic (des nœuds de type événement vers les nœuds de type connaissance). Les arcs doivent donc partir des variables non observables vers les variables observables.

Aussi, le travail d'Hibou (2006) propose de modifier la structure en fonction de l'apprenant. L'orientation des arcs du général vers le particulier convient lorsque les compétences de l'apprenant présentent une certaine homogénéité du fait des dépendances que cette orientation induit. L'orientation dans le sens contraire est, quant à elle, plus adéquate pour des apprenants aux compétences hétérogènes.

Du point de vue de la rétroaction, dans tous les systèmes étudiés un même réseau est utilisé pour le diagnostic et pour la rétroaction, mais la mise en place et la maintenance d'un tel réseau pourrait se révéler peu efficace ; les travaux présentés préalablement n'ont pas abordé ces questions.

Enfin, en ce qui concerne l'architecture, la plupart des systèmes sont fortement couplés en ce qui concerne le diagnostic et la rétroaction. Il est donc difficile, dans l'état actuel des recherches en EIAH, de réutiliser des systèmes de diagnostic construit ailleurs pour appliquer d'autres formes de rétroactions que celle déjà proposées dans ces systèmes.

2.6. Nos travaux sur le diagnostic du sujet épistémique

Le diagnostic a comme fonction principale d'expliquer un comportement. Pour nous, il est un moyen d'informer le système de rétroaction. L'objectif étant de produire des rétroactions qui cherchent à conforter ou déstabiliser les contrôles mis en œuvre et les connaissances associées, le diagnostic doit donc informer sur ces contrôles.

Aussi, pour mieux comprendre l'évolution de l'apprenant nous cherchons à produire des diagnostics capables de tenir compte du contexte épistémique dans lequel se déroule l'activité du sujet et de son histoire.

2.6.1. Le diagnostic des contrôles

Nous avons fait le choix de nous centrer sur le diagnostic des contrôles car nous cherchons à produire des rétroactions centrées sur les contrôles, essentiels dans les connaissances décisionnelles qui nous intéressent, et que nous avons présentées dans le chapitre 3.

Une différence du point de vue du calcul est que dans certaines cas, comme le projet Baghera, les contrôles sont issus directement des traces alors que dans notre cas ce sont les éléments diagnostiqués. Cela est dû au domaine, parce que dans le cas de la preuve en géométrie les élèves doivent indiquer les éléments de contrôle pour valider un pas de preuve, alors que dans le domaine de la chirurgie ces éléments sont implicites.

Nous avons ainsi, dans le cadre du travail de Vu Chieu (Post-doctorat CNRS), conçu un système de diagnostic en deux étapes (Vu Minh, Luengo, & Vadcard, 2007) et (Vu Minh, Luengo, & Vadcard, 2006).

Une première étape calcule les variables de situations (pour savoir par exemple la position de la vis-à-vis des parties critiques). Une deuxième étape fait les inférences sur un réseau bayésien (qui propose des hypothèses sur les connaissances mobilisées lors du geste).

Lors de la première étape, nos variables de situations sont des informations sur l'état du problème. Elles sont issues des traces comportementales et sans jugement vis à vis de l'état de connaissances. Ainsi, la position de la vis dans une radio inlet peut être une variable de situation. Pour produire ce type de diagnostic, nous avons un ensemble de règles expertes, que nous appliquons aux traces laissées par l'action du sujet sur le simulateur. Voici des exemples de variables de situation:

SI (distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet > 4)
ALORS distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet =correct

SI (distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet <=4)
ALORS distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet =incorrect

SI ((distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet <= 4) ET
(distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet_0 <
distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet))
ALORS distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet =incorrect_bon_sens

SI ((distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet <= 4) ET
(distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet_0 >
distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet))
ALORS distance_broche_et_corticale_anterieure_aileron_sur_inlet = incorrect_mauvais_sens

Figure 38 Exemple de règles de diagnostic pour calculer les variables de situation

La deuxième étape permet de diagnostiquer les contrôles mobilisés lors de la résolution de problème avec un certain degré d'incertitude. Ainsi un contrôle sera mis en jeu valide (**MJV**), mis en jeu invalide (**MJI)** ou pas mis en jeu (**PMJ**), en fonction, d'une part, du contexte du problème (les opérateurs qui interviennent lors de la résolution) et, d'autre part, des variables de situation qui sont calculées dans l'étape 1 du diagnostic. Le résultat de ce diagnostic est rendu sous forme de probabilité sur les contrôles utilisés (Figure 39).

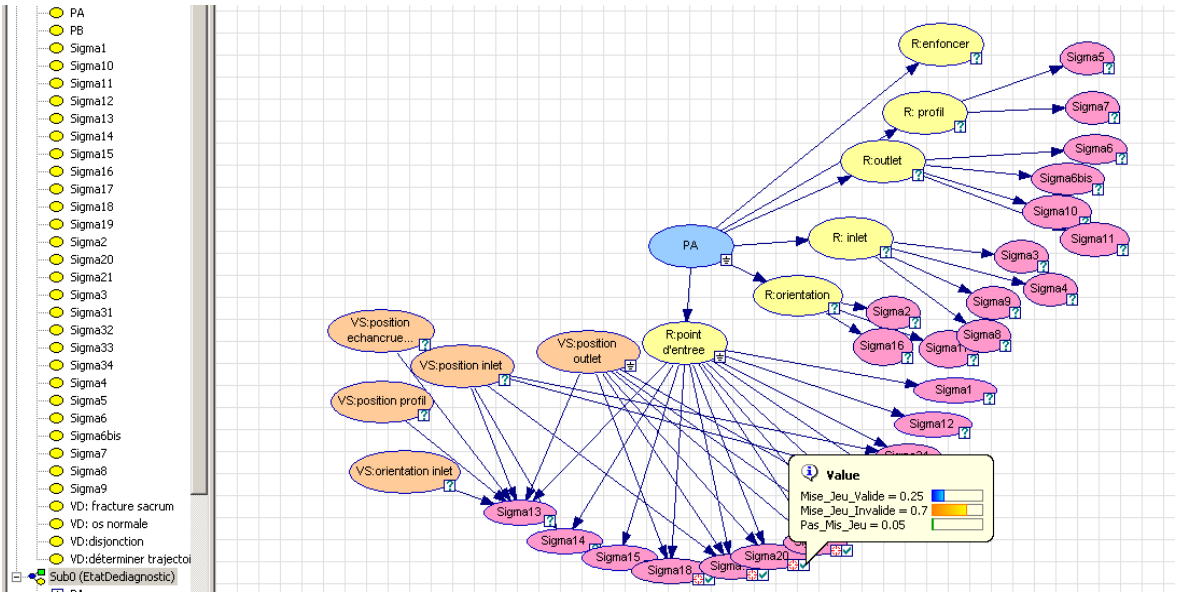


Figure 39 Calcul du diagnostic

Par rapport au réseau de connaissances initialement présenté (Figure 29), nous ajoutons donc un type de nœud, celui des VS (variables de situation) qui nous permet de récupérer le contexte dans lequel se trouve l'utilisateur. Ces variables sont calculées dynamiquement à partir des traces produites par l'utilisateur quand il travaille sur le simulateur.

Ainsi grâce à un jeu de probabilités et par inférence (on connaît le problème et les variables de situation) on peut calculer les contrôles mis en jeu lors de l'action de l'utilisateur.

Le résultat final du diagnostic est donc un vecteur de contrôles, où chaque contrôle aura une distribution probabiliste entre les trois états possibles (MJV, MJI et PMJ).

2.6.1.1. Les rétroactions à partir des contrôles

Comme nous l'avons illustré dans Vadcard et Luengo (2005), l'identification des contrôles nous permet de générer automatiquement des rétroactions de type « milieu antagoniste », c'est-à-dire qu'à partir du diagnostic d'un contrôle nous cherchons un problème dans lequel ce contrôle est hors domaine de validité. Ainsi, par exemple, si le chirurgien pose une vis avec une trajectoire courte mais

qui est valide par rapport au problème traité, car l'os est très dur (une des variables didactiques du problème est la qualité de l'os), le système de rétroaction cherchera un problème dans lequel le contrôle identifié est hors domaine de validité. Dans notre exemple, le système de rétroaction proposera un problème où la variable didactique qualité de l'os soit différente de « os dur ». Dans cet exemple le cas 1 (C1) est « si l'os est très dense, alors une trajectoire courte qui dépasse juste la ligne médiane est envisageable ») ; le cas 2 (C2) est : si la trajectoire risque d'être extra-osseuse en allant jusqu'à un centimètre derrière la ligne médiane, alors on peut raccourcir la trajectoire en dépassant à peine la ligne médiane pour rester intra-osseux » et C3 (Si la trajectoire risque d'être extra-osseuse, alors on peut raccourcir la trajectoire pour rester intra-osseux) sont des contrôles diagnostiqués. L'explication de ce scénario illustré dans Figure 40 est bien détaillée dans Vadcard et Luengo (2005).

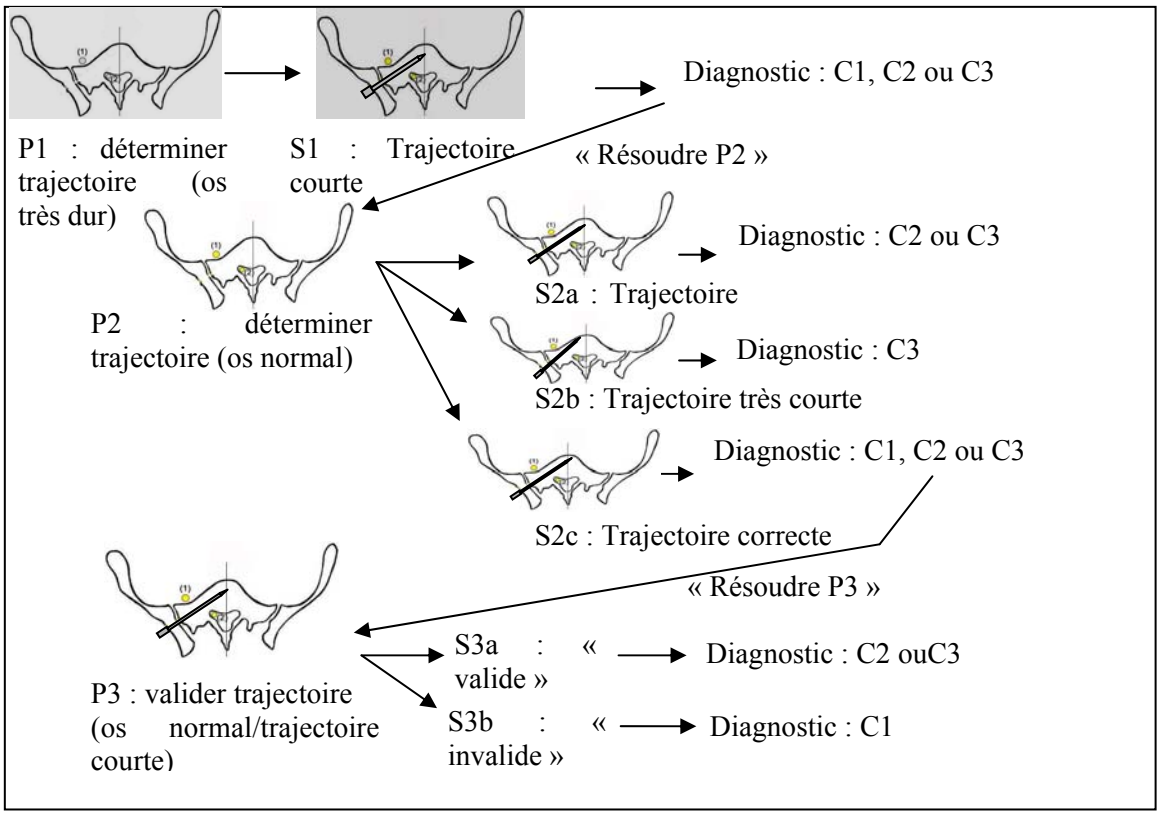


Figure 40 Exemple de scenario de type milieu antagoniste.

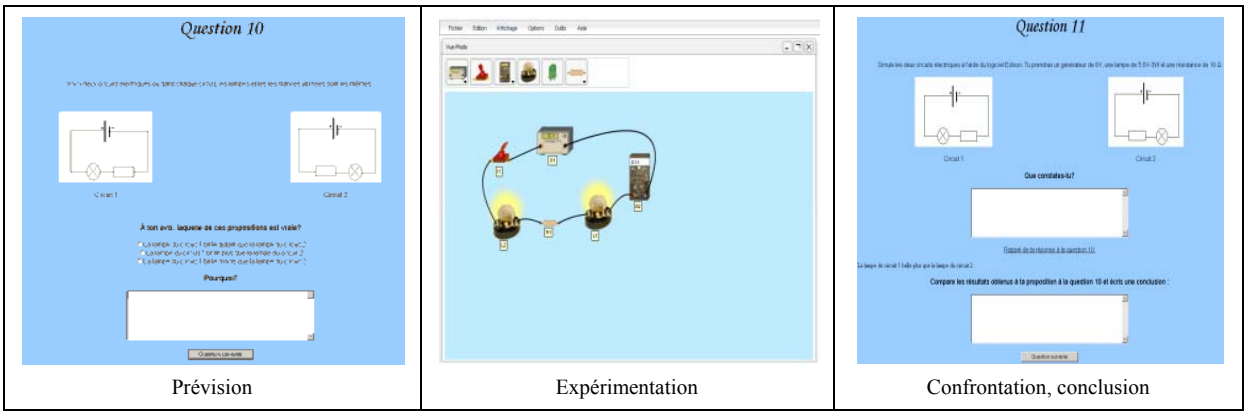
2.6.2. La prise en compte du contexte épistémique et de l'histoire dans le diagnostic

Comme nous l'avons présenté plus haut, nous nous intéressons à la dimension contextuelle du sujet épistémique. Autrement dit, des diagnostics qui informent sur le contexte et sur l'évolution temporelle dans ce contexte.

2.6.2.1. Calcul du diagnostic à partir du contexte

Nous étudions la façon dont le contexte doit être pris en compte dans les systèmes de diagnostic. Ainsi, dans le cadre de la thèse de Sandra Michelet, ce contexte peut être réifié par des environnements différents : l'élève peut disposer, entre autres, d'un questionnaire sous forme de QCM, d'un formulaire pour l'explication, la justification et l'argumentation et d'un micromonde pour l'expérimentation.

Pour concevoir ce type de diagnostic, nous avons réalisé plusieurs expérimentations au collège et au lycée ((Michelet, Adam, & Luengo, 2007) et (Adam, et al., 2006) sur l'apprentissage en électricité. Entre autres, nous avons proposé des scénarios de type démarche scientifique dont un nommé AppElec, que nous avons mis en place dans le cadre d'une initiative proposée au sein du réseau d'excellence Kaleidoscope (Adam, et al., 2006). Ce type de scénario présente des activités de prévision, des activités d'expérimentation et enfin des activités de confrontation et de conclusion, sur les phénomènes physiques en électricité, comme illustré dans la figure suivante (Figure 41).



Prévision | Expérimentation | Confrontation, conclusion

Figure 41 Extrait du scénario AppElec de démarche scientifique.

En ce qui concerne le diagnostic, et dans le cadre de la thèse de Sandra Michelet, nous étudions des algorithmes de diagnostic qui pondèrent le calcul en fonction du contexte. Ainsi, vis-à-vis du diagnostic, une réponse à un QCM n'aura pas la même valeur épistémique qu'une argumentation ou qu'une construction dans le micromonde. Aussi, un problème P1 sera plus significatif vis-à-vis d'une connaissance en jeu qu'un autre problème P2. Dans l'algorithme actuel, ces deux dimensions sont pondérées, et ces pondérations sont des paramètres pour le calcul du diagnostic. Les expérimentations actuellement réalisées avec les enseignants de physique (Michelet, Luengo, & Adam, 2009) nous permettront d'une part de valider les hypothèses liées à la relation entre le contexte et le diagnostic et d'autre part de trouver, pour les scénarios proposés, des valeurs approchées des paramètres de pondération.

2.6.2.2. Calcul du diagnostic à partir de l'histoire

Cet aspect, lié à la prise en compte de la dimension historique dans le diagnostic, nous l'avons travaillé lors de la première version du projet TELEOS (Vu Minh, Luengo, & Vadcard, 2006). Ainsi, dans le cas d'un scénario au cours duquel l'utilisateur fait une première trajectoire incorrecte puis corrige sa trajectoire dans le mauvais sens, le diagnostic sur les contrôles n'est pas le même que si ce même utilisateur avait corrigé sa trajectoire dans le bon sens, même si dans les deux cas la deuxième trajectoire obtenue n'est toujours pas correcte (comme montré dans l'exemple de la Figure 42).

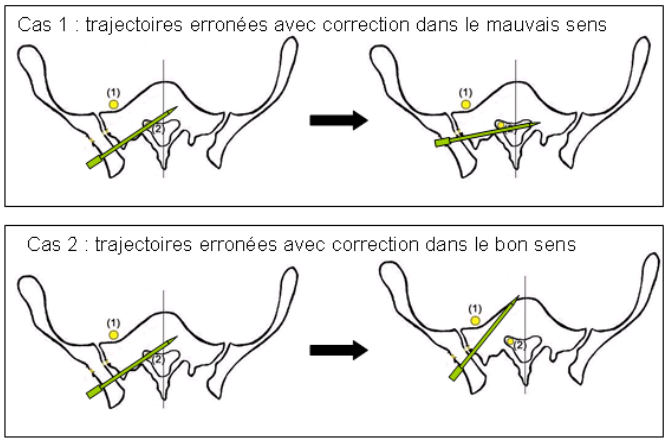
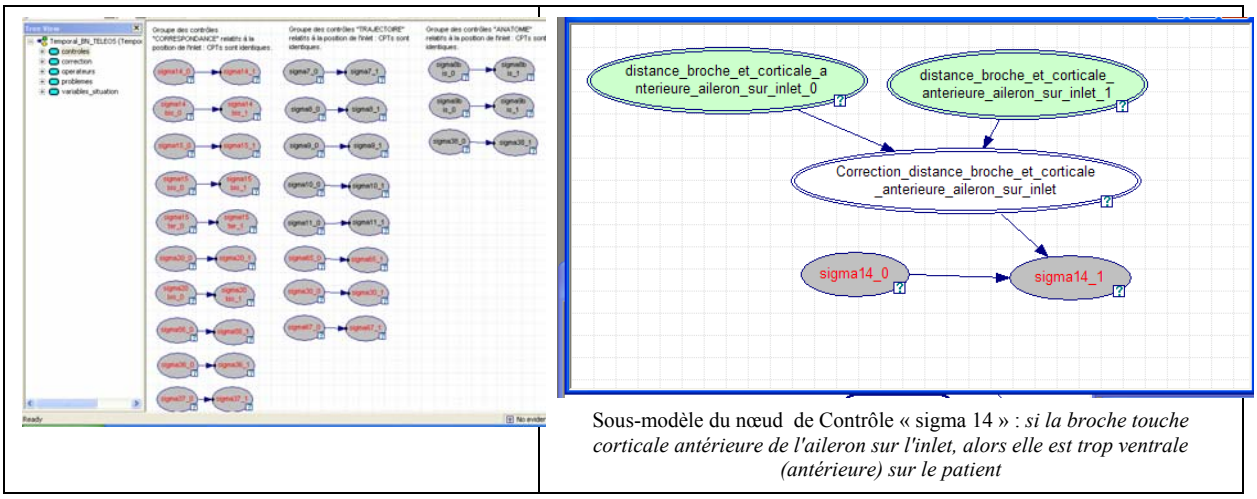


Figure 42. Prise en compte de la dimension temporelle pour le diagnostic, aspect didactique

Pour prendre en compte cette dimension historique, nous gardons les valeurs des variables de situation (ou nœuds d'observation) aux temps T_{n-1} et T_n, et nous avons ajouté une dépendance temporelle entre les contrôles. Ainsi le diagnostic des contrôles au temps T_n dépend des variables de situation et des opérateurs, mais aussi du contrôle lui-même au temps T_{n-1}.



Sous-modèle du nœud de Contrôle « sigma 14 » : *si la broche touche corticale antérieure de l'aileron sur l'inlet, alors elle est trop ventrale (antérieure) sur le patient*

Figure 43 Prise en compte de la dimension temporelle dans le diagnostic, aspect informatique.

Dans le cas de TELEOS, nous proposons une structure qui permet de garder le cheminement de façon à permettre au modèle de rétroaction de prendre en compte la dimension historique dans son raisonnent et non seulement le résultat cumulatif. Le résultat final du diagnostic étant sous la forme présentée en Figure 43, où nous pouvons voir deux temps de diagnostic, avec l'ensemble de variables de situations calculé pour chaque moment ainsi que le vecteur de probabilités (MJV, MJNV, PMJ) pour chaque contrôle diagnostiqué.

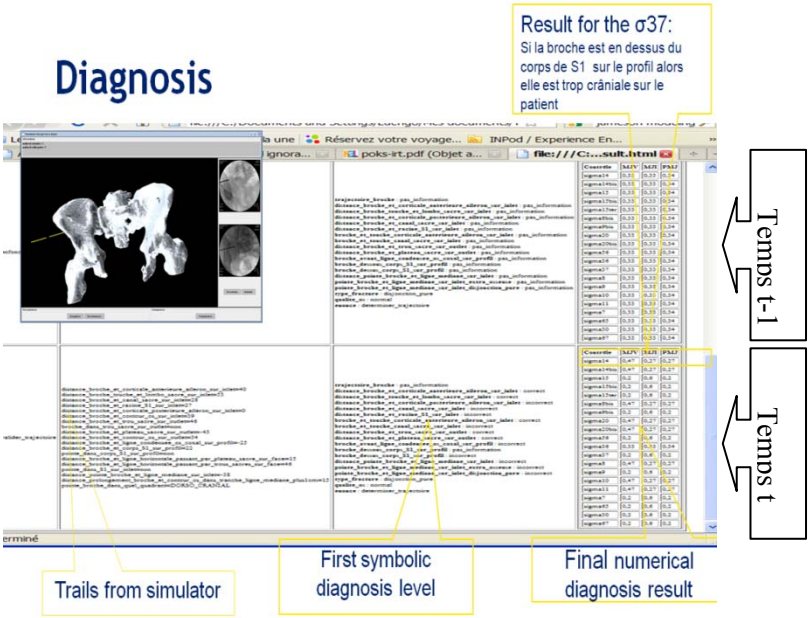


Figure 44 Exemple de sortie du diagnostic sur deux temps dans le projet TELEOS 1

Par ailleurs, et dans le cadre de la thèse de Sandra Michelet, nous nous intéressons à étudier la notion de précédence entre les problèmes proposés et le diagnostic. Puisque nous avons fait l'hypothèse que chaque problème a une pondération vis-à-vis des connaissances en jeu, et puisque nous supposons que l'apprenant peut avoir des résultats de diagnostic contradictoires, nous souhaitions établir une pondération relative à l'ordre chronologique dans le calcul du diagnostic.

"Moreover, we want to see the impact of the resolution of a problem at time t on the problem at time t+1. For example, let us consider two learners Paul and Pierre, who have solved the same problem but in different orders. Even if, they solved the same problems, the sequence of resolution not being the same one, their diagnoses are different." (Michelet, Luengo, & Adam, 2009, p. 4)

Nous avons ainsi mis en place des expérimentations pendant la période de mai-juillet 2009 pour étudier ces différents aspects. Ces expérimentations sont décrites dans (Michelet, Luengo, & Adam, 2009) et l'analyse finale des résultats est en cours.

2.6.2.3. Rétroaction à partir du contexte et du temps

Nous considérons que l'information relative à la nature du contrôle, et donc le contexte dans lequel il a été diagnostiqué, nous permet de décider de la forme de rétroaction la plus appropriée. Ainsi, dans le cadre du projet TELEOS, la rétroaction décidera, selon le diagnostic, de renvoyer sur différents contextes. Si le contrôle diagnostiqué fait référence aux connaissances déclaratives, la rétroaction enverra l'utilisateur sur des parties du cours web qui sont sémantiquement liées au contrôle, comme présenté dans le chapitre précédent. Si le contrôle fait référence aux connaissances procédurales, de nature empirique, la rétroaction enverra sur la résolution d'un nouveau problème dans le simulateur ou proposera des cas cliniques, sous forme de contre-exemple. Cette dernière possibilité se produit si le contrôle est diagnostiqué comme mis en jeu invalide. Un exemple, extrait de Luengo et al. (Luengo, Aboulafia, Blavier, Shorten, Vadcard, & Zottmann, 2009), est présenté dans la figure suivante.

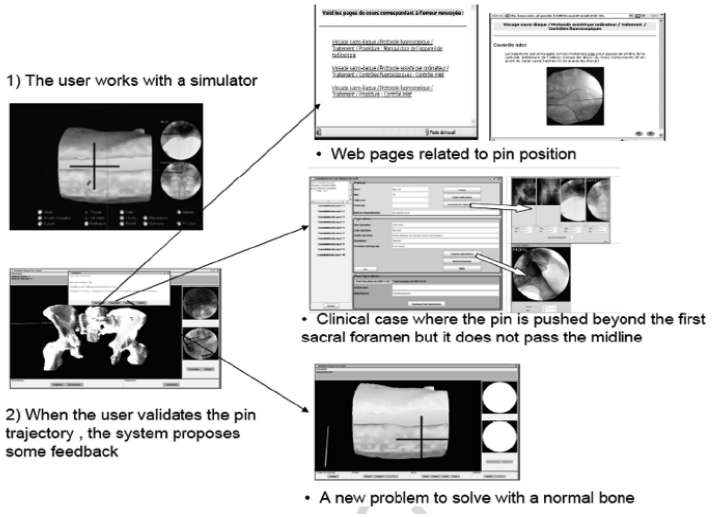


Figure 45 Exemple des rétroactions dans le projet TELEOS

Comme indiqué précédemment, nous cherchons à produire un diagnostic qui tiens compte de l'histoire. Mais la rétroaction elle-même doit aussi être le produit d'une analyse historique et réflexive des rétroactions. Ainsi par exemple lors des validations du modèle de rétroaction du projet TELEOS, dans certains scénarios (Mufti-Alchawafa, 2008) l'expert recommande des rétroactions séquentielles qui tiennent compte des éléments du passé, comme par exemple « envoyer une rétroaction pour vérifier tel contrôle, puis, suite aux actions de l'apprenant, envoyer la prochaine rétroaction pour le déstabiliser par rapport au même contrôle » quelque soit le dernier diagnostic. Cette proposition de rétroaction séquentielle peut utiliser non seulement le résultat cumulatif du diagnostic mais l'évolution, ou la différence entre deux problèmes résolus. Considérer cette dimension est un des objectifs de nos travaux.

Scénario 1 pour validation de type gold standard pour comparer la rétroaction du système avec la rétroaction de l'expert (Mufti-Alchawafa, 2008)

Diagnostic	Un étudiant reprend plusieurs fois une trajectoire sans raison évidente (pas de trajet extra-osseux). La position de la broche par rapport à la fracture est diagnostiquée comme MJV à 50%, les autres contrôles sont MJV à 80%.
Rétroaction	J'aimerais savoir si l'étudiant mettait en jeu ou non ce contrôle lors des reprises de trajectoires donc je lui propose un cas de disjonction pour voir si le contrôle de position de la broche dans le cas d'une disjonction est diagnostiquée comme MJV Après la résolution de ce nouvel exercice et quel que soit le diagnostic je veux qu'il consulte le cours sur les positions de la broche en fonction de la lésion.
Commentaire	Il s'agit d'affiner le diagnostic, pour essayer de comprendre pourquoi cet étudiant reprend sa trajectoire. Une hypothèse est qu'il le fait parce qu'il essaye d'atteindre une position particulière, peut-être liée au type de fracture. C'est pourquoi je veux qu'il résolve un exercice avec un type de fracture différent. Comme il n'y a rien d'autre de plus prioritaire, on peut lui donner à lire le cours sur ce thème, même si l'hypothèse n'est pas vérifiée.

2.6.3. Nos systèmes formels de diagnostic

En ce qui concerne le modèle formel lui-même, nous avons cherché dans notre cas à comparer le système formel d'un diagnostic symbolique à celui d'un diagnostic numérique. Ainsi, Cedric Liaeauf (Liabeuf, 2006), dans son mémoire de master de recherche en EIAH et dans le cadre du projet TELEOS, a comparé la conception d'un diagnostic dans le cadre du modèle KOOD, qui est un modèle logique conçu pour le diagnostic industriel (Ploix, Desinde, M., & Michau, 2004), avec la conception d'un diagnostic dans le cadre des réseaux bayésiens. Sa conclusion était la suivante :

« Le niveau de description nécessaire n'est pas le même dans les deux cas. En effet, une méthode utilisant des réseaux bayésiens a besoin de moins d'informations a priori que des méthodes analytiques comme KOOD. Alors que les réseaux bayésiens peuvent combler le manque d'informations par leur capacité d'apprentissage incrémental, KOOD a besoin le plus tôt possible du maximum d'information.

En contrepartie de ces inconvénients, une méthode comme KOOD, exploitant des modèles du comportement d'apprenants sous forme de règles, peut développer des raisonnements diagnostiques logiques conduisant à des preuves, c'est-à-dire que les résultats obtenus sont démontrés. » (ibid p.49).

Nous avons pu mettre en place cette comparaison car notre modèle de diagnostic et notre système de rétroaction sont faiblement couplés. Ce sont, en effet, des agents implémentés séparément (Luengo, Mufti-Alchawafa, & Vadcard, 2004).

Nous avons, par ailleurs, fait le choix d'utiliser des systèmes formels dans lesquels il est possible d'exprimer la notion d'incertitude liée au diagnostic à propos du sujet épistémique. Dans le cas de TELEOS, comme nous l'avons présenté précédemment, le système formel est constitué des réseaux bayésiens. Dans le cas de l'électricité, nous utilisons la logique de premier ordre (prolog), mais nous ajoutons la notion d'incertitude, déterminé par le contexte et le type de problème résolu, dans les algorithmes de traitement.

Comme nous l'avons décrit plus haut (§2.5), différents travaux cherchent à valider la structure du système formel, en particulier des réseaux bayésiens, dans les systèmes de diagnostic. Leur conclusion est que l'orientation des arcs doit tenir compte de l'état de l'apprenant. Comme dans le cas de la production de la rétroaction l'objectif n'est pas de diagnostiquer, il est donc nécessaire de réaliser des analyses concernant la structure du réseau du point de vue de la rétroaction.

Ainsi, dans le cadre du second projet TELEOS, nous avons décidé de mettre en place des processus où la construction de la structure est construite sur le modèle théorique (nouds de type contrôle, opérateur, problème et registre), et la relation de causalité est faite par l'apprentissage à partir des données. Cela signifie qu'une structure initiale, centrée *expert*, est déjà construite, mais qu'elle sera enrichie par des méthodes d'apprentissage à partir des données afin de déterminer les paramètres de causalité (c'est-à-dire la distribution des probabilités des paramètres considérés). Nous sommes

actuellement dans la phase de collecte des données. Ces données étant de nature très différente, nous nous intéressons à l'apprentissage à partir des données hétérogènes.

Cette démarche permet d'une part d'alléger le travail de spécification lors de la construction du modèle du sujet épistémique (actuellement il faut spécifier les valeurs de causalité entre les nœuds), et d'autre part d'introduire deux types de validation, une validation par introspection avec l'expert et une validation empirique à partir des données. Cette automatisation enlèvera également les erreurs potentielles qui peuvent être introduites lors des spécifications manuelles, comme celles réalisées dans le système de diagnostic initial.

3. Résultats liés aux modèles du sujet épistémique et le diagnostic

Nous disposons de plusieurs modèles du sujet épistémique. Dans le cas de la formation professionnelle (vissage ilio-sacré, vértebroplastie, chirurgie aortique laparoscopique, chirurgie urologie laparoscopique et calcul des limitations au décollage pour les pilotes de ligne), ces modèles sont tous construits à partir de la notion de conceptions du modèle de ck¢.

Le modèle ck¢ n'est pas accompagné d'une méthodologie et certaines caractérisations sont implicites. Ce qui nous a conduits à faire certains choix de modélisation.

Un premier choix est de décrire et d'organiser les problèmes par leurs variables didactiques. Même si cela n'est pas explicite dans le modèle ck¢, le cadre théorique dans lequel ce dernier est défini (la théorie des situations) nous as permis de faire ce choix.

Un deuxième choix est de proposer que les opérateurs, au sens ck¢, sont des actions dans nos modèles. Ce choix est lié à notre cadre de travail (la formation professionnelle) où le passage d'un état d'un problème à un autre est exprimé par une action. Ce qui, de notre point de vue, rend plus accessible l'identification des opérateurs.

Enfin, nous explicitons la nature des contrôles (décisionnel, procédural, perceptivo-gestuel). Ce dernier élément n'est pas caractérisée dans le modèle ck¢, mais il est déterminant pour le calcul des rétroactions adaptées.

Notre premier résultat est donc le passage d'un modèle issu de la didactique des mathématiques à un modèle adapté à la didactique professionnelle. Nous avons élaboré une méthodologie qui a été réutilisée dans plusieurs domaines de la formation professionnelle. Cette méthodologie permet de partager un même modèle entre les différentes disciplines (la didactique professionnelle, les experts du domaine de la connaissance en jeu et l'informatique). Les validations sont réalisées par introspection en faisant intervenir les différents domaines d'expertise (didactique et expert du domaine).

La limite de notre méthodologie est liée au niveau d'analyse nécessaire. La pertinence de la rétroaction dépend des contrôles identifiés et leur organisation dans l'espace des conceptions. En particulier, cette méthodologie ne peut pas être utilisable sans l'analyse didactique.

Il est donc nécessaire d'accompagner ce processus par des outils de spécification afin d'instrumenter le travail de conception pour qu'il ne devienne pas fastidieux et/ou difficilement utilisable (intractability au sens de Self (1988)).

En revanche, nous obtenons des modèles suffisamment précis qui nous permettent de produire des diagnostics pertinents pour le calcul de la rétroaction adaptée au sujet épistémique.

Le deuxième type de résultat est donc l'ensemble des différents systèmes de diagnostic que nous proposons.

Dans notre cas, les systèmes diagnostic, par leurs structures et par leurs systèmes formels, sont capables d'informer sur la position épistémique du sujet vis-à-vis des connaissances. Il est également capable d'informer sur le contexte et l'histoire du sujet.

Le système de diagnostic réalisé dans le cadre de TELEOS est réutilisable à condition de modéliser les conceptions en respectant la structure du modèle que nous avons construit. En d'autres mots, le moteur du diagnostic est réutilisable pour tout modèle de connaissance du sujet épistémique respectant l'organisation structurée en problèmes, opérateurs et contrôles que nous avons décrits préalablement (§2.6).

Enfin, l'architecture logicielle que nous avons choisie nous permet de valider nos systèmes de diagnostic séparément de nos systèmes de rétroaction.

Dans le cas du projet TELEOS, notre système de diagnostic a été validé par inspection à l'aide d'un ensemble de scénarios construits. Nous avions également validé l'interopérabilité du système de diagnostic et du système de rétroaction.

Dans le cas du système de diagnostic en électricité, la validation est réalisée par la méthode gold standard. Nous avons collecté un ensemble de traces des apprenants et nous comparons actuellement les diagnostics des enseignants avec les diagnostics du système.

4. Le sujet épistémique et le calcul des rétroactions : quelques projets et perspectives

Les perspectives dans le domaine du modèle de l'apprenant sont riches et variées. Elles vont de l'intégration dynamique des différentes caractéristiques de l'apprenant (styles d'apprentissage, affects, émotions, connaissances) à la capitalisation et exploitation des traces du sujet pour l'élaboration de ces modèles.

Nous constatons un passage à l'échelle dans les travaux liés au modèle de l'apprenant. Cela est du grâce à des véritables usages d'environnements dans les classes et au souci, relativement récent dans les EIAH, de capitalisation de ces usages, comme le témoignent, par exemple, les efforts faits dans différentes initiatives du réseau kaleidoscope (kaleidoscope, 2008) ou le centre des données du Pittsburgh Science of learning Lab (LearnLab, 2009).

Ce passage à l'échelle permettra au domaine des EIAH d'améliorer les processus de conception mais aussi le processus de validation, souvent ad-hoc et empirique. C'est avec ces deux objectifs que nous faisons partie du projet ISLE, soutenu par la région Rhône Alpes, à propos de modèle de traces et personnalisation dans les EIAH. En ce qui nous concerne, nous nous impliquons dans l'encadrement commun, avec le laboratoire LIRIS de Lyon, de la thèse de Lemya Setoutti et dont l'objectif de recherche est de proposer un modèle permettant d'exprimer les connaissances et les processus de raisonnement pour déduire des éléments d'information constituant un modèle de l'élève à partir de l'analyse des traces que l'élève laisse en utilisant un EIAH. En d'autres mots, cette thèse cherche à découple le modèle de l'apprenant des systèmes déjà construits pour proposer des moyens de conception à partir des traces.

Ce thème de recherche est directement lié à la personnalisation des EIAH, puisque c'est à l'aide d'un modèle de l'élève contenant des informations sur les connaissances, les compétences, les difficultés et le comportement de l'apprenant que l'on pourra ensuite personnaliser un EIAH, aussi bien en ce qui concerne les activités proposées à l'élève avec cet EIAH, qu'en ce qui concerne les interactions entre l'élève et le système informatique.

Par rapport à la capitalisation et la validation, nous participons, dans le même cadre du projet ISLE soutenu par la région, aux efforts de construction d'une plateforme de benchmark qui permettrait la collecte des données, mais aussi des outils d'analyse et de comparaison afin de pouvoir valider des systèmes et algorithmes proposés dans le domaine des EIAH.

Ce passage à l'échelle nous permet d'envisager un sujet épistémique qui aura accès à différents environnements sur une période plus au moins longue, mais dans tous les cas moins ponctuel qu'il ne l'est actuellement.

Il faudra donc concevoir des modèles capables de produire des états rendant compte de l'espace et du temps de l'interaction vécu par le sujet, et sur lesquels il soit possible de raisonner pour produire des rétroactions.

Ce type de recherche doit donc prendre en compte des dimensions que nous avons présentées préalablement telles que le contexte dans lequel se déroulent l'interaction et l'histoire du sujet vis-à-vis de ce contexte et des connaissances en jeu. Les connaissances sur l'apprenant qui nous intéressent à ce sujet sont proches de ce que Woolf définit comme l'expérience de l'apprenant (student experience) : "*the knowledge type are student history, student attitude ; discourses, plans , goals, context of the user*". (Woolf, 2009, p. 56), mais pour laquelle aucun modèle d'apprenant n'est identifié. Notons que le seul exemple cité dans cet ouvrage est en dehors du domaine des EIAH et que la dimension traitée est liée aux actions dans la navigation des pages web (Ardissono & Goy, 2000).

Des analyses didactiques comme celles réalisées dans le cas de l'algèbre (Croset, 2007), et les analyses en cours réalisées dans le cadre de la thèse de Sandra Michelet sont des pistes auxquelles nous nous intéressons pour la modélisation du contexte épistémique. En ce qui concerne les représentations, nous continuerons à explorer les réseaux bayesiens sur un point de vue apprentissage artificiel et adaptation, en cherchant à élaborer des processus de collecte et analyse des données pour passer des modèles souvent statiques à des modèles dynamiques, tel que suggéré par (Brusilovsky & Millán, 2009, p. 119) dans le cas des hypermédias adaptatifs : « *Un potentiel très intéressant de l'utilisation des réseaux bayésiens dans le contexte des applications Web serait d'employer des algorithmes d'apprentissage qui pourraient remodeler en continu les améliorations dans le modèle lui-même ; Les futurs algorithmes d'apprentissage d'adaptation seraient alors capables de traiter chaque information d'interaction comportementale et de modifier la structure du modèle lui-même* ».

Aussi, et relativement aux types d'apprentissages perceptivo-gestuels auxquels nous nous intéressons, nous travaillons sur la question des représentations des connaissances avec des modèles qui ne sont plus à événements discrets (Russell & Norvig, 2006, p. 379) mais qui doivent représenter des processus ou des événements liquides. Ce type d'événements permet de décrire des processus de changements continus ce qui semble proche de notre problématique. Cette piste de recherche pourrait nous apporter également des avancées sur la dimension historique que nous avons évoquée.

Par ailleurs il serait profitable, pour la conception des rétroactions épistémiques, de rapprocher la communauté travaillant sur les dimensions collaboratives pour l'apprentissage (ou communauté CSCL) et la communauté d'intelligence artificielle et éducation (AIED) centrée modèle d'apprenant. En effet, des travaux en sciences humaines ont pu montrer l'intérêt des interactions épistémiques entre apprenants, médiatisée par ordinateur, (Baker, de Vries, k., & Quignard, 2001). Il y a ainsi des travaux informatiques récents qui prennent en compte les deux dimensions : *To generate appropriate tutorial actions, COMET uses a model of each student's clinical reasoning for the problem domain. In addition, since problem solving in group PBL is a collaborative process, COMET uses a group model that enables it to do things like focus the group discussion, promote collaboration, and suggest peer helpers. Bayesian networks are used to model individual student knowledge and activity, as well as that of the group.* (Haddawy & Suebnukarn, 2006).

Dans ce dernier travail, l'analyse épistémique du sujet n'est pas utilisée pour la gestion de l'interaction. C'est ce dernier aspect qui nous intéresse. Nous avons ainsi démarré des travaux cette année dans ce sens (Mazé, 2009). Ces premiers avancés ont été faits dans le cadre d'un co-encadrement avec Pierre Tchounikine, dont ces derniers travaux sont dans le domaine du CSCL et qui est arrivé en septembre 2008 dans l'équipe. Nous avons ainsi mis en place des situations d'apprentissage collaboratives, en géométrie, et cherché à dégager des éléments du diagnostic, à partir du modèle cK¢, pour gérer les interactions. Ces éléments ont été ainsi utilisés dans un modèle d'appariement et testé sur un groupe d'apprenants : "*La structure des paires élaborées par le logiciel en vue de la collaboration montre l'intérêt que constitue l'analyse de la production de l'élève selon le modèle cKc pour la phase d'appariement. En effet, les couples ne sont ici pas construits sur une simple mesure de différenciation purement arithmétique mais sur des différences avérées et qui font sens par rapport au problème à résoudre*." (Mazé, 2009, p. 50). Ces premiers travaux sont encourageants parce qu'ils montrent la faisabilité d'un tel modèle, néanmoins, le modèle d'appariement doit être enrichi, du point de vue de sa complétude mais aussi de son niveau de généricité (l'expérience a été faite sur trois problèmes en géométrie) et de sa flexibilité. Ce dernier point se réfère à la capacité de permettre la gestion des séances collaboratives selon l'orientation souhaitée, car plusieurs critères d'appariement épistémique sont possibles (élèves avec des conceptions différentes ou semblables, élèves qui ont mobilisé des opérateurs égaux ou différents pour un même problème, etc..). Enfin le modèle doit garantir la faisabilité des interactions collaboratives proposées.

5. Bibliographie de nos travaux sur le sujet épistémique et le calcul des rétroactions

Boulmaiz, F. (2003). *Modélisation et validation d'un assistant informatique pour le travail collaboratif expérimental.* Grenoble: Master Informatique, Systèmes et Communication. Université Joseph Fourier.

Ceaux, E., Vadcard, L., Dubois, M. & Luengo, V. (2009) Designing a learning environment in percutaneous surgery: models of knowledge, gesture and learning situations. *European Association for Research on Learning and Instruction*, Amsterdam (The Netherlands). Août 2009.

Dubois, M., Vadcard, L., Luengo, V.. Prise en compte de différents niveaux d'appropriation pédagogique dans la conception d'un simulateur d'apprentissage en chirurgie orthopédique. In Actes du 15° *congrès international de l'AIPTLF* : *Entre tradition et innovation, comment transformons nous l'univers du travail*. Québec. Août 2008. CD-ROm Presse Université de Québec.

Larrieu, S., Vadcard, L., & Luengo, V. (2005). Didactical approach for the design of a learning environment for airline pilots. *European Research Workshop on Understanding and Rethinking the Technology-mediated workplace* (p. 5). Liège, Belgium: NOE Kaleidoscope.

Liabeuf, C. (2006). *Système de diagnostic pour l'apprentissage en chirurgie orthopédique.* Grenoble: Master 2 R « Master 2 EIAH et Didactique. Université joseph Fourier.

Luengo V., Vadcard L., Dubois M., Mufti-Alchawafa D., TELEOS : de l'analyse de l'activité professionnelle à la formalisation des connaissances pour un environnement d'apprentissage. Actes de la conférence « *Ingénierie de Connaissances»,* IC 2006, Nantes, Juin 2006.10 pages.

Luengo V., Mufti-Alchawafa D., Vadcard L., Design of adaptive surgery learning environment with bayesian network. In INTED2007. *International Technology, Education and Development Conference*. Mars 2007, Valence, Espagne. 9 pages.

Luengo, V. (2008). Take into account knowledge constraints for TEL environments design in medical education. *International Conference on Advanced Learning Technologies.* (p. 5 pages). Santander: Springer.

Mazé, O. (2009). *Appariement des élèves à l'aide d'une modélisation des connaissances de l'apprenant.* Le Mans: Master Communication Homme-Machine et Ingénierie Educative, Université du Mans.

Michelet, S. (2005). *Modélisation de la connaissance en électricité.* Grenoble: Master 2, Information, Cognition, Apprentissage.

Michelet, S., Luengo, V., & Adam, J. (2009). DiagElec: A model of Diagnosis in Electricity using a learner's model. *European Conference on Technology Enhanced Larning.* Nice.

Perez, L. (2005). *Software architecture proposal for a learning environment in orthopaedic surgery.* Grenoble: Stage de troisième année d'ingénieur ENSIMAG. Institut National Polytechnique.

Roulin, C. (2004). *Modélisation de conceptions d'élèves en électricité.* Grenoble: Master Environnements Informatiques pour l'apprentissage Humain. Université Joseph Fourier.

Sénéchal, M. (2006). *Etudes de phénomènes d'apprentissage pour les pilotes de ligne.* Grenoble: Master 2 Information, Cognition et Apprentissage. Université Pierre Mendès France.

Settouti, L. (2008). *Elaboration du modèle de l'apprenant à partir des traces issues d'EIAH.* Lyon: Master Connaissance et Raisonnement. Institut National des Sciences Appliquées (INSA).

Tonetti J., Vadcard L., Luengo V., Dubois M., (2007) Contributions interdisciplinaires à la conception d'un environnement de formation en orthopédie. In, *Computer Assisted Medical and Surgical Interventions SURGETICA* 2007. 8 pages.

Vu Minh, C., Luengo, V., & Vadcard, L. (2006). A Bayesian Network Based Approach for Student Diagnosis. *Information and Communication Technologies in Higher Education and Industry*, (p. 6 pages).

Vu Minh, C., Luengo, V., & Vadcard, L. (2007). A Framework for Building Intelligent Learning Environments in Illdefined domains. *Workshop AIED Applications in Ill-Defined Domains. Artificial Intelligence in education* (p. 5 pages). Los Angeles: Springer.

CHAPITRE V

La situation d'apprentissage et la rétroaction épistémique

Comme énoncé par plusieurs auteurs, il ne suffit pas de disposer d'un environnement interactif, tel que simulateurs, micromondes ou autres, pour garantir l'apprentissage : *"Games, simulations and other exploratory environments can be very motivating to users and can encourage them to put in considerable effort. Harnessing these features for learning systems has long been of interest to educators. There is much learning going on in all good games, as argued by Gee [18], but many educators would like to guide learning in these environments towards specific skill sets. It is possible to guide and direct learning in exploratory environments by foregrounding salient activities through representational choices". (Howland, du Boulay, & Good, 2009, p. 7)*

En conséquence, et comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 2, une des façons de chercher à garantir la signification des apprentissages avec des systèmes informatiques est de proposer une interaction avec un degré de contrainte plus élevé. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux interactions, ou plus précisément à la production de rétroactions, qui seront contraintes par les situations d'apprentissage.

En ce qui concerne la caractérisation des rétroactions, que nous avons présentée dans le chapitre 2, des rétroactions orientées but (Goal oriented) semblent être les plus appropriées ici car ce sont des rétroactions par rapport à un objectif, i.e. la connaissance en jeu.

Le problème est donc pour nous de créer des situations, organisées sous forme de parcours, ayant pour objectif de passer d'un état de connaissance à un autre. Ces situations seront caractérisées par différents moyens : un ensemble de problèmes, les connaissances auxquelles ils sont associés, les connaissances préalables nécessaires pour les résoudre, etc.

Si nous nous limitons aux modèles informatisés, les parcours liés aux situations sont décrits par un agent humain (enseignant, didacticien, ingénieur pédagogue,..) ou calculés par le système. Dans ce dernier cas, nous dirons que le système est génératif (Tableau 5, p. 17), comme proposé par Woolf (2009). Ces situations pourront se créer de façon statique ou dynamique (à la volée), en fonction de plusieurs dimensions, telles que l'état de connaissance du sujet ou l'agencement lié aux caractéristiques des connaissances en jeu, comme nous le verrons dans le point 1.1.

Cette notion de parcours construite pour des situations d'apprentissage peut sembler rapprochée de la notion de scénario pédagogique, cette dernière cherchant à décrire l'organisation et le déroulement d'une unité d'apprentissage en précisant les interactions entre les acteurs, les activités, les ressources et les éléments à observer (Lejeune & Pernin, 2004). Il est autant nécessaire de faire la différence entre scénarios pédagogiques et orchestrations des situations d'apprentissage, que de faire la différence entre didactique et pédagogie. En effet, les scénarios pédagogiques interrogent très souvent l'organisation de la classe et les variables spécifiées sont souvent d'ordre pédagogique et sont plus centrées sur des considérations telles que le type d'activité ou le rôle des utilisateurs. C'est-à-dire que les modèles de scénarios pédagogiques peuvent ne pas prendre en charge les dimensions épistémiques alors que les situations d'apprentissage, par définition, le font. Autrement dit, Les situations d'apprentissage interrogent l'organisation des connaissances en jeu vis-à-vis d'un sujet épistémique dans une situation donnée. Nous étudierons ces aspects de façon plus détaillée dans le point 2 de ce chapitre.

Dans le point suivant, nous nous intéresserons à quelques cadres théoriques, principalement à la théorie des situations didactiques et l'ingénierie didactique.

Nous allons ensuite étudier quelques formes de parcours et de production de rétroactions que nous avons conçues, puis dégager des éléments informatiques devant être considérés pour le calcul de rétroactions liées aux situations d'apprentissage.

Enfin, nous allons étudier quelques systèmes de scénarisation, afin de positionner cette recherche, en sachant que nos apports sont actuellement limités sur ce point car si nous avons avancé sur l'analyse, les implémentations restent elles très ponctuelles.

1. La situation d'apprentissage

Les théories présentées dans le chapitre précédent sont directement liées aux théories d'enseignement, mais elles n'étudient pas de façon précise la façon dont les situations doivent s'organiser. En effet, leur intérêt réside plus dans la compréhension des processus cognitifs du sujet que dans la proposition de la façon dont il faut organiser les situations pour mettre en œuvre ces processus. Un exemple est la théorie d'ACT, qui n'informe pas sur la façon de générer les situations d'apprentissage :

"*Additional difficulties using ACT-R stem from it not being a generative theory. The theory does not describe how to generate appropriate problems for students and can only evaluate the student's actions on canned problems*" (Woolf, 2009, p. 64).

1.1. La zone proximale de développement

La théorie de la zone proximale de développement (ZPD), proposée par Vygotsky, est utilisée par certains auteurs [(Luckin & Du Boulay, 1999), (Murray & Arroyo, 2002)] pour guider l'interaction en ayant comme objectif de rester dans la ZPD. Cette théorie est un vecteur des recherches dans le courant lié au cognitivisme situé. La ZPD est définie comme une distance, tel que paraphrasé par Woolf (Woolf, 2009, p. 125) à partir de l'oeuvre de Vygotsky: « *the distance between the actual development level as determined by independent problem solving and the level of potential development as determined through problem solving under adult guidance or collaboration of more capable peers* ». En conséquence, pour qu'un sujet puisse apprendre un concept, il ne doit pas avoir une trop grande distance entre le concept à apprendre et les concepts déjà appris. La construction des parcours et des problèmes doit veiller à cette distance. Le rôle du formateur-médiateur est donc ici d'évaluer cette différence et de guider le stagiaire dans son parcours (fonction d'étayage) pour passer d'une phase de développement à une autre.

Du point de vue de la rétroaction, un des modèles proposés est celui de la rétroaction guidée : *"Like training wheels, scaffolding enables learners to do more advanced activities and to engage in more advanced thinking and problem solving than they could without such help. […] In relation to feedback, they suggested a goal-directed approach to learning using scaffolding (or scaffolded feedback) that (a) motivates the learner's interest related to the task, (b) simplifies the task to make it more manageable and achievable, (c) provides some direction to help the learner focus on achieving the goal, (d) clearly indicates the differences between the learner's work and the standard or desired solution, (e) reduces frustration and risk, and (f) models and clearly defines the expectations (goals) of the activity to be performed. [..] Scaffolding is gradually removed as students gain their cognitive footing, thus directive feedback may be most helpful during the early stages of learning. Facilitative feedback may be more helpful later on, and the question is when. According to Vygotsky (1987), external scaffolds can be removed when the learner develops more sophisticated cognitive systems, where the system of knowledge itself becomes part of the scaffold for new learning.*" (Shute V. , 2007, p. 13).

Même si des systèmes proposent des modèles [(Murray & Arroyo, 2002) ou (Luckin & Du Boulay, 1999)] pour passer d'un concept à un autre, la théorie elle-même ne dit rien sur les éléments à prendre en compte pour mesurer cette distance, comme par exemple, des variables pertinentes permettant de caractériser les situations et de construire des parcours d'apprentissage.

1.2. La théorie des situations didactiques

Par ailleurs, et tel que proposé par Vergnaud (2002), les situations sont indissociables de la connaissance : "*Le couple « schème-situation » est la clef de voûte de la psychologie cognitive et de la théorie de l'activité : pour cette raison simple que, la connaissance étant adaptation, ce sont les schèmes qui s'adaptent, et qu'ils s'adaptent à des situations*".

Dans ce chapitre la question centrale est de savoir comment calculer la rétroaction épistémique en ayant dans l'environnement informatique des informations sur les situations d'apprentissage.

La théorie des situations didactiques (TSD), proposée par Brousseau (1998) dans le cadre de la didactique des mathématiques, nous permet de traiter cette question. Dans la TSD, la notion de situation didactique fait référence aux situations qui servent à enseigner. Dans ce cadre, Brousseau pose la question suivante (1997, p. 5): existe-t-il une correspondance entre l'organisation du milieu, les formes d'interactions adéquates à son contrôle et les répertoires de connaissances mobilisés ? Si oui, nous obtiendrons des types différents de situations. Est-ce qu'ils détermineront des modes d'apprentissages différents ?

Ces questions sont posées en dehors du cadre informatique. En ce qui nous concerne, nous considérons les questions suivantes : est-il possible de proposer des modèles, des représentations informatiques ainsi que des algorithmes afin d'organiser le milieu à partir des situations ? La caractérisation des différents types de situations impose-t-elle des contraintes de conception sur le type d'EIAH, en particulier sur le type de rétroaction que le système sera capable de produire ? Et de façon duale : le type d'EIAH et de rétroactions qu'il est capable de produire contraint-il le type de situation?

Comme pour Vergnaud, les situations sont pour Brousseau indissociables des connaissances : "*Les conditions d'une des utilisations particulières d'une connaissance mathématique sont considérées comme formant un système appelé « situation ». Une situation est : d'une part, un jeu hypothétique (qui peut être défini mathématiquement), qui explicite un système minimal de conditions nécessaires dans lesquelles une connaissance (mathématique) déterminée, peut se manifester par les décisions aux effets observables (des actions) d'un actant sur un milieu.*" (Brousseau G. , 2002).

En conséquence, une situation modélise les enjeux et les possibilités de décision d'un actant dans un certain milieu. Elle est choisie de telle manière que la stratégie de résolution ne puisse être mise en œuvre que grâce à une certaine connaissance. Nous nous intéresserons donc aux facteurs qui permettent de construire cette situation.

Brousseau propose ainsi que les modèles de situations doivent être envisagés sous deux formes qu'il s'agit de faire coïncider : *"- comme nécessité théorique, déduite du savoir lui même, et d'un fonctionnement minimal supposé de l'élève ; - comme représentation des situations réelles, didactiques ou non, où la connaissance devrait " se déduire " des décisions et des comportements du sujet.*" (1997, p. 3).

De notre point de vue, cela fait appel aux modèles de connaissance et du sujet que nous avons présentés dans les chapitres précédents.

Quant à la notion de milieu : la structuration du milieu didactique de l'élève fait apparaître un emboîtement de situations correspondant à des projets distincts et dont chacune sert de milieu à la suivante. Dans cette perspective, Brousseau propose de voir comment les élèves (utilisateurs) deviennent simplement les révélateurs des caractéristiques des situations auxquelles ils réagissent.

Le milieu détermine le type de situation. Brousseau propose de distinguer trois types de situations : action, formulation et validation.

Dans les situations d'action, "Agir" consiste pour un sujet à choisir directement les états du milieu antagoniste en fonction de ses propres motivations. Si le milieu réagit avec une certaine régularité, le sujet peut être conduit à anticiper ces réactions et à en tenir compte dans ses propres actions. "*C'est donc une situation où la connaissance du sujet se manifeste seulement par des décisions, par des actions régulières et efficaces sur le milieu et où il est sans importance pour l'évolution des interactions avec le milieu que l'actant puisse ou non identifier, expliciter ou expliquer la connaissance nécessaire*" (Brousseau G. , 2002).

Brousseau propose les situations de formulations parce que « *la formulation d'une connaissance correspondrait à une capacité du sujet à la reprendre (la reconnaître, l'identifier, la décomposer et la reconstruire dans un système linguistique)*.

Ces situations de formulations sont en étroite relation avec les activités épistémiques proposées par Olhsson (1995, p. 51) et que nous avons présentées dans la première partie du chapitre précédent. Ainsi les activités de décrire, expliquer, prédire ou argumenter seront des activités liées aux situations de formulation. D'autres auteurs montrent également la nécessité des situations de formulation :

The greater understanding that resulted from self-explanation seems due to qualitatively different knowledge. It can be explained in terms of more integrated visual and verbal declarative knowledge, used more reflectively, and less shallow procedural knowledge. In terms of learning processes, the act of explaining problem-solving steps appears to help students to integrate two modes of learning: implicit visual induction and explicit verbal knowledge acquisition. (Aleven & Koedinger, 2002).

Il faut donc un milieu propice à susciter la formulation : *Le milieu qui doit rendre nécessaire l'usage par le sujet d'une formulation doit donc comporter (effectivement ou fictivement) un autre sujet à qui le premier devra adresser une information* (Brousseau G. , 1997, p. 7). Selon nous, l'environnement informatique peut jouer le rôle de l'autre sujet pour lequel il est nécessaire de formuler sa connaissance.

Enfin, les situations de validation, ou schémas de preuve, sont des situations qui sont liées à la recherche d'une vérité : *c'est-à-dire du moyen de rattacher de façon sûre une connaissance à un champ de savoirs déjà établis, mais s'opposent à chaque instant dès qu'il y a doute*. Ici la solution exige que les actants établissent ensemble la validité de la connaissance caractéristique de cette situation. La situation « *s'appuie sur la reconnaissance par tous d'une conformité à une norme, d'une constructibilité formelle dans un certain répertoire de règles ou de théorèmes connus, d'une pertinence pour décrire des éléments d'une situation, et/ou d'une adéquation vérifiée pour la résoudre.* »

En ce qui concerne les environnements informatiques, nous avons défini les caractéristiques nécessaires pour pouvoir les associer aux différents types de situations proposés dans la TSD [(Luengo V. , 1997, p. 78) et (Luengo V. , 1999)]. Il est donc possible de caractériser les environnements par rapport aux situations auxquels ils peuvent correspondre. Ainsi un environnement de simulation est un environnement qui peut s'organiser naturellement dans des situations d'action. En effet, le sujet n'est pas contraint à formuler sa connaissance ou à proposer des moyens de validation et de jugement, mais c'est par l'action sur la simulation qu'il peut obtenir certaines régularités lui permettant d'agir sur le milieu. Si cette simulation est accompagnée d'un environnement qui permet, par exemple, la proposition d'hypothèses – comme dans le cas du logiciel SYMQUEST (de Jong & der Meij, Simquest, 2009), le système peut s'organiser dans un milieu correspondant à des situations de formulation. Enfin, si l'environnement donne les moyens de jugement et de validation (comme dans le cas de Cabri-Euclide introduit dans le chapitre 3), alors l'environnement est propice à des situations de validation.

Il faut souligner que même si l'environnement informatique est propice à des types de situations, cela peut ne pas suffire. Il faut encore les problèmes proposés garantissent le type de situation, par exemple par le jeu des contraintes sur les interactions avec l'environnement.

En outre, il existe de nombreuses situations relatives à une même connaissance. De même, de nombreuses connaissances peuvent intervenir dans une décision unique. Un des objets de la théorie des situations didactiques en mathématiques est de classer les situations, et par conséquent les connaissances, en fonction de leurs rapports et des possibilités d'apprentissage et d'enseignement qu'elles offrent.

En conséquence, ces modèles de situation doivent présenter des variantes et des variables : "*On peut alors chercher par des moyens mathématiques et expérimentaux, quelles valeurs de ces variables peuvent déterminer les conditions optimales de diffusion de connaissances déterminées, ou expliquer celles qui apparaissent comme réponse (théoriquement) optimale aux conditions proposées à l'élève*" (Brousseau G. , 1997, p. 3).

"*Nous appelons variable cognitive, une variable de la situation telle que par le choix de valeurs différentes on peut provoquer des changements de la connaissance optimale. Les variables didactiques seront parmi les variables cognitives celles qui peuvent être fixées par l'enseignant*."

(Brousseau G. , 1997, p. 4). C'est donc par cette caractéristique que nous cherchons à distinguer les situations, de façon à pouvoir calculer des rétroactions liées au parcours des situations.

Une variable didactique est un paramètre qui, lorsqu'il est modifié, provoque des adaptations, des régulations et des changements de stratégie vis à vis du problème ou de la situation.

1.3. L'ingénierie didactique

La construction des situations et de leur enchainement par l'analyse des variables didactiques concerne l'ingénierie didactique. L'ingénierie didactique s'attache à identifier ou à produire les situations dont le contrôle exige la mise en œuvre des connaissances visées et, parmi ces situations, à distinguer celles qui permettent la création de cette connaissance par une adaptation de celles auxquelles l'adaptation est immédiate ou impossible (Brousseau G. , 1997, p. 7).

L'ingénierie didactique est un axe de recherche très actif en didactique (Artigue, 1998), (Artigue, 2002), (Hersant & Perrin-Glorian, 2005) et (Perrin-Glorian, 2009). En ce qui nous concerne, elle nous est potentiellement utile dans sa fonction de développement (Perrin-Glorian, 2009) par sa dimension pragmatique parce qu'elle détermine les conditions permettant de provoquer l'apprentissage de l'élève, parmi lesquelles :

- la nécessité de solliciter des réponses : l'élève doit, de par ses savoirs et connaissances antérieures, être capable d'élaborer une première réponse ; cependant, cette première réponse ne doit pas correspondre à la connaissance visée par la situation, sans quoi ce ne serait pas une situation d'apprentissage ;
- l'insuffisance ou l'inefficacité de la stratégie de base mise en œuvre par l'apprenant : lorsque l'apprenant est confronté à une situation d'apprentissage, il va mettre en œuvre une stratégie de base afin de résoudre le problème posé ; sans cette stratégie, l'élève ne comprend pas le jeu, même si la consigne est claire (Brousseau, 1998) ;
- la nécessité de faire varier les variables didactiques pour favoriser le changement de stratégie : il y a apprentissage lorsque les connaissances et les savoirs que possède l'apprenant à un instant ne lui permettent pas de résoudre la situation proposée et que, de ce fait, il est amené à changer de stratégie ; ainsi, parmi les variables manipulées, certaines variables, appelées *variables didactiques*, vont engendrer une remise en question des conceptions initiales de l'apprenant et un changement dans la stratégie de résolution mise en œuvre par celui-ci (Brousseau, 1998) ;
- pour faciliter le changement de stratégie et des connaissances associées, et ainsi atteindre l'apprentissage, le milieu doit, d'une part, permettre des rétroactions et, d'autre part, autoriser l'élève à recommencer ; de plus, le passage de la stratégie de base à la stratégie optimale requiert, a priori, la connaissance visée.

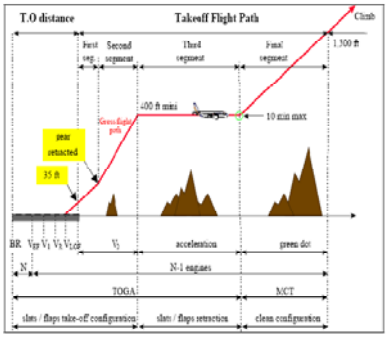
Ici, il est important de souligner que les travaux classiques en ingénierie didactique ne font pas référence à un système informatique ou, s'ils le font, ils n'interrogent pas l'environnement : "*Les modes de gestion des artefacts apparaissent dans les systèmes de travail, la plupart du temps, comme des points aveugles ou des chaînons manquants*" (Trouche, 2003, p. 38). Certains travaux vont proposer des ingénieries avec des environnements informatiques, mais ils sont vus comme des outils statiques, ou dans le cas le plus élaboré l'ingénierie proposera de laisser l'accès ou non à certaines fonctionnalités du système. Dans les ingénieries didactiques, en général, la conception de l'environnement informatique n'est donc pas interrogée de façon explicite de façon à avoir un impact direct sur sa conception ou sa configuration au sein des ingénieries.

L'ingénierie didactique est un moyen d'orchestration des situations, elle permet de dégager des contraintes pour la construction des parcours et donc la production des rétroactions épistémiques.

1.4. Nos modèles des situations d'apprentissage

Pour répondre à la contrainte de spécifier les problèmes de façon à pouvoir calculer des parcours, nous avons décidé de les décrire par leurs variables didactiques, dont nous présentons quelques

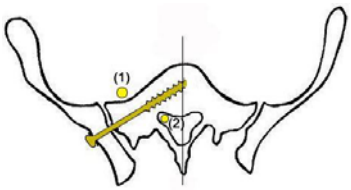
exemples [(Luengo V. , Vadcard, Dubois, & Mufti-Alchawafa, 2006) et (Larrieu, Vadcard, & Luengo, 2005)] dans la Figure 46.



Cas d'étude limitations au décollage d'un avion de ligne

Identifiants Problèmes	VD	Piste									Segments	Obstacle			
		Longueur		Prolongement			Etat			Limitative	Limitatifs	Existence	Distance		Limita
		longue	courte	aucun	d'arrêt	dégagé	sèche	mouillée	contaminée				proche	éloigné	
PB1		X		X			X				X				
PB2			X	X			X			X	X				
PB3		X		X			X					X	X		X
PB4		X		X			X					X		X	X
PB5			X	X			X			X		X		X	X
PV1			X	X			X			X					
PV2			X		X		X			X					
PV3			X			X	X			X					
PV4			X			X	X			X		X	X		X
PC1		X		X			X					X		X	
PC2		X		X			X					X	X		X
PC		X		X			X					X		X	
PCont1		X		X					X	X					

Variables didactiques liées aux limitations au décollage d'un avion de ligne



Cas d'étude vissage sacro-iliaque

	VD	PA	PB	PC	PD	PE	PF	PG	PH
3	**type fracture**								
4	fracture sacrum (FS)		X	X		X		X	X
5	disjonction pure (DP)	X			X		X		
6	**qualité os**								
7	dense (HD)								
8	normal (ND)	X	X	X	X			X	X
9	peu dense (LD)					X	X		
10	**repères cutanés**								
11	projection sacrum (PS)	X	X	X	X	X	X	X	X
12	crête iliaque/fémur (CIF)								
13	zones anat critiques (ZAC)								
14	**énoncé**								
15	déterminer (DT)	X	X			X	X	X	X
16	valider (VT)			X	X				
17	**qualité inlet**								
18	bon (BI)	X	X	X	X	X	X	X	X
19	mauvais (MI)								
20	**qualité outlet**								
21	bon (BO)	X	X	X	X	X	X	X	
22	mauvais (MO)								X
23	**qualité profil**								
24	bon (BP)	X	X	X	X	X	X		X
25	mauvais (MP)							X	
26	**qualité face**								
27	bon (BF)	X	X	X	X	X	X	X	X
28	mauvais (MF)								

Variables didactiques liées au vissage sacro-iliaque

Figure 46 Exemples de variables didactiques dans des situations d'apprentissage en formation professionnelle

Ici il faut souligner que toute variable d'un problème n'est pas une variable didactique. En effet, le changement de certaines variables n'aura pas de répercussion sur la stratégie de la résolution. Dans le cas des limitations au décollage que nous avons étudiées pour la formation des pilotes, nous pouvons voir que l'avion n'est pas, par exemple, une variable didactique, même s'il fait partie des variables du problème.

VARIABLES MISES EN JEU DANS LES SITUATIONS

Objet	Caractéristique	Valeurs possibles
Piste	-Longueur TORA (m), -Largeur fixe (45 m) -Numéro	-de 1000 à 5000 m, -=45m -5 alpha numériques, (entiers de 01 à 36 peut -être suivi de L, C ou R +1 lettre 1 chiffre)
Obstacle	-Distance par rapport au seuil de piste (m), -Hauteur (m)	-de 1100<D<20000 m -0<H<500 m
Vitesse	-V_1 (kt : 1 Kt=1.852 km/h) -V_r (kt) -V_2 (kt) -V_T (Kt) ou V_{FTO}	-de 90<V1<140, -$V_r \geq V_1$, (max 150) - $V_2>V_r$ (max 160) - $V_T>V_2$ (max 190)
Pente	-Pente deuxième segment (en %) -Pente segment final (en %) --Longueur du pallier d'accélération = 800 m	-0 à 15 % -0 à 15 % -= 800 m
Masse	-Masse au décollage (Kg) -Masse limite au décollage (Kg) (mini de masse look piste, pentes, obstacle) -Masse prévue de décollage (Kg)	de 16000à 29000 kg
Température	En degré Celcius	de 5 à 40 °C
Altitude	En pieds (ft : 1000 ft=300m)	de 0 à 3000 ft
Distances	-ASDA distance accélération-arrêt disponible (en m : ici ASDA = TORA) -ASDR distance accélération-arrêt requise pour l'avion (en m : à la masse de décollage) -TORA Longueur de piste disponible pour décoller (en m) -TODA Distance de décollage disponible (en m : passage des 35 ft au seuil de piste) -TORR Distance de roulement au décollage nécessaire (en m : à la masse de décollage) -TODR Distance de décollage nécessaire pour décoller (en m : à la masse de décollage)	de 1000 à 5000 m

Paramètres variables (subit) en fonction de la masse, température et altitude

Paramètre variable par l'utilisateur qui conditionne les variables subies

Figure 47 Variables didactiques dans les limitations au décollage d'un avion de ligne (Larrieu, 2005)

En ce qui concerne l'ingénierie didactique, dans nos travaux autour de l'enseignement en électricité, et grâce au support du réseau d'excellence kaleidoscope, nous avons proposé le parcours *AppElec* (Adam, et al., 2006). Il propose, entre autres, une activité articulant plusieurs types de ressources et de problèmes. Ce parcours vise donc à faire travailler l'apprenant selon une démarche scientifique explicite face à une situation donnée : émission d'une prévision (hypothèse a priori), expérimentation, confrontation au phénomène électrique observé, réflexion et conclusion. Dans un premier temps l'apprenant va devoir observer les images des deux circuits (ne différant que par la place de la résistance R0 de la Figure 48) et prendre position : le changement de place de la résistance influe-t-il sur l'intensité mesurée par les ampèremètres et pourquoi. Cette question est liée au fait que, dans un circuit en série, l'intensité est en tout point identique et que l'ordre des dipôles n'a donc pas d'importance, sauf dans le cas où le changement a lieu hors de la branche principale. L'apprenant est ainsi conduit à élaborer une hypothèse qu'il exprime à travers les réponses données à des QCM et par la rédaction d'une justification.

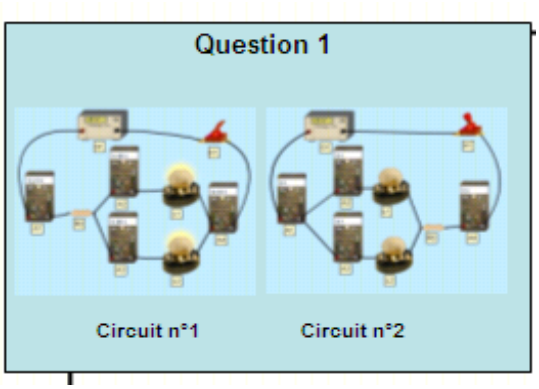


Figure 48 Exemple d'exercice du scénario AppElec

Dans un second temps, l'élève va manipuler les circuits proposés dans le micromonde TPElec, puis à l'aide des valeurs affichées sur les ampèremètres, il va pouvoir observer quel est l'impact réel du changement de place de la résistance. Le parcours prévoit de lui rappeler les prévisions qu'il a fait précédemment puis de lui demander de confronter celles-ci au regard de la simulation et de conclure.

Dans cet exemple, nous pouvons voir des situations d'action (sur le micromonde TPElec), des situations de formulation (par les questions proposées et les confrontations) et des situations de validation (par la demande explicite de valider et d'argumenter la conclusion). Les variables didactiques (le type de circuit, la disposition des résistances) vont aussi permettre de caractériser le problème, les conceptions ciblées (usure du courant et raisonnement séquentiel) et de calculer la rétroaction (grâce à des règles de navigation) pour, par exemple, proposer un autre problème.

Dans ce cas, l'orchestration des systèmes informatiques et des problèmes est guidée par l'ingénierie didactique. Cette ingénierie construite à partir des analyses préalables en didactique de la physique, et en collaboration avec des enseignants de physique[7], cherche à proposer à l'apprenant un milieu d'apprentissage organisé autour ds situations d'action, de formulation et de validation, avec des systèmes informatiques et des rétroactions adaptés à ces situations.

Nous avons entrepris la même démarche dans le projet des pilotes de ligne. C'est par l'analyse didactique des connaissances (Larrieu, Vadcard, & Luengo, 2005) que nous avons ensuite (Sénéchal, 2006) proposé un parcours de problèmes liées aux situations et qui a orchestré la conception des environnements informatiques, leurs rétroactions, leur mise en relation et leur organisation en tant que milieu d'apprentissage.

2. Orchestration pour la production de parcours guidé par la connaissance

Du point de vue didactique, Trouche (2003), en se référèrent à l'orchestration instrumentale, propose la définition d'un dispositif d'exploitation didactique comme une suite finie de scénarios d'exploitation didactique. Un scénario d'exploitation didactique organise la mise en scène de situations données dans un environnement donné.

Il intègre donc de façon explicite la notion de situation, au sens de Brousseau, et la notion d'environnement, en faisant une référence explicite aux environnements informatiques vus comme des artefacts. Le scénario doit prendre en charge la gestion des artefacts : "*Un scénario d'exploitation didactique réalise la mise en scène d'une situation sur deux plans imbriqués. Il définit, intègre et coordonne : - les modes de gestion de la situation elle-même ; - les modes de gestion des artefacts."* (Trouche, 2003, p. 38).

Cette proposition prend en charge l'environnement informatique en tant qu'objet à l'intérieur des ingénieries didactiques. Par contre, ce travail didactique est plus centré sur des aspects méthodologiques que des formalisations nous permettant de calculer des orchestrations afin de proposer des parcours.

2.1. Les scénarios d'apprentissage

Dans le domaine de l'ingénierie pédagogique et de la scénarisation, il existe des recherches plus centrées sur des processus accompagnés d'outils de réification et de formalisation tels que les langages de scénarisation. Dans (Schneider, 2009), il y a une revue très complète de ces différents travaux.

En ce qui concerne les formalisations, le langage de modélisation pédagogique (EML) est defini comme *"[...] a semantic information model and binding, describing the content and process within a 'unit of learning' from a pedagogical perspective in order to support reuse and interoperability*" (Koper, 2002).

De façon générale, les EML de spécification, tels que IMS-LD (IMS-LD, 2009), LDL (Martel C. , Vignollet, Ferraris, David, & Lejeune, 2006) ou CPM (Laforcade, Nodenot, & Sallaberry, 2005), permettent d'organiser les activités d'enseignement sous forme de scénarios. Ces propositions sont donc centrées *activité*, qui peut être individuelle, coopérative ou collaborative. Elle spécifie, entre autres, le rôle des utilisateurs au sein de ces activités, puis les ressources nécessaires. Les ressources sont ici décrites par le type d'activité et non par le type de connaissance et de situation d'apprentissage auxquelles elles peuvent être associées.

[7] Grâce au soutient de l'INRP, nous collaborons avec des enseignants de collège et de lycée sur la conception des situations pour l'apprentissage de l'électricité et sur leur validation en classe.

"Le processus proposé pour ces EML, de type systémique (Dick et Carey 1990), consiste à produire des spécifications pédagogiques à partir d'une analyse des besoins et des buts d'apprentissage (Gagné, Briggs et al. 1988) puis à développer un support de diffusion (delivery) répondant à ces besoins d'apprentissage. La notion de scénario pédagogique permet de guider l'analyse des besoins et la conception des contenus pédagogiques, facilitant l'appropriation du langage de modélisation par des enseignants." (Nodenot, 2005, p. 49)

De la même manière, les recherches autour des méthodes d'ingénierie pédagogique sont centrées sur les processus de conception et de partage et cherchent à assister la tâche de description des scénarios pédagogiques, avec les mêmes caractéristiques proposées dans les modèles formels. Des méthodes très élaborées et structurées comme MISA et l'outil MOT aideront dans la tâche de la description de l'activité et des ressources.

Dans des recherches plus récentes et en ce qui concerne les outils et les méthodes, les travaux autour du projet Modales avec l'outil MAT (Tetchueng, Garlatti, & Laubé, 2009) et autour du modèle ISiS (Pernin, Emin, & Guéraud, 2009) avec l'outil ScenEdit (Emin, 2008) s'intéressent à l'expression dans les scénarios des dimensions didactiques.

En effet, l'objectif du projet Modales est centré sur des scénarios pour la résolution des problèmes et "*le processus de conception de l'EIAH et des scénarios est vu comme un problème pluridisciplinaire parce qu'il requiert l'intégration de différentes approches scientifiques de l'informatique, du domaine d'enseignement, de la didactique et des sciences humaines* " (Tetchueng, Garlatti, & Laubé, 2009, p. 34). Cependant, ce modèle et l'outil qui l'accompagne (dans sa version actuelle) s'inspirent des travaux en didactique de Chevalard (Chevalard, 1999) et vont reprendre le concept de tâches et techniques qu'il prône. De ce point de vue, qui est un point de vue institutionnel (l'école), le système interroge le savoir-faire et son organisation, mais il ne l'interroge pas vis-à-vis du sujet épistémique (ces conceptions).

Le modèle de scénario dans sa version complète permet de représenter différentes dimensions d'un scénario : les activités par le concept de tâche, la structure hiérarchique de tâche et sous tâche, l'articulation des tâches en utilisant plusieurs opérateurs (séquence, parallèle, alternative, itération), le contexte, l'apprenant, l'adaptation du parcours de formation par le sélection de méthode en fonction du contexte et de l'apprenant, etc." (Tetchueng, Garlatti, & Laubé, 2009, p. 45).

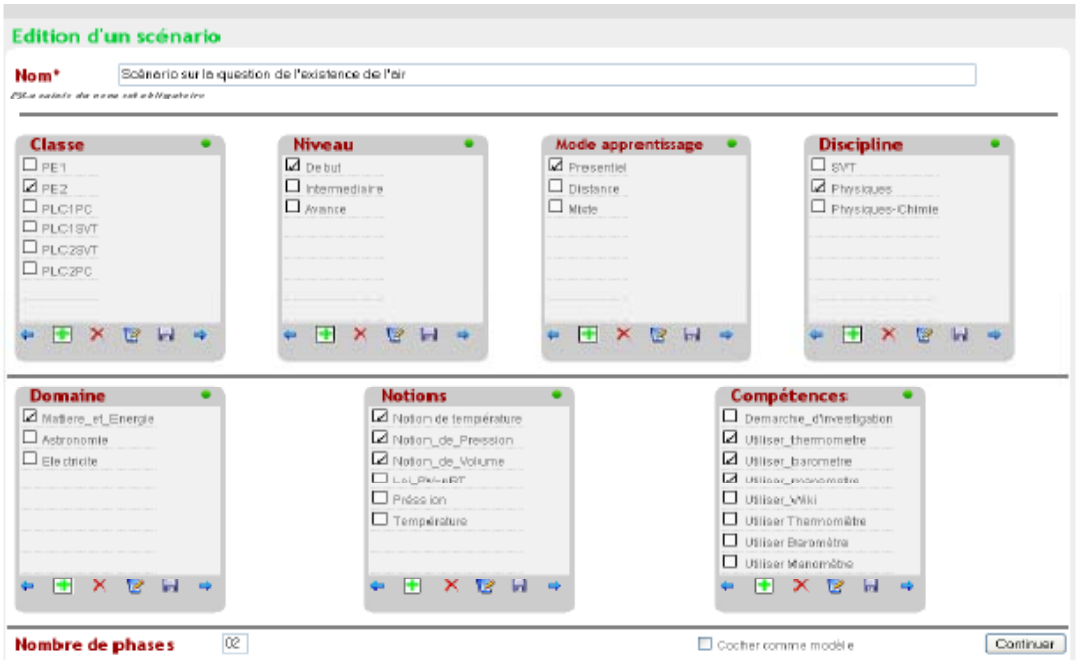


Figure 49. Copie d'écran d'une description d'une tâche de type scénario, reprise de (Tetchueng, Garlatti, & Laubé, 2009, p. 47)

Dans l'outil, dont un exemple est présenté dans la Figure 49, il est possible de spécifier le domaine, les notions et les compétences, mais il n'y a pas d'accès à une organisation structurée entre ces éléments de la connaissance de façon à pourvoir les analyser vis-à-vis du sujet épistémique.

Quant aux travaux autour du modèle ISiS (Intentions, Strategies, interactional Situations), ils cherchent à permettre : "*- d'exprimer dans des termes accessibles l'organisation et le déroulement du scénario ; - d'exprimer les intentions de l'enseignant-concepteur ; - d'utiliser différentes démarches de conception (imitation, instanciation, composition, patrons) ;"* (Pernin, Emin, & Guéraud, 2009, p. 15).

C'est au niveau des intentions que nous pouvons trouver les éléments pertinents vis-à-vis des connaissances : "*Le niveau I, qui permet de décrire les intentions du concepteur, est étroitement lié au contexte de connaissances qui définit l'ensemble des connaissances, compétences, habiletés, savoir-faire, savoir-être, etc. liés à l'unité d'apprentissage."* (Pernin, Emin, & Guéraud, 2009, p. 22).

L'intention sera formulée grâce à l'aide d'un quadruplet (formulateur, sujet, opération, objet) où l'objet représente la cible de l'intention, à savoir une connaissance, des compétences, des notions, etc.

Par exemple, dans le scénario présenté dans la Figure 50, et formulé avec l'outil ScénEdit, "l'intention principale du scénario est de déstabiliser une conception erronée couramment rencontrée : « la proximité du générateur joue sur l'intensité ». Nous exprimons cette intention d'ordre didactique sous la forme : l'*enseignant* (formulateur) souhaite que *l'étudiant* (sujet) *soit déstabilisé dans une conception erronée* (opération) portant sur *l'influence de la proximité du générateur sur l'intensité au sein d'un circuit électrique* (objet)." (Pernin, Emin, & Guéraud, 2009, p. 23).

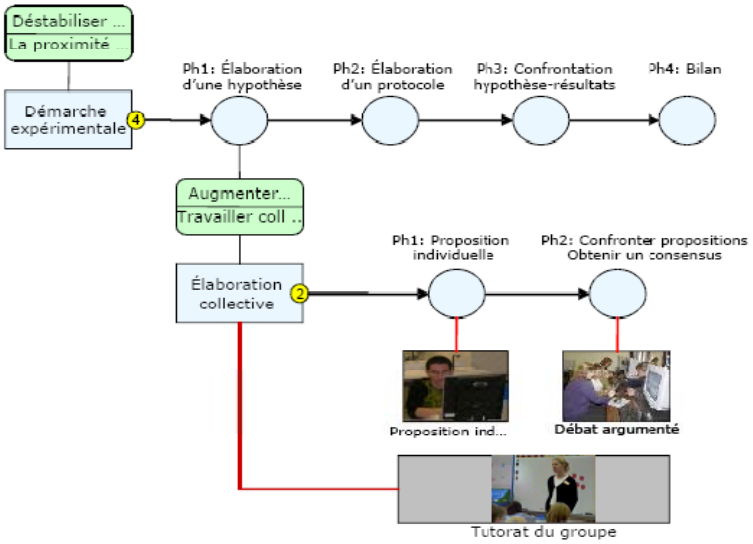


Figure 50. Exemple d'un scenario, LearnElec, construit avec ScenEdit. Image reprise de (Pernin, Emin, & Guéraud, 2009, p. 24)

Ici aussi, les connaissances explicitées qui sont en jeu n'auront pas nécessairement une organisation structurée et suffisamment détaillée afin de permettre le calcul des rétroactions épistémiques contraintes par la description de ces scénarios.

En outre, les travaux en général sur les scénarios pédagogiques ont pour vocation de donner les moyens de décrire des scénarios pédagogiques à l'humain, et cela avec plusieurs objectifs (Lejeune & Pernin, 2004) d'organisation entre les enseignants (spécification, partage, réutilisation, réflexion) ou de déploiement dans les plateformes.

Même si une des intentions concerne l'orchestration automatique des ressources et des interactions entre acteurs, l'hypothèse de base est que les scénarios doivent être décrits par les enseignants, ingénieurs pédagogues, etc... La conséquence est que, comme illustré précédemment, la structure des connaissances et leur agencement peuvent rester implicites ou, dans certains cas, dans une forme peu structurée, étant donné que l'intention n'est pas d'exploiter informatiquement ces informations mais de les utiliser comme des éléments de documentation du scénario. Or, dans notre cas, nous aurons besoin des ces informations pour pouvoir concevoir et calculer la rétroaction épistémique à partir des situations d'apprentissage.

Par conséquent, les informations dont nous avons besoin obligent le scénario à être formel, mais aussi à prendre en compte la contingence de la situation vis-à-vis du sujet et à être, du point de vue de

la spécification, contextuel (Lejeune & Pernin, 2004). Envisager que, pour chaque activité, il est nécessaire de déclarer manuellement les variables didactiques pour chaque problème semble une démarche peu réaliste. La spécification nécessaire pour le calcul de la rétroaction épistémique à travers des scénarios pédagogiques, guidées par la tâche, peut vite devenir fastidieuse et peu utilisable.

Les tuteurs intelligents, par leur nature, doivent prendre en compte ces dimensions. Des travaux récents, autour des tuteurs intelligents, cherchent à proposer des outils pour la conception de tuteurs cognitifs et en particulier l'orchestration des situations d'apprentissage. L'outil CTAT (the cognitive tutors authoring tools), par exemple, est proposé (Aleven, McLaren, Sewall, & Koedinger, 2006) pour pouvoir créer des tuteurs basés sur la méthode de traçage de modèles et la théorie ACT. Un ensemble d'outils est proposé afin de permettre au concepteur de spécifier une interface pour l'apprenant permettant la résolution d'un problème et la création de solutions au problème donné (avec des stratégies correctes et incorrectes) et offrant des règles de traçage avec des outils de débogage pour le modèle cognitif généré (Figure 51).

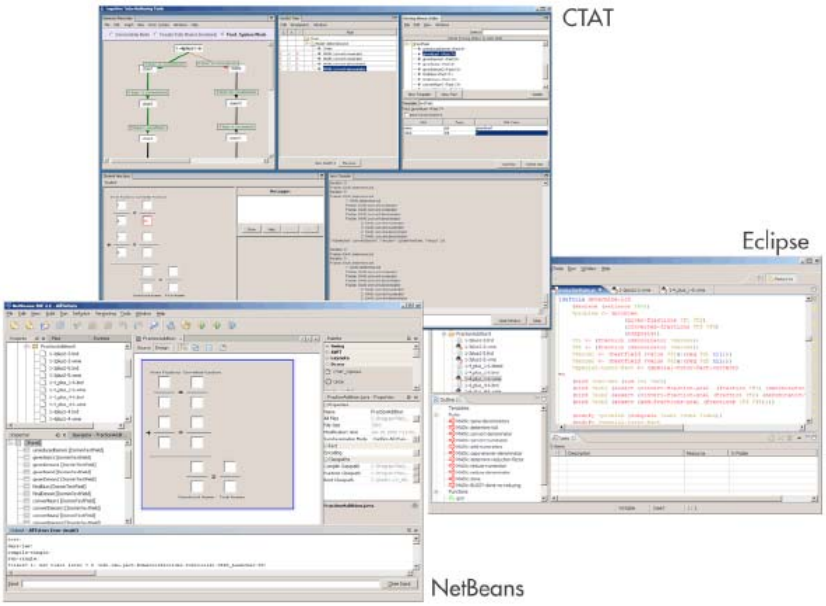


Figure 51 Plusieurs outils de l'environnement CTAP pour la conception des tuteurs cognitifs. Image prise de (Aleven, McLaren, Sewall, & Koedinger, 2006, p. 62)

A l'inverse des scénarios pédagogiques, ces outils sont centrés *connaissance*. Par contre, comme ces outils sont pensés pour un enseignement en particulier, ici la situation est implicite. De plus, c'est une conception dont la théorie d'apprentissage est embarquée et dont la rétroaction qui pourra se calculer sera celle construite plutôt à partir du modèle de l'apprenant (modèle que nous avons présenté dans le chapitre précédent) et non à partir de la situation.

2.2. La construction automatique des parcours, un problème de planification

Le problème de la création de parcours d'apprentissage automatique est, pour certains auteurs, un problème de type planification en intelligence artificielle. "*la planification est la tâche qui consiste à mettre au point une séquence d'actions permettant d'atteindre un but."* (Russell & Norvig, 2006, p. 421). En effet les rétroactions automatiques qui cherchent à construire des parcours, planifient leur chemin à partir des ressources dont ils disposent et des critères de navigation.

Le problème de planification ne sera pas le même selon les environnements qui sont observés. "*La planification classique est faite sur des environnements totalement observables, déterministes, finis, statiques (les changements n'interviennent que lorsque l'agent agit) et discrets (en termes de temps, d'actions, d'objets et d'effets). Par opposition, la planification non classique correspond aux environnements partiellement observables ou stochastiques*" (Russell & Norvig, 2006, p. 421).

Ainsi, dans les cas où le calcul du parcours est fait sur une description organisée de toutes les situations, tel que dans le cas des scénarios, cela peut être vu comme un problème de planification classique car l'environnement est totalement représenté. En effet, le scénario décrit complètement l'environnement et le problème est ici de trouver le chemin (parcours) à proposer à l'apprenant. Dans ce cas, le problème est de trouver les bonnes fonctions heuristiques pour explorer l'espace des situations et proposer des chemins optimaux sous forme de parcours. Ces fonctions heuristiques correspondent dans notre cas à des critères d'optimisation (optimisation du temps de parcours, par exemple), des critères liés aux connaissances en jeu (déstabiliser une procédure, renforcer une solution, augmenter ou diminuer la complexité du problème) et des situations d'apprentissage (proposer une situation d'action, de formulation, de validation..).

C'est aussi le cas des systèmes s'appuyant sur la théorie de la zone proximale de développement. Par exemple, il peut y avoir ici une représentation des situations organisées par le curriculum et un choix de sélection d'un nœud du curriculum vérifiant le critère « rester dans la zone proximale de développement du sujet » (Luckin & Du Boulay, 1999). Ici, comme la fonction heuristique doit vérifier le critère donné par la zone proximale de développement, le problème associé au curriculum doit donc rester dans la ZPD de l'apprenant.

Un autre exemple opérationnel de cette démarche est celui proposé par Murray et Arroyo (2002). Dans le logiciel proposé par les auteurs, Animal Watch, les problèmes sont organisés par le curriculum et adaptés à l'apprenant. En effet, le tuteur intelligent propose une variété de chemins construits à partir des curriculums et gardant le sujet dans la zone. De plus, des méthodes ont été développées pour mesurer la zone dans laquelle la tâche est trop difficile à réaliser sans assistance mais qui peut être réalisée avec un peu d'aide. Le critère, ou règle de parcours heuristique pour la réalisation du plan, est un critère aussi d'efficacité d'apprentissage car, selon les auteurs, les apprenants qui vont résoudre un problème dans leur ZPD vont démontrer de l'efficacité dans la résolution du problème et l'apprentissage sera effectif.

Il y a plusieurs formes de planification non classique : celles concernées par l'EIAH sont celles qui cherchent à traiter des environnements complexes en proposant une décomposition hiérarchique du problème ou celles qui proposent des méthodes pour planifier sur un monde incertain.

Un exemple en EIAH concernant les méthodes de décomposition hiérarchique, grâce aux réseaux hiérarchisés des tâches (HTN), est le travail de thèse d'Ullrich (2007) au sein du projet Active Math :

"A course generator dynamically generates a sequence of learning objects that supports a learner in achieving his learning goals. Most of the previous work on course generation employs very limited pedagogical knowledge to guide the assembling process—more often than not the knowledge is limited to using the prerequisite relation to collect and present all learning objects that the current content goal of the learner depends on. Despite the fact that over time learners may want to achieve different learning goals with respect to same domain concept, other course generators cannot generate different types of courses.

Furthermore, today learning objects are stored in a multitude of repositories. However, existing course generators can only access the resources stored in the repository they were developed for; they do not offer interfaces to easily connect additional repositories.

Last but not least, no existing course generators can be accessed from external learning environments; again, their functionality is restricted to the environment that they were developed for.

These observations led me to develop course generation based on Hierarchical Task Network planning (HTN planning). This course generation allows formalizing complex and realistic pedagogical knowledge."

Le HTN est une description de très haut niveau de ce qu'il faut faire, et les plans sont ensuite raffinés en appliquant des décompositions. Ce raffinement peut se faire dynamiquement en fonction des actions de l'utilisateur. C'est le cas du travail précédent : "*dynamic subgoal expansion selects the specific learning objects as late as possible, that is, when the learner wants to see them for the first time. As a result, the selection uses up-to-date information about the learner*." (Ullrich, 2007, p. 10).

La planification avec réseau hiérarchisé de tâches (HTN), tel que le système d'Active Math, permet aussi au système de prendre conseil auprès du concepteur du domaine sous la forme de règles.

Dans tous les cas, les règles de raffinement appliquées seront, en ce qui nous concerne, des règles liées aux critères tels que nous l'avons présenté préalablement (d'optimisation, de complétude,

d'objectif didactique). Dans le cas du travail de thèse d'Ullrich (2007, p. 54) les critères de raffinement sont liés, entre autres, à l'objectif d'apprentissage, au nombre de concepts associés à l'objectif d'apprentissage, au type de ressource à laquelle la tâche peut s'appliquer.

Ce type de solutions cherche à faire face à des problèmes d'adaptation à grande échelle (nombreuses ressources pour de nombreux utilisateurs), comme dans l'exemple du projet Active Math.

Une autre forme de planification non classique est celle qui est faite sur des environnements incertains. Dans le cas des EIAH, cela se réfère aux représentations où l'état de connaissance du sujet est pris en compte pour le calcul du parcours et cet état est représenté de façon incertaine (tel que présenté dans le chapitre précédent), ou lorsque les formes de connaissances associées aux situations sont aussi de nature empirique.

"*Dans un environnement incertain, un agent doit utiliser ses sens pour percevoir ce qui se passe pendant l'exécution du plan et, éventuellement, modifier ou remplacer celui-ci si un événement inattendu survient*" (Russell & Norvig, 2006, p. 483).

Ainsi, dans les cas des environnements informatiques d'apprentissage humain, le système doit être capable de réadapter ces plans en fonctions des résultats des analyses fait sur le déroulement de la situation.

Le système Cardiac Tutor (Eliot, Williams, & Woolf, 1996) est un bon exemple. Il planifie ces interactions d'apprentissage (ou parcours) dans un environnement incertain : "*Topics relacted to each simulation state were computed from the knowledge base [...]. Events within the simulation (including student-generated events) changed the simulation state, depending partially on the underlying probabilities of the simulation model and partially on an improbability factor determined by the high-priority topics likely to be renforced by each potential state (Eliot and Woolf, 1995). Altering the maximum-allowed improbability varied the simulation from being model-directed (driven by cardiac protocol domain statistics) to goal-directed (driven by student learning needs)*." (Woolf, 2009, p. 69).

Ici la planification est donc de type conditionnel. En effet, le système traite l'incertitude en construisant un plan conditionnel avec une incertitude bornée. Le plan d'interaction propose différentes branches pour les diverses éventualités qui peuvent se produire (Russell & Norvig, 2006, p. 482). De plus, dans le cas de Cardiac Tuteur, il y a deux types de plans bornés : l'un guidé par le domaine de la médecine (le plan est guidé par le protocole médical) et l'autre orienté objectif d'apprentissage. Les règles vérifieront les conditions et mettrons également le simulateur dans un certain état. Ces plans d'interaction vont modifier l'état du simulateur. Ici, il n'y a, par contre, pas de notion de problème, mais des états du simulateur.

Le travail de (Muldner & Conati, 2007), modélisant le plan de rétroaction pour proposer un problème à l'apprenant, utilise la théorie de la décision pour la planification dynamique. Le système cherche à aider l'apprenant à apprendre à partir de la résolution de problèmes par analogie, en proposant des exemples et des problèmes analogues aux exemples. Dans ce travail, la sélection d'un problème se fait en calculant d'abord la similarité entre chaque problème et l'exemple fourni à l'apprenant, puis en prédisant l'état de connaissance de l'apprenant dans le cas de l'envoi du problème. Enfin, le système sélectionne le problème qui maximise l'utilité du point de vue de l'apprentissage en se basant sur la prédiction de l'évolution de la maîtrise de l'apprenant pour chaque règle appartenant à ce problème : "*The framework incorporates an innovative example-selection mechanism, which tailors the choice of example to a given student so as to trigger studying behaviors that are known to foster learning. This involves a two-phase process based on 1) a probabilistic user model and 2) a decision-theoretic mechanism that selects the example with the highest overall utility or learning and problem-solving success."* (Muldner & Conati, 2007, p. 483).

Il y a donc une relation directe entre la complexification de la planification et le nombre de variables (connaissances en jeu, nombre de ressources, nombre de situations, etc..) à considérer.

Dans le cas d'Active Math où les ressources sont très différentes et les objectifs d'apprentissages très variés, il est nécessaire de garantir l'efficacité du parcours par des moyens tels que celui implanté dans ce projet (HTN). Dans ce cas, il est également nécessaire d'avoir des ressources possédant des modèles qui les décrivent (des ontologies par exemple). Dans le cas des environnements tels que les simulateurs et les micromondes, il est de plus nécessaire qu'ils soient paramétrables (pour pouvoir les configurer dans un état souhaité par la situation).

Dans le cas de la formation professionnelle, et pour des soucis d'industrialisation, les apprentissages sont beaucoup plus ciblés et certains auteurs proposent de concevoir des scénarios spécifiques qui guideront la conception de tout l'environnement : *"Effectiveness is increased when it is coupled with intelligent tutoring. Intelligent tutoring systems (ITS) improve on training simulations by assessing the trainee's actions and providing individualized guidance. Development of training simulators often lags behind development of the operational systems, with the result that simulators are often not available or up to date when they are most needed (e.g., when training operators on new or modified systems). Also, practical deployment of intelligent tutoring systems is hindered by the time and expense required to prepare the needed knowledge representations. We report on the development of tools to address both these issues. Three strategies enable rapid development. For both simulation and tutoring, the first strategy is to develop systems that are scenario-specific. This strategy permits the systems to be simpler and easier to develop. The second strategy is to employ easily manipulated representations for the simulation behavior and tutoring knowledge, and provide graphical user interfaces to edit these representations that facilitate development by training instructors with little outside support. The third strategy is to minimize the need for development. For simulation, this means maintaining a high degree of fidelity with little programming by incorporating screen captures of the operational system, and by enabling integration of existing simulation codes."* (Mohammed, Ong, & L., 2005, p. 2) .

Nous pouvons donc conclure que la création des rétroactions épistémiques à partir de situations d'apprentissage est reprise par certains auteurs comme une problématique de planification et que selon les contraintes du domaine, d'efficacité de déploiement, d'objectifs d'apprentissage couverts, etc.., les techniques de planification ne sont pas les mêmes et en seront plus ou moins complexes.

2.3. Nos travaux sur la construction des parcours

Concernant nos travaux sur le calcul des rétroactions permettant de parcourir un ensemble de problèmes, nous avons entrepris deux démarches : une première démarche qui consiste à décrire les parcours et qui a pour but de proposer des parcours adaptatifs mais statiques à partir d'une analyse didactique ; et une seconde démarche qui consiste à calculer des parcours automatiques statiques ou dynamiques (à la volée), et qui a pour but de proposer la prochaine situation d'apprentissage ou le prochain problème à partir de ceux qui sont disponibles dans le système.

2.3.1. Parcours décrits

Les parcours décrits sont des séquences spécifiées par des concepteurs. Nous pouvons parler aussi de *scénarios prédictifs* (scénarios établis a priori par un concepteur) tels que proposés par Lejeune et Pernin (Lejeune & Pernin, 2004), mais leur définition est plus large que celle qui nous intéresse car, comme nous l'avons indiqué préalablement, la scénarisation cherche à spécifier d'autres dimensions alors qu'ici nous privilégions une conception de parcours dirigée par l'analyse des connaissances en jeu vis-à-vis du sujet.

Dans le chapitre qui caractérise les rétroactions, nous avons présenté la différence, indiquée par (Brusilovsky et Peylo, 2003), entre les systèmes adaptatifs et les systèmes intelligents. Les parcours que nous présentons dans cette partie ne sont pas intelligents, étant donné qu'ils sont décrits par des concepteurs et qu'ils n'utilisent pas de techniques d'intelligence artificielle, mais ils sont adaptatifs.

Nous avons construit ces parcours avec l'objectif de dégager les critères qui interviennent lors d'une conception centrée *connaissances* et en se basant sur des analyses didactiques.

Dans une première étape, et dans le cadre des masters de Norma Medina (Medina, 2004) et de Sandra Michelet (Michelet, 2005) nous avons travaillé sur l'état de l'art en didactique à propose de l'apprentissage de l'électricité et réalisé des expérimentations sur des ingénieries didactiques en utilisant des simulateurs. Ensuite des parcours ont été proposés, dans le cadre du master (Michelet, 2005) et de la thèse de Sandra Michelet (Michelet, Adam, & Luengo, 2007), à partir des conceptions et des situations identifiées et du travail effectué avec les enseignants de collège et de lycée. Ces parcours ont été conçus pour des apprentissages autour de la loi d'ohm et des lois de Kirchhoff, avec l'objectif de s'adapter aux conceptions des apprenants.

Les parcours ont comme but de déstabiliser certains raisonnements tels que le raisonnement séquentiel et, selon l'apprenant, le parcours sera à difficulté croissante ou décroissante, comme dans l'exemple du scénario Appelec (Adam, et al., 2006), que nous avons introduit dans le chapitre 4 (§ 2.4.1), et dont nous avons décrit certaines situations plus haut (§1).

Dans l'exemple de la Figure 52, si l'élève ne répond pas correctement à la question, nous allons simplifier l'activité en lui proposant la question 4. Dans cette question, nous ramenons l'apprenant à un circuit en série où l'on a changé la position de la résistance afin de vérifier la maîtrise ou non de la loi disant que « l'intensité est égale en tout point d'un circuit en série ». Dans ce cas, les conceptions visées sont identiques à celle de la question 1. Cette question est suivie de la question 5 où l'apprenant est amené à vérifier, par manipulation dans le micromonde, les variables didactiques de la question 4.

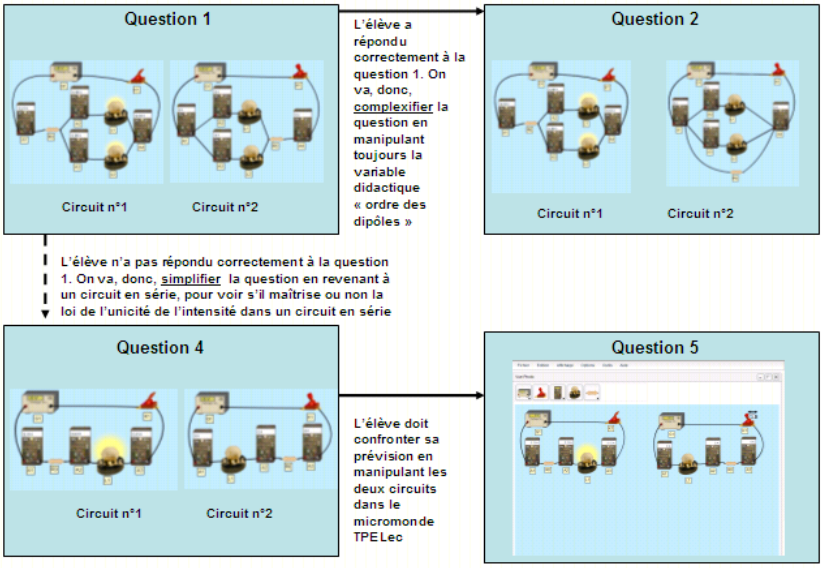


Figure 52, Exemple d'adaptation sur des dimensions didactiques en fonction de la réponse de l'élève.

Si l'élève répond correctement à la question 1, nous complexifions la question en lui proposant de résoudre la question 2. Dans cette question, nous changeons la position de la résistance afin de passer d'un circuit mixte (en série et en dérivation) à un circuit en dérivation. En effet, dans le circuit 1, la résistance se trouve dans la branche principale alors que dans le circuit 2 elle se trouve en dérivation. En plus des conceptions ciblées dans la question 1, cette question vis une autre conception qui est celle du générateur à courant constant.

Avec ce type de démarche, nous avons mis en place plusieurs parcours adaptatifs, mais statiques, comme celui présenté dans la Figure 53, où chaque problème à été proposé par rapport aux variables didactiques, aux types de situation (action, formulation ou validation) et au type d'environnement (simulation, questionnaire, formulaire). Ils sont adaptatifs parce qu'ils vont considérer les conceptions du sujet pour lui proposer un chemin plutôt qu'un autre. Par contre, les chemins possibles sont construits a priori et ne se modifient pas au cours de l'action du sujet.

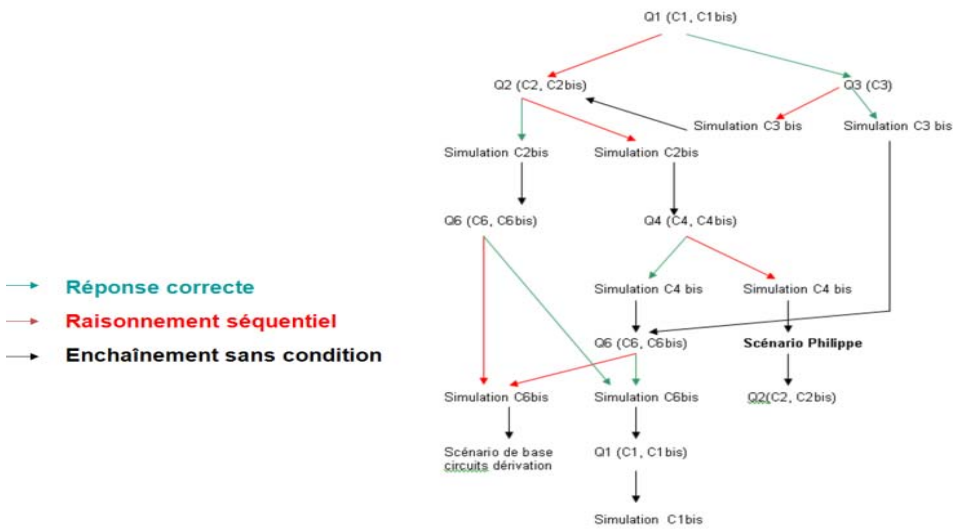


Figure 53 Partie d'un parcours adaptatif du scénario Appelec.

L'orchestration globale a été implantée avec le langage LDL (Learnin Design Langage), qui est un EML. Pour décrire un scénario, LDL propose sept concepts principaux que nous ne détaillerons pas ici. La description du modèle des scénarios se trouve dans (Martel C. , Vignollet, Ferraris, David, & Lejeune, 2006)

Ce langage a été principalement conçu pour orchestrer les interactions entre les élèves dans des activités collaboratives. Il structure donc les interactions entre les acteurs dans les EIAH à intégrer (nommés « enceintes » dans le langage LDL, pour signifier un lieu où se passent les interactions). Cela nécessite que chaque environnement (micromonde, QCM, etc..) soit encapsulé pour jouer le rôle d'enceinte dans le LDI (Learning Design Infrastructure) de la plateforme afin d'être exécutable et observable.

En ce qui concerne la conception de rétroaction, le concept le plus important est celui de la règle. En effet, c'est avec la formulation de règles que nous pourrons décrire les conditions permettant à l'apprenant d'accéder à des problèmes, des questions, etc… "*Elles sont exprimés sous la forme : si condition alors interaction*" (Martel C. , Vignollet, Ferraris, David, & Lejeune, 2006).

Cette règle s'exprime comme condition de démarrage du problème dans un environnement particulier (simulateur, questionnaire) ou *enceinte* dans le langage.

Par exemple (Figure 54), chaque fois que l'élève va répondre à une question, il va y avoir une interaction et cette interaction va se faire par le biais d'une enceinte (la question dans un questionnaire QTI par exemple). Pour chaque interaction, nous devons définir des conditions de démarrage et de fin.

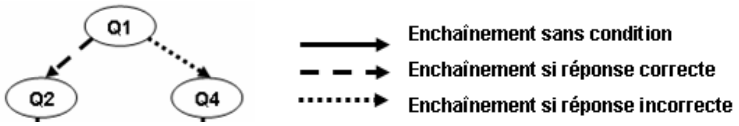


Figure 54 Extrait d'un scénario

Lorsque l'activité débute, l'apprenant va répondre à la question 1. Ainsi, nous avons assigné à cette interaction une condition de démarrage qui vaut toujours vraie. La question 1 se termine lorsque l'apprenant a répondu à tous les QCM et qu'il a fourni une justification (non vide) à ses réponses.

Le démarrage de la question 2 a une règle qui regarde les réponses de la question 1. Si l'élève a donné la réponse attendue à tous les QCM de la question 1, alors la question 2 est activée. Le démarrage de la question 4 a comme règle associée le fait qu'au moins une des réponses du QCM de la question 1 soit différente de celle attendue.

Dans le code suivant, nous pouvons voir une partie des conditions permettant de démarrer la question 3.

```
<action>question 3</action>
<dans>question3</dans>
- <destinateurs>
  <role>eleve</role>
</destinateurs>
<destinataires />
<results />
- <startOn>
  - <Rule id="question_3_commence">
    - <si>
      - <ExprConditionnelle>
          <exprCond>1Condition_q3_deb and 2Condition_q3_deb and 3Condition_q3_deb and 4Condition_q3_deb</exprCond>
        - <Condition id="1Condition_q3_deb">
            <laPosition>PR1-1</laPosition>
            <comp>equalTo</comp>
            <val>'ChoiceB'</val>
          </Condition>
        - <Condition id="2Condition_q3_deb">
            <laPosition>PR1-2</laPosit >: (aucun résultat)
            <comp>equalTo</comp>
            <val>'ChoiceB'</val>
          </Condition>
        - <Condition id="3Condition_q3_deb">
            <laPosition>PR1-3</laPosition>
            <comp>equalTo</comp>
            <val>'ChoiceB'</val>
          </Condition>
        - <Condition id="4Condition_q3_deb">
            <laPosition>PR1-4</laPosition>
            <comp>equalTo</comp>
            <val>'ChoiceB'</val>
```

Figure 55 Description d'une règle de démarrage d'une (Questions ou Enceinte) dans le scénario Appelec

Telle que présentée dans (Adam, et al., 2006) et (Adam, Michellet, Martel, David, & Guéreaud, 2007) l'opérationnalisation du scénario global sur l'environnement se réalise en attribuant les rôles prévus dans le scénario aux acteurs effectifs dans un contexte donné. Ainsi les traces effectives sont automatiquement attribuées aux acteurs qui réalisent l'activité planifiée. La conséquence de cette orchestration des activités par un scénario global est fondamentale sur la production des traces. En effet, même si chaque environnement de la plateforme peut produire des traces de façon indépendante, le scénario d'orchestration manipule des traces contextualisées par l'infrastructure mise en place, concernant l'utilisateur, la session, la date et l'activité en cours. Ainsi, au lieu de produire des traces pour chaque EIAH qui soient riches mais isolées, il est produit des traces dont l'ordonnancement temporel ajoute des informations capitales pour l'analyse globale de l'activité. Les traces de navigation dans le scénario global prennent leur sens par rapport au scénario lui-même.

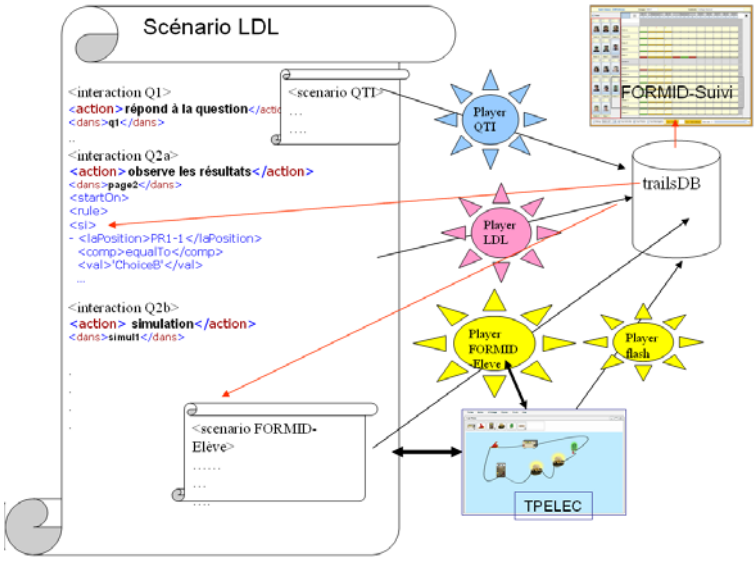


Figure 56 Articulation des différents scénarios et production de traces. Image propose par David Jean Pierre.

La Figure 56 illustre l'articulation des différents scénarios qui organisent et contrôlent l'activité de l'apprenant. Ces scénarios sont instanciés dans l'infrastructure LDI. Au moment de l'expérimentation, ils sont exécutés par des interprètes (« players ») propres à chaque type de scénario, en produisant des traces dans la base de données « trailsDB ». Ainsi le scénario d'orchestration est exécuté par le « player LDL » qui consulte des traces produites pour s'adapter aux réponses de chaque apprenant. Les questions sont elles-mêmes affichées par le « player QTI » qui enregistre les réponses dans la base de données. Lorsque l'apprenant agit sur le micromonde TPElec, la trace des manipulations est également enregistrée dans la base.

Le résultat permet donc d'avoir un environnement qui s'adapte aux actions de l'apprenant, comme le montrent les deux parcours de la Figure 57.

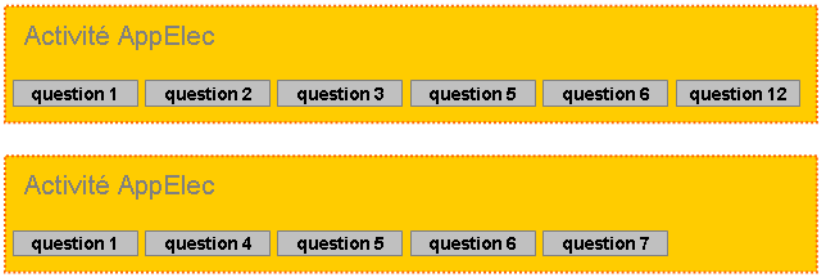


Figure 57 Vue d'écran de deux élèves ayant suivi des parcours différents

En conclusion, même si nous avons réussi à l'implanter, le faire jouer en classe et profité des traces organisées (par le temps et le contexte) grâce à plateforme, l'effort de spécification est trop lourd pour le type de conception souhaitée. En particulier, le niveau sémantique ne nous permet pas de spécifier des aspects tels que les variables didactiques des problèmes et le type de situation liée à la dimension épistémique.

Nous avons ainsi montré qu'il est possible de décrire des scénarios centrés connaissances à partir d'un langage de type EML. Ces scénarios s'adapteront facilement à une modification d'une activité ou d'une ressource. Cependant, une modification concernant les dimensions épistémiques entrainera la reconception et la réécriture complète des parcours. En effet, même si, pour chaque activité ou ensemble d'activités, ces langages proposent de spécifier certaines informations à propos des connaissances (pré-requis, connaissance visée), ils ne proposent ni mise en relation des connaissances en jeu ni leur association à des situations, ce qui permettrait de raisonner sur ces connaissances, par exemple en proposant des règles de navigation (liées aux connaissances) entre les situations. Ces langages ne permettent donc pas d'orchestrer le scénario par les connaissances.

2.3.2. Parcours génératif

Le principe des parcours génératifs, que nous avons créés, est de les produire à partir d'un ensemble de problèmes. Le parcours peut être généré automatiquement dans une étape initiale puis déployé dans l'environnement en restant ensuite statique lors de l'exécution. Le parcours peut être aussi généré à la volée en fonction des interactions avec l'utilisateur. Ici les parcours sont adaptatifs et intelligents, mais le premier est statique et le deuxième est dynamique du point de vue du calcul de la rétroaction. Dans tous nos cas, ces problèmes sont décrits par leurs variables didactiques.

Dans le cadre du projet de l'apprentissage de la laparoscopie avec des films issus du bloc opératoire, nous nous sommes intéressée à la conception des parcours basés sur l'analyse des problèmes.

Dans le simulateur initialement conçu par le docteur Messas (2006), les séquences vidéo sont organisées dans une base de données structurée, mais la structuration initiale était guidée par la notion d'organisation des séquences plutôt que par les éléments de connaissance qu'elles contiennent, même si on y trouve certaines indications. Le système est accompagné d'un système auteur qui permet de décrire certains éléments d'une séquence vidéo et de proposer une succession de séquences, avec des notions telles que les micro-modules et les macro-modules.

Le système auteur initial permettait d'une part de créer une question ou une explication et de l'associer à une vidéo (le couple est appelé micro-module), et d'autre part d'agencer les micro-modules (en associant une question à des explications) pour obtenir des macro-modules, puis d'agencer des macro-modules pour obtenir des parcours d'apprentissage.

Tel que présenté dans le chapitre 3, nous avons proposé un modèle permettant l'étude des vidéos guidée par les connaissances. Chaque séquence vidéo est découpée par temps opératoire, chaque temps opératoire étant un problème, et les séquences sont décrites par les valeurs des variables didactiques du problème.

La navigation au sein d'un macro-module (passage d'une question à plusieurs réponses liées à la question) inclut des rétroactions basées sur des dimensions liées aux connaissances, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 3 (p. 41).

Concernant la navigation entre macro-modules, nous avons spécifiés des règles de navigation qui prennent en compte la description des variables didactiques et la progression guidée par le temps opératoire. Les séquences organisent les problèmes par leur temps opératoire et, au sein de chaque temps opératoire, les sous-séquences organisent les problèmes par rapport aux variables didactiques identifiées. Ici, la granularité du parcours est guidée par ses règles.

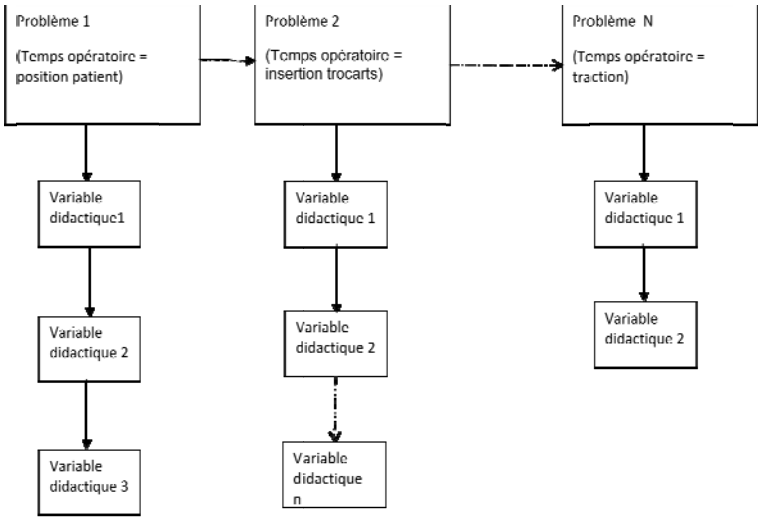


Figure 58. Exemple de parcours guidé par le temps opératoire et les variables didactiques. Image reprise de (Mameli, 2008)

Dans la Figure 59, nous pouvons voir une partie du parcours au sein du problème où le temps opératoire est la traction d'un organe.

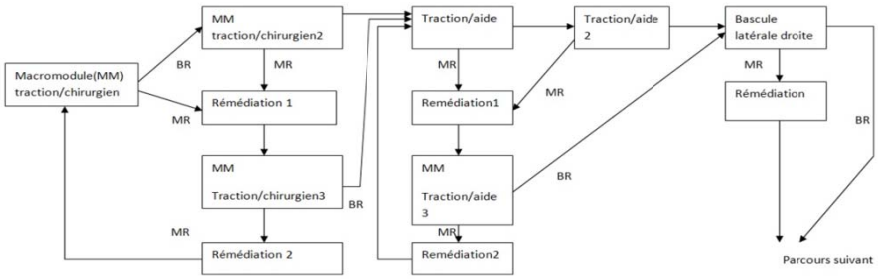


Figure 59, Exemple d'une partie d'un parcours du simulateur vidéo en laparoscopie

Comme toutes les vidéos sont indexées, nous pourrions créer le parcours à la volée. Mais dans le cadre du prototype en chirurgie aortique laparoscopique (Mameli, Luengo, Cau, & Mesas, 2009), nous avons décidé de les construire à partir des règles de navigation, évoqués préalablement, et de les proposer à l'exécution de façon statique afin de garantir certaines conditions liées au temps de parcours et à sa complétude. Par exemple, pendant la création du parcours, il était nécessaire de vérifier qu'il existait la séquence vidéo correspondante (avec le temps opératoire et la valeur de la variable didactique).

Nous avons également conçu des parcours génératifs (générés à la volée), où l'interaction est moins contrainte par rapport aux situations à suivre et plus guidée par l'espace des problèmes et par les actions de l'utilisateur. Dans ce cas, nous ne pouvons garantir ni l'efficacité vis-à-vis du temps, ni l'exhaustivité du parcours. Ici un problème est résolu et, en fonction du diagnostic, le système de rétroaction cherche le problème adéquat.

Dans le cas de notre projet TELEOS, et étant donné que le modèle de l'apprenant et le modèle de connaissance sur lequel peut se construire les parcours sont des modèles incertains, la planification

doit être une planification avec une incertitude bornée, comme dans les deux cas précédents. Mais la notion de but d'apprentissage n'est pas explicitement représentée dans notre modèle, ce qui ne permet pas de proposer des algorithmes qui construisent des parcours (incertains ou non). Par contre, le modèle utilisé peut permettre de représenter aisément cette notion afin de pouvoir faire ce type de calcul. En effet, puisque nous avons la notion de conception et celle de problèmes associés, nous pouvons avoir une conception cible et construire des parcours entre la conception diagnostiquée et la conception cible. Nous pouvons également appliquer le même raisonnement avec les contrôles.

Dans le projet actuel, nous travaillons essentiellement sur des connaissances très ciblées et des gestes très pointus. De ce fait, le principe de navigation est plus centré sur le choix d'une situation pertinente par rapport au contrôle que par rapport à un but d'apprentissage, qui est implicite dans la représentation du réseau de connaissance construit. Ici, il n'y a pas la prise en compte de contrainte pédagogique liée au temps d'apprentissage : la contrainte est épistémique, la rétroaction étant en effet dirigée par l'objectif épistémique (conforter, déstabiliser, valider) vis-à-vis de la situation et du sujet.

Nous avons développé cette dernière approche dans la thèse de Dima Mufti-Alchawafa (2008), qui s'est déroulée au sein du projet TELEOS. La thèse propose de considérer le réseau de connaissance initial et de proposer un algorithme qui permet de calculer la similarité entre deux problèmes.

Etant donné que les problèmes sont formalisés en fonction de variables didactiques, nous définissons une mesure de similarité entre deux problèmes par le nombre de variables didactiques qui ont les mêmes valeurs dans les deux problèmes. Dans l'exemple des familles de problèmes montrées dans le Tableau 10, où il y a trois variables didactiques (type de fracture, qualité os et énoncé), nous voyons que la famille PA et la famille PB ont deux valeurs similaires (celles des variables «qualité os » et « énoncé »), tandis que PA et PC ont une seule valeur similaire (celle de la variable « qualité os ») : cela signifie que PB est plus similaire à PA qu'à PC. Cette mesure est représentée par les valeurs des probabilités conditionnelles comme montrées dans la Figure 61.

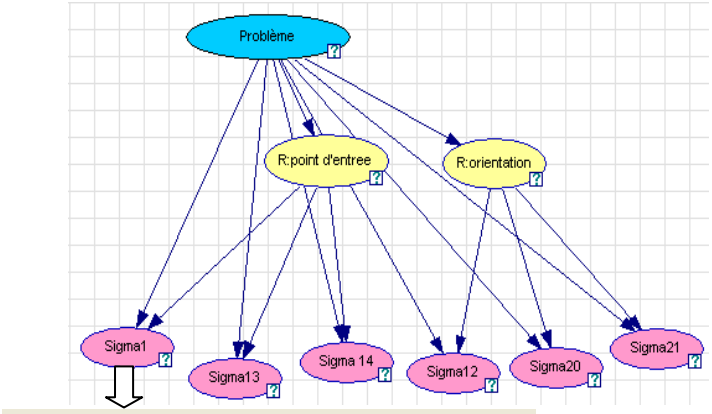
Tableau 10 Exemple de variables didactique s'une famille de problèmes.

Variables didactiques	Type de fracture		qualité os			Enoncé	
	fracture sacrum	Disjonction pure	Dense	normal	peu dense	déterminer	valider
PA		*		*		*	
PB	*			*		*	
PC	*			*			*
PD		*		*			*

Nous considérons que le système peut produire le tableau de probabilité conditionnelle pour le problème à produire en se basant sur la mesure de similarité et sur les problèmes modélisés sous forme de variables didactiques.

Pour illustrer ce calcul, nous avons repris l'explication donnée dans la thèse de Dima Mufti-Alchawafa (ibid. page 89) :

Du fait que les contrôles peuvent intervenir dans plusieurs problèmes, plusieurs problèmes peuvent alors être sélectionnés. Nous proposons d'effectuer le choix du problème le plus pertinent en nous basant sur le réseau bayésien de connaissances de référence.

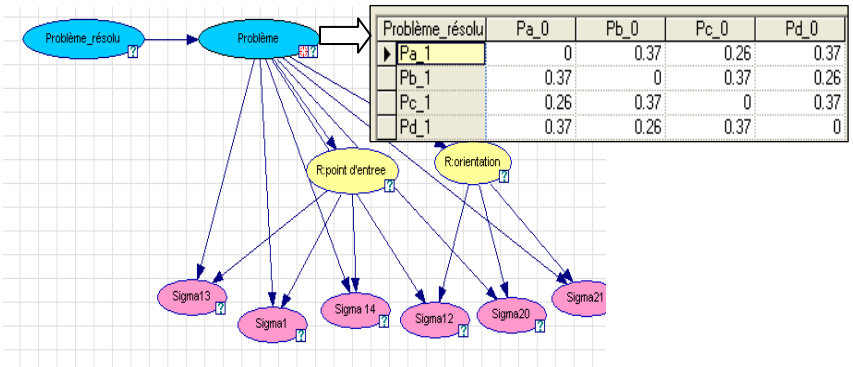


R:point d'entree	oui			
Problème	Pa	Pb	Pc	Pd
Valide	0	0.8	0.85	0
InValide	0.8	0.05	0.05	0.9
NintervientPas	0.2	0.15	0.1	0.1

Figure 60 Un exemple d'un tableau de probabilités conditionnelles pour le contrôle « $Sigma_1$ » dans le réseau de connaissances de référence

Dans le réseau de connaissances de référence, montré dans la Figure 60, les nœuds de type *contrôle* sont liés aux nœuds de problèmes et d'opérateurs par des relations de causalité. Chaque nœud de type contrôle peut avoir trois états : « intervient d'une manière valide », « intervient d'une manière invalide » et « n'intervient pas » indiquant si l'utilisation de ce contrôle lors de la résolution est valide par rapport au contexte du problème lié. Par exemple, pour l'opérateur « point d'entrée », les états correspondants à l'élément $Sigma_1$ « *Σ1 : si les repères cutanés tracés sont les projections du sacrum, alors le point d'entrée cutané se situe dans le quadrant dorso-crânial* » peuvent être comme dans le tableau de la Figure 60 dans lequel l'intervention du contrôle « $Sigma_1$ » est probablement valide pour les problèmes Pb et Pc et invalide pour les problèmes Pa et Pd. Nous tenons à préciser que les probabilités conditionnelles pour « $Sigma_1$ » montrées en bas de la Figure 60 sont définies à titre d'exemple. Cependant, ces valeurs seront calculées en se basant sur des méthodes d'apprentissage automatiques des paramètres dans les réseaux bayésiens à partir des données statistiques concernant l'utilisation des contrôles dans la résolution des problèmes.

De plus, pour effectuer le choix du problème, il faut aussi prendre en compte l'historique dans le but de produire un problème dont le contexte est similaire au problème résolu et en même temps éviter de reproduire des problèmes déjà résolus. Pour cela, nous ajoutons un nouveau nœud que nous appelons « le problème résolu » et nous le relions avec le nœud « problème ». La manière selon laquelle l'historique influence le choix du problème est définie par le tableau de probabilités conditionnelles du nœud problème, comme par exemple le tableau montré à droite de la Figure 61.



Problème_résolu	Pa_0	Pb_0	Pc_0	Pd_0
Pa_1	0	0.37	0.26	0.37
Pb_1	0.37	0	0.37	0.26
Pc_1	0.26	0.37	0	0.37
Pd_1	0.37	0.26	0.37	0

Figure 61 Exemple d'un réseau pour le choix d'un problème

Pa_0, Pb_0, Pc_0 et Pd_0 indiquent que les problèmes Pa, Pb, Pc et Pd ont été résolus au temps 0, et Pa_1, Pb_1, Pc_1 et Pd_1 indiquent les problèmes à produire au temps 1. Ainsi, dans ce tableau, nous trouvons par exemple que P(Pa_1=1|Pa_0 =1) = 0 : la probabilité de produire un problème (Pa_1=1) sachant que ce problème est déjà résolu (Pa_0=1) est nulle ; cela correspond à la formulation « il ne faut pas produire un problème déjà résolu». Nous voyons également que P(Pa_1=1| Pb_0=1) >

P(Pa_1=1| Pc_0=1) : la probabilité de produire un problème Pa_1 sachant que le problème Pb_0 est résolu est égale à « 0.37 », donc plus élevé que « 0.26 », cas où le problème résolu est Pc_0 ; cela correspond au fait « il est préférable de produire un problème dont le contexte est le plus similaire possible à celui du problème résolu ».

En fournissant au réseau de la Figure 61 les informations concernant la cible et son contexte d'utilisation envisagé, ainsi que les problèmes déjà résolus, l'inférence dans ce réseau permet ensuite de calculer les probabilités a posteriori correspondant aux problèmes. Dans la Figure 62, par exemple, en précisant au réseau que la cible de rétroaction est « $Sigma_1$ », que le contexte envisagé de son utilisation est « valide », et que le problème résolu est « Pa_0 », l'inférence calcule ensuite les valeurs des probabilités correspondant à chaque problème. Nous voyons, dans cette figure, que les probabilités a posteriori dans le nœud « problème» désignent les problèmes Pb_1 et Pc_1 parce que « $Sigma_1$ » intervient d'une manière valide dans ces deux problèmes. De plus Pb a une probabilité plus élevée que Pc parce qu'il est plus similaire au problème Pa_0.

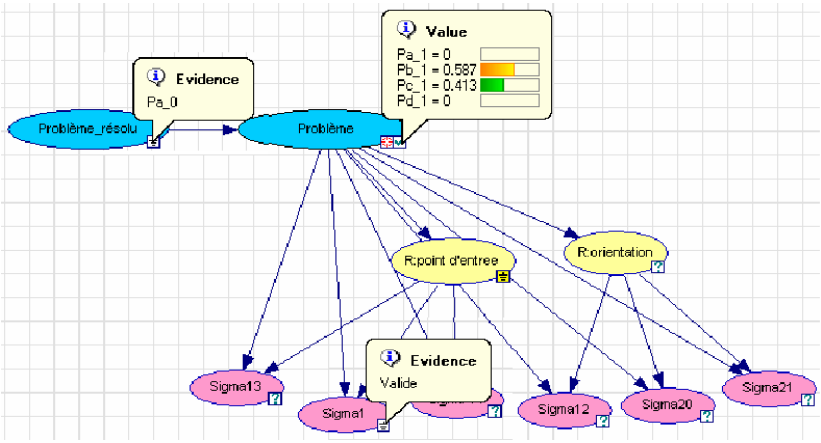


Figure 62 Un exemple de choix d'un autre problème à résoudre

Le système choisit alors le problème correspondant à la probabilité la plus élevée (Pb dans l'exemple) pour l'envoyer à l'apprenant comme rétroaction.

Dans la proposition précédente, issue de la thèse de Dima Mufti-Alchawafa (2008), les calculs sont guidés par la connaissance en jeu et l'objectif d'apprentissage (vérifier, renforcer, déstabiliser). Par exemple, un problème sélectionné pour vérifier l'état de connaissance de l'apprenant par rapport à une partie déclarative de la connaissance est différent de celui qui est sélectionné pour déstabiliser l'apprenant par rapport à une partie empirique de la connaissance.

Nous pouvons conclure ici qu'il est possible, avec les modèles que nous proposons, de calculer de façon dynamique des parcours d'apprentissage. En revanche, ces parcours dynamiques sont calculés par rapport à des critères épistémiques et non par rapport à des critères d'apprentissage d'une conception ou d'une connaissance cible. En d'autres mots, cette forme de calcul ne pourra pas garantir un parcours qui guiderait vers une connaissance cible.

3. Résultats liés aux situations d'apprentissages et au calcul des rétroactions

Nos premiers résultats sont liés à la modélisation des situations d'apprentissage, centrées *connaissances*, de façon à pouvoir ensuite élaborer des orchestrations de ces situations. La façon dont nous décrivons ces situations est la même pour tous les domaines auxquels nous nous sommes intéressés : électricité, décollage d'avions de ligne, laparoscopie urologique et cardiaque,

Nous avons également exploré plusieurs méthodes de production de parcours. La création des parcours centrés *connaissances* avec des langages de scénarisation pédagogique (ou EML) s'est avéré possible mais peu flexible et peu utilisable pour nos besoins. Ces parcours ont été validés de façon empirique dans des classes de collège et lycée.

Nous avons aussi proposé la construction de parcours dynamiques basés sur des règles de navigation liées aux modèles (au sein d'une famille de problèmes des règles pour proposer le passage d'un contrôle à un autre, puis pour passer d'une famille de problèmes à une autre famille, de règles de passage d'une variable didactique à une autre). Ces parcours ont aussi été validés empiriquement auprès d'experts et de novices en chirurgie laparoscopique.

Enfin, nous avons conçu une méthode pour produire une rétroaction qui propose la résolution d'un problème à la volée. Cette méthode tient compte des conceptions du sujet épistémique et des situations existantes dans l'environnement. Les parcours construit avec cette méthode ont été uniquement validés par inspection.

Ces différents parcours ne répondent pas aux mêmes critères. En effet, dans le premier cas, les parcours ont été construits à partir d'une ingénierie didactique, construite a priori, de façon à cibler un type de conception. Dans le deuxième cas, l'objectif était la complétude des parcours vis-à-vis de variables didactiques et de conceptions prédéterminées. Enfin, le dernier type de parcours vise à s'adapter aux conceptions de l'apprenant de façon dynamique, mais ne tient pas compte de façon explicite de la conception ou des conceptions cibles.

Il semble donc nécessaire d'appliquer des techniques, telles que la technique de la planification (présentée plus haut), afin de dégager des heuristiques et des critères de parcours capables de raisonner sur un but (la connaissance ciblée) et sur des situations disponibles dans l'environnement.

En ce qui nous concerne, dans le cas du scénario Appelec, il est possible de proposer des fonctions heuristiques guidées par ce type de critères et qui permettraient de vérifier les règles d'enchaînement entre un problème et un autre puis de choisir le problème qui satisferait le mieux les contraintes (critères) choisi(e)s. Dans le cas du simulateur vidéo en chirurgie laparoscopique, tel qu'il a été implanté, l'environnement est également observable et déterministe, et les fonctions heuristiques implantées pour la navigation sont liées au protocole médical (règle de précédence dans les temps opératoires) et aux considérations des variables didactiques des situations (passer d'une variable didactique à une autre au sein d'une famille de problèmes).

Enfin, si nous tenions compte du sujet épistémique dans le calcul des parcours, il faut que le système de planification puisse prendre en compte l'incertitude. En effet, et tel que nous l'avons montré dans le chapitre 4, le modèle du sujet épistémique est, par nature, incertain.

4. Situations d'apprentissage et rétroaction épistémique, quelques perspectives

Les perspectives ici ont été en partie présentées dans le point précédent. En effet, une des pistes de recherche, qui semble correspondre aux contraintes de construction des parcours à partir des modèles épistémiques des situations d'apprentissage, est de combiner l'analyse de processus venant de l'ingénierie pédagogique et des systèmes d'information aux techniques d'intelligence artificielle et de la planification.

En ce qui nous concerne, deux aspects liés à cette piste de recherche sont envisageables actuellement. Le premier est lié à la dynamique au sein de l'équipe Metah autour de la création des scénarios et l'orchestration de situations d'apprentissage. Ainsi, par exemple, dans le cadre du réseau d'excellence STELAR, dont MeTAH est une équipe partenaire, un des challenges scientifiques est celui de l'orchestration des apprentissages. Dans ce cadre les questions posées sont les suivantes : *1) What is the role of the teacher/more knowledgeable other in orchestrating learning? 2) How can we design collaborative learning models with innovative technology in order to scaffold productive collaborative activities? 3) From the point of view of the learner what is the relationship between higher-order skills and learning of a particular knowledge domain?*

Cette dernière question concerne directement la question de la rétroaction épistémique et l'orchestration des situations d'apprentissage. Dans ce cadre, la perspective que nous envisageons est de travailler sur un couplage plus fort entre les scénarios pédagogiques et l'orchestration guidée par la situation d'apprentissage et l'ingénierie didactique, avec l'objectif de l'utilisabilité d'un tel processus et en cherchant à dégager des outils, modèles et algorithmes qui aideraient dans ce sens. Cela en faisant appel, par exemple, à des méthodes de planification en intelligence artificielle, que nous avons

évoquées dans le point précédent, mais aussi en assistant la tâche de l'ingénierie didactique, par des outils et méthodes centrés auteur en EIAH.

Le deuxième aspect est en rapport à notre projet en laparoscopie. En effet, dans ce cadre, nous pouvons disposer d'un nombre de données important et varié concernant la description des situations, ce qui n'est pas le cas de nos autres projets. Or, les concepteurs des parcours ont un réel besoin de modèles pour l'orchestration des parcours d'apprentissage avec les séquences vidéo. Ces deux points peuvent nous permettre, d'une part, de pouvoir tester un passage à l'échelle de nos modèles et, d'autre part, une validation d'abord par inspection, puis sur le terrain avec deux types d'utilisateurs, les concepteurs des parcours, puis les novices en chirurgie laparoscopique.

5. Bibliographie de nos travaux sur la situation d'apprentissage et le calcul de rétroactions

Adam JM., Michelet S. , Anastique PB., Luengo V., Gueraud V., David JP., Martel C. " A Web-based experimentation platform: an example of electricity learning experiment" *International Conference* ICL'2007 Interactive Computer Aided Learning, 26-28 Septembre 2007, Villach, Autriche.

Larrieu, S., Vadcard, L., & Luengo, V. (2005). Didactical approach for the design of a learning environment for airline pilots. *European Research Workshop on Understanding and Rethinking the Technology-mediated workplace* (p. 5). Liège, Belgium: NOE Kaleidoscope.

Mameli, A., Luengo, V., Cau, J., & Mesas, A. (2009). Méthodologie de conception d'un simulateur vidéo laparoscopique. De l'analyse des connaissances à la création des parcours d'apprentissage : Le cas de la chirurgie aortique. *Environnement Informatiques pour l'Apprentissage Humain* (pp. 319-326). Le Mans: INRP.

Medina, N. (2004). *Simulations, Scénarios et Gestion des Connaissances en électricité.* Grenoble: Master 2, Environnements informatique pour l'apprentissage humain.

Michelet S., Luengo V, Adam J.M., (2006) "Un questionnaire dynamique pour le suivi et l'analyse de l'activité et des productions d'élèves en électricité" Actes du Colloque International JOCAIR'2006 Premières *Journées Communication et Apprentissage Instrumentés en Réseau*, pp. 421-434.

Michelet, S., Adam, J., & Luengo, V. (2007). Adaptive learning scenarios for detection of misconceptions about electricity and remediation. *International Journal of Emerging Technologies in Learning* .

Mufti-Alchawafa, D. (2008). *Modélisation et représentation de la connaissance pour la conception d'un système décisionnel dans un environnement informatique d'apprentissage en chirurgie.* Grenoble: Université Joseph Fourier.

Ouazib, H. (2003). *Construction, expérimentation et évaluation des situations d'apprentissage à distance dans une plate-forme multi agents, appliquée à un simulateur de processeur.* Grenoble: Environnements Informatiques pour l'apprentissage Humain. Université Joseph Fourier.

Sénéchal, M. (2006). *Etudes de phénomènes d'apprentissage pour les pilotes de ligne.* Grenoble: Master 2 Information, Cognition et Apprentissage. Université Pierre Mendès France.

Sosnowski, S. (2002). *Modélisation de la production de TP de construction de.* Grenoble: Master des systèmes d'information. Université Joseph Fourier.

CHAPITRE VI

La prise de décisions didactiques

Comme nous l'avons constaté dans les chapitres précédents, la rétroaction épistémique se construit à partir de plusieurs modèles de connaissances : connaissance en jeu, connaissance de l'apprenant et connaissance des situations d'apprentissage. Ici, nous nous intéressons à la rétroaction qui associera ces modèles.

Dans la plupart des systèmes qui traitent la problématique de la rétroaction épistémique, tels que les tuteurs intelligents, le modèle de décision proprement dit est rarement découplé des autres modèles et il est souvent implicite :

Tutoring strategies specify how content is sequenced, what type of feedback to give, when and how to coach, explain, remediate, summarize, give a problem, etc. A variety of representational methods are used to model tutoring expertise, including procedures, plans, constraints, and rules. However, the vast majority of ITS authoring tools include a fixed, i.e. non-authorable, tutoring model. (Murray T. , 1999, p. 107).

Nous nous intéressons au modèle de prise de décision lui-même en cherchant à le découpler, du point de vue de l'architecture, des modèles épistémiques, tout en les considérants comme des facteurs à prendre en compte dans la prise de décisions. Autrement dit, nous construisons la décision à partir du modèle de connaissance en jeu, du modèle du sujet épistémique et du modèle de descriptions des situations. Ces différents modèles sont découplés, ce qui permet de les étudier séparément.

Nous soutenons aussi qu'il n'est pas utile de concevoir un modèle de rétroaction générique, mais qu'il est nécessaire de découpler le modèle de diagnostic du modèle de rétroaction afin de donner plus de flexibilité au système. Le modèle de rétroaction construit aura à considérer, dans sa conception et dans son calcul, l'ensemble des modèles épistémiques présents dans le système. Dans les analyses présentées préalablement, nous avions étudié la problématique en considérant un seul de ces modèles.

Ici, nous souhaitons étudier la problématique de la conception et du calcul de la rétroaction en tant que décision.

Choisir la meilleure stratégie pour la production des rétroactions épistémiques en considérant les informations provenant des différents modèles épistémiques sera pour nous une problématique de prise de décision didactique.

Le modèle de décisions didactiques sera le modèle intégrateur de toutes les formes de rétroaction considérées préalablement.

Nous allons donc introduire dans ce chapitre la notion de décision didactique pour ensuite présenter les modèles informatiques auxquels nous nous sommes intéressée, un résumé de nos résultats pour finir avec les perspectives liées à la prise de décisions didactiques.

1. Formes d'interaction basés sur le modèle de l'enseignant

La décision didactique est donc le processus qui permet de choisir la forme de rétroaction la plus appropriée en tenant compte des différents facteurs épistémiques tels que les connaissances en jeu et l'état de connaissance de l'apprenant. Pour analyser les différentes formes de décision, il faut donc s'intéresser à l'enseignant, ou tuteur, et aux différentes stratégies utilisées pour produire ce type de décision.

Dans le chapitre 4, nous avons traité les aspects liés aux théories d'apprentissage. Ici nous nous intéressons aux stratégies des enseignants, en particulier à l'identification des facteurs épistémiques qui permettent à l'enseignant de prendre une décision sur le type de rétroaction, puis au processus de production de cette rétroaction.

1.1. Stratégies d'enseignement dans les tuteurs intelligents

Comme présenté par Du Boulay et Luckin (2001) et ensuite pas Woolf (2009), les tuteurs intelligents conçoivent leurs stratégies d'enseignement à partir des modèles issus de l'analyse empirique réalisée sur des enseignants. Ces conceptions se basent sur des modèles génériques tels que le modèle socratique utilisé dans plusieurs déclinaisons [(Collins & Stevens, 1991) ou (Lepper, Woolverton, Mumme, & Gurtner, 1993)] ; ou elle se basent sur l'analyse de l'expertise de l'enseignant dans un domaine spécifique, tel que les analyses proposées par Heffernan et Koedinger (2002) concernant le tutorat en algèbre ou les travaux de Lajoie, Faremo, et Wiseman (2001) et Sharples et al. (1995) dans le domaine de la médecine.

Par ailleurs il existe des travaux qui analysent l'enseignant dans un domaine spécifique sans chercher à proposer un modèle automatique, tel que les analyses de Schoenfeld (1998) sur une série d'enseignements en mathématique afin d'identifier le rôle des croyances sur le contexte, les objectifs d'apprentissage et les connaissances sur le domaine qui interviennent dans la gestion de l'enseignement dans la classe, ou les travaux de (Leinhardt & Greeno, 1991) qui analysent les enseignants par leur niveau d'expertise dans l'enseignement en mathématiques.

Woolf ((Woolf, 2009, p. 95) synthétise les différents modèles de connaissance sur l'enseignement dans le cadre de la conception de tuteurs intelligents, et explique que les stratégies d'enseignement sont variées et sont choisies en fonction de plusieurs caractéristiques tels que les objectifs d'apprentissage et la tâche : *" They reason about learning objectives and tasks and match these to learning outcomes before they specify an intervention. They also adapt their responses based on instructional goal and learner characteristics to maximize the informative value of the feedback (Shute 2006) […] teachers take into consideration many more factors about teaching interventions [..] including content; informative aspects, [..], instructional factors [..], learning tasks [..], errors and obstacles"* (Woolf, 2009, p. 96).

1.2. Stratégies de tutorat en formation professionnelle

Si nous regardons de plus près le cas de la formation professionnelle, l'article de Lajoie, Faremo et Wiseman (2001) présente une analyse des stratégies de tuteurs en formation professionnelle avec l'objectif de concevoir un environnement informatique de type tuteur. Cette analyse a été réalisée sur des situations de type apprentissage à partir de problèmes (Problem based learning) dans le domaine de la médecine. Les situations ici font que deux types tutorat soient mis en ouvre : "*Students are exposed to both the tutor's cognitive models and those of peers who may demonstrate different stages of development. This type of community provides opportunities for peer tutoring as well as expert tutoring*". (Lajoie, Faremo, & Wiseman, 2001, p. 294)

Les auteurs ont ainsi identifié des méthodes classiques (de type tutor cognitif) d'instruction : "The instructor used classic cognitive apprenticeship methods to support student learning, including modelling (e.g. demonstrating how he would reason through some aspect of a case), scaffolding (providing enough support to assist a student to perform a step successfully), and fading assistance (decreasing the amount of explicit help provided over time)" (Lajoie, Faremo, & Wiseman, 2001, p. 298).

Enfin, à l'issue de l'étude, les auteurs énumèrent un ensemble de caractéristiques à prendre en compte dans la conception du tuteur informatique. A savoir : l'incorporation des méthodes cognitives telles que celles présentées plus haut (modelling, scaffolding, coaching, and fading); la possibilité de construire des ponts entre les cas particuliers et le cas général (du spécifique vers le général) ; l'inclusion des méthodes d'enseignement basés sur l'apprentissage à partir des problèmes (*supporting metacognition, prioritizing relevant information, providing explanations on-demand, encouraging collaborative learning communities, building conceptual models, and providing expert post-mortem analyses of the students' own problem-solving processes*) ; l'inclusion, pour chaque cas, d'un modèle d'expert compréhensible, c'est-à-dire capable d'expliquer son raisonnement ; et enfin, la nécessité d'adapter la rétroaction aux différents niveaux de connaissance des apprenants.

Les travaux de Sharples et al. (Sharples, du Boulay, Teather, Teather, Jeffery, & du Boulay, 1995) dans l'apprentissage en médecine, en particulier la radiologie, ont aussi dégagé des caractéristiques

pour la conception du tutorat dans le système informatique : "*These findings have implications for the design of training systems for professional skills and in particular for radiology. They suggest that a tutoring system should : base the training on cases derived from work practice; order the cases in a sequence that promotes understanding and retention; help the trainee to reflect on experience and to integrate general and situated knowledge for example by relating cases to general principles or reference material; assist the trainee to integrate fragmentary knowledge into more general, guiding schemas; provide support for developing expertise, with a fading of support and a movement from a teaching to a work support system; provide ways for the trainee to store, annotate and index cases for future reference. In radiology : assist the trainee to acquire structural schemas and to map images onto anatomical and pathological objects; help the trainee to make rapid, accurate judgements;"* .

1.3. La décision didactique

En France, et en ce qui concerne les travaux de prise de décision didactique et EIAH, la thèse de Salima Tahri (1993) propose de considérer deux types de décision qui participent de façon essentielle au fonctionnement de la séquence didactique : le diagnostic et la rétroaction (Tahri, 1993, p. 21). Pour analyser le processus de décision du tuteur, l'auteur a proposé un dispositif expérimental où deux enseignants doivent trouver un accord sur le diagnostic et le choix de la situation successeur à partir des activités de binômes d'élèves en géométrie.

Dans cette étude, Thari constate que les tuteurs humains ont des rapports complètements différents quand les apprenants sont en échec que lorsqu'ils réussissent. Quand les élèves étaient en situation de succès, l'activité du tuteur humain se rapportait essentiellement au choix d'un successeur à un problème qui vient d'être proposé. Ce choix se faisait en jouant sur les variables de la figure (Tahri, 1993, p. 176), i.e. les variables didactiques telles que nous les avons présentées dans le chapitre précédent.

Dans l'autre cas, où les apprenants sont en situation d'échec, les tuteurs emploient plusieurs stratégies : soit en proposant un autre problème plus simple (où on leur demande d'investir sur une des variables du problème précédent), soit en l'aidant à décomposer les problèmes en sous-problèmes, soit en lui montrant son erreur (par la manipulation de la figure), soit en leur donnant des indices sur l'action (en montrant des éléments du menu).

En conséquence, nous pouvons voir ici que les éléments décisionnels ne sont pas les mêmes selon le type d'information venant des différents modèles. En effet, le diagnostic de l'apprenant est un des éléments d'informations (situation d'échec ou non) qui régule la prise de décision. Dans le cas d'échec, la décision sera de plusieurs sortes, selon le type d'échec vis-à-vis des connaissances en jeu, alors que dans le cas de réussite, le critère de décision est plus centré sur la progression dans le parcours des situations.

Dans un travail plus récent (Lima & Tragalová, 2008) ont étudié la façon dont les enseignants prennent des décisions didactiques afin de faire avancer les élèves vers une connaissance visée, dans le cas présent les connaissances sur la symétrie orthogonale.

Ainsi, ce travail utilise comme cadre théorique la théorie des situations et les travaux de Margolinas (2002) qui proposent un cadre de structuration du travail de l'enseignant dans sa relation didactique.

- +3 Valeurs et conceptions sur l'enseignement/apprentissage
  projet éducatif: valeurs éducatives, conceptions de l'apprentissage et de l'enseignement
- +2 Construction du thème
  construction didactique globale dans lequel s'inscrit la leçon : notions à étudier et apprentissages à réaliser
- +1 Projet de leçon
  projet didactique spécifique pour la leçon observée: objectifs, planification du travail
- 0 Situation didactique
  réalisation de la leçon, interactions avec les élèves, prises de décision dans l'action
- -1 Observation de l'activité des élèves
  perception de l'activité des élèves, régulation du travail délégué aux élèves

Figure 63, niveaux de l'activité du professeur propose par Margolinas & Rivière (2005)

Tel qu'expliqué par Lima & Trgalová (2008), ces niveaux comprennent des moments dans la classe et en dehors de la classe, avec des moments didactiques et a-didactiques. Lima et Tragalová (Lima & Tragalová, 2008, p. 5) soulignent que ce n'est pas un modèle temporel mais plutôt un modèle structurel : "*qui préconise que le professeur occupe l'ensemble de ces niveaux tout au long de son activité, y compris au sein de la classe*".

Enfin, les auteurs présentent dans leur conclusion quelques éléments sur lesquels les professeurs fondent leurs décisions didactiques. « *Parmi ces éléments, nous avons repéré les connaissances des programmes scolaires, du fonctionnement des élèves, et notamment leurs connaissances des mathématiques et leurs conceptions de l'enseignement et de l'apprentissage. C'est à la lumière de ces connaissances que les professeurs ont réalisé le diagnostic des conceptions initiales des élèves et qu'ils ont fixé les conceptions cibles de leur projet d'enseignement.* » (ibid, 2008, p. 11).

La plupart des analyses et modèles présentés préalablement ont été réalisés dans le cadre d'un domaine d'apprentissage particulier (mathématique, médecine, etc.). Nous y retrouvons cependant des invariants et, en ce qui concerne le point de vue épistémique, nous pouvons voir que les connaissances de références, les informations sur les apprenants et le type de situations seront des facteurs de décision pour la prise de décision didactique.

1.3.1. Des facteurs à prendre en compte dans la décision

Du Boulay & Luckin (2001) résument les critiques des systèmes qui cherchent à modéliser les intentions de l'enseignant, dans la fin des années 80 et le début des années 90, de la façon suivante : *In summary, the criticisms above can be reduced to two major issues. First, tutoring systems have focused on too narrow a range of types of educational interaction, i.e. taking rather a teacher-centred view of the enterprise and not attempting a more learner-centred facilitating role. Second, even within a teacher-centred framework, most systems have adopted rather a narrow range of teaching tactics and strategies*. (Du Boulay & Luckin, 2001, p. 240).

Dans cet article, Du Boulay & Luckin reviennent sur ces questions pour montrer des progrès qui cherchent à surmonter les limites présentées préalablement à travers trois dimensions : la prise en compte des motivations (adding motivational competence), la considération de la difficulté et le degré d'assistance (judgement task and degree of assistance) et enfin le fait de rendre l'enseignant manifeste et crédible (making the teacher manifest and believable). "*We are also starting to see the emergence of systems that monitor the interactions amongst students while they learn in order to ensure that all parties play an effective role. A certain amount can be achieved here without the need for complex natural language processing techniques (see e.g., Soller, 2001)."* (Du Boulay & Luckin, 2001, p. 253).

Si nous regardons ces dimensions sous l'angle épistémique, celle qui nous concerne principalement est celle liée à la prise en considération de la difficulté et du degré d'assistance. Du Boulay & Luckin (ibid., p. 249) illustrent cet aspect avec le système Ecolab:

"The Ecolab can assist the child in several ways. First, it can offer 5 levels of graded help specific to the particular situation; second, the difficulty level of the activity itself can also be adjusted (activity differentiation). Finally, the definition of the domain itself allows topics to be addressed by the learner

at varying levels of complexity and (independently) using terminology of varying levels of abstractness."

Dans ce système, l'adaptation concerne le type d'aides et le type de situations proposées (qui comporte le type d'activité et sa difficulté). Cette adaptation sera calculée à partir du modèle de l'apprenant.

La décision didactique concernera le niveau d'adaptation épistémique. Elle aura comme source d'information le modèle de connaissance en jeu, le résultat du diagnostic (issu du modèle de l'apprenant) et le modèle des situations d'apprentissage.

Nous retrouvons ici également la notion de boucle où la perception et l'action sont des éléments clés. L'apprenant perçoit les informations proposées par l'environnement, il interprète et agit en conséquence, le système didactique perçoit ces actions et les interprète (produit un diagnostic) par rapport à certains facteurs tels que les connaissances en jeu et la situation d'apprentissage. Une décision didactique est mise en œuvre et, enfin, la production d'une rétroaction, qui agira sur les éléments de perception de l'utilisateur, sera proposée.

Ici deux aspects se dégagent du point de vue de la prise de décision et de la rétroaction. Le premier aspect est le fait qu'il soit nécessaire de décider quelles informations doivent être données à l'agent de décision (humain ou artificiel) afin qu'il puisse prendre la décision à propos de la rétroaction. Le second aspect concerne la construction de la rétroaction elle-même, une fois la décision prise.

2. Rétroaction épistémique et décision didactique

Nos travaux liés à cette partie ont porté sur deux directions. La première est celle d'assister la tâche de l'enseignant dans sa prise de décision en cherchant à lui proposer les informations pertinentes. La deuxième porte sur un modèle informatique de décision didactique.

2.1. Modèle d'instrumentation de l'enseignant (tuteur) pour la prise de décision

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de Fatoumata Diagne (2009), avec l'objectif d'intégrer différents points de vue de l'équipe sur l'activité de supervision du tuteur et le suivi à distance.

Ces travaux sont légèrement à la périphérie de nos recherches, mais quelques concepts qui y sont présentés nous semblent utiles à l'analyse des facteurs de décision employés par l'enseignant pour la production de rétroactions épistémiques.

Le premier concept qui nous intéresse est celui de la supervision. La supervision permet au tuteur d'avoir une perception de l'activité d'apprentissage et de prendre des décisions d'actions de régulation ou de remédiation sur cet apprentissage. Diagne (2009) identifie, à partir d'un état de l'art sur le tutorat, quatre rôles du tuteur permettant de réguler l'apprentissage : Social, pour maintenir la motivation des apprenants et l'unité des groupes dans le cadre d'un apprentissage collaboratif ; Pédagogique, pour fournir une aide dans l'organisation des apprentissages des apprenants et dans l'acquisition d'une méthode de travail ; Cognitif, pour fournir un support à l'apprenant dans son processus de compréhension des connaissances traitées ; Technique, pour fournir une aide lors de l'utilisation des moyens et outils informatiques.

Pour instrumenter le tuteur dans ces différents rôles, qui dans le cadre de ce travail est à distance, Diagne propose d'utiliser la notion d'indicateurs : "*La définition d'indicateurs d'analyse est une thématique en pleine expansion dans la recherche en EIAH. Au niveau international, des projets – Kaleidoscope ICALT (Dimitracopoulou 2004) et DPULS (David et al. 2005) -, ainsi que des rencontres - workshop on Educational Datamining (AIED 2007), workshop on usage analysis in learning Systems (AIED 2005), User Modelling 2007, etc.) – se sont intéressés au concept d'indicateur d'analyse d'interaction et en ont identifié un nombre important*" (Diagne, 2009, p. 19).

Elle a proposé de classer les indicateurs à partir des rôles du tuteur et a ainsi réalisé des expérimentations, dans le cadre du projet MATES du réseau Kaleidoscope, qui ont montré que, pour

l'activité de supervision, une variété d'indicateurs est nécessaire pour les différents rôles du tuteur, et qu'il est également difficile de prévoir à l'avance l'ensemble des indicateurs pertinents pour exercer tous les rôles.

Enfin, avec le constat que de nombreux indicateurs existent, et que l'implémentation de certains demandent des compétences très spécifiques, la proposition originale de cette thèse est celle de proposer une plateforme qui permettrait la réutilisation des indicateurs : "*L'introduction du concept de réutilisation des indicateurs comme paramètre de conception des environnements est un aspect nouveau qui pose des problèmes d'ordre architectural non négligeables. Fournir des capacités de réutilisation à un environnement de supervision, équivaut à permettre à l'ensemble des indicateurs, qui y sont réutilisés, de pouvoir utiliser les traces d'une nouvelle plateforme d'apprentissage. La définition de l'architecture de cet environnement, instrumentant la réutilisation des indicateurs, est un autre verrou que nous tenterons de lever dans ces travaux*". (Diagne, 2009)

La maquette implantée avait comme objectif, d'une part de permettre la capitalisation des indicateurs et, d'autre part, de permettre au tuteur de choisir les indicateurs pertinents selon la tâche de supervision, sans demander des compétences particulières à ce dernier type d'utilisateur : "*A la problématique de proposer les indicateurs nécessaires à chaque rôle de régulation du tuteur (pédagogique, social, cognitif, technique), certains environnements de supervision existants (Mostow et al. 2005, Harrer et al.2005, Merceron et Yacef 2004) peuvent répondre en laissant le tuteur définir les indicateurs de son choix. Cependant, la définition de ces indicateurs et leur interprétation s'avèrent difficiles. Elles nécessitent souvent des compétences en informatique qui ne sont pas forcément détenues par les tuteurs*" (Diagne, 2009).

De ce fait, l'un des soucis principaux de l'implémentation a été de proposer une architecture logicielle ouverte afin de faciliter l'ajout de nouveaux indicateurs sur différentes bases de traces : "*EM-AGIIR, implémentation de l'architecture multi-agent de supervision proposée, est un environnement qui permet de fournir des informations effectives sur l'activité des apprenants à partir des indicateurs réutilisables qui y sont intégrés. Il est indépendant des situations et scénarios d'apprentissage mis en place dans l'EIAH car étant un greffon associé à sa base de traces. EM-AGIIR est un environnement générique et adaptable à différentes bases de traces."* (Diagne & Luengo, 2008). Cette architecture est une réponse au besoin de personnalisation de l'activité du tuteur qui a été exprimé dans l'enquête réalisé dans le cadre de la thèse.

Nous pouvons donc inscrire ce travail dans le cadre de l'instrumentation de l'activité de l'enseignant correspondant au niveau d'observation de l'activité de l'élève du modèle de Margolinas présenté préalablement (Figure 63).

La limite de ce travail par rapport à la problématique qui nous intéresse ici est la suivante : la rétroaction épistémique est fournie à travers l'humain (l'enseignant ou l'expert), à partir des indicateurs proposés, mais les résultats préliminaires ne nous ont pas permis d'avancer sur les moyens nécessaires pour la production de la rétroaction. Cela est dû au fait que les expérimentations ont cherché à valider la notion de réutilisation des indicateurs en intégrant des indicateurs venant de la littérature, mais actuellement les validations auprès de véritables tuteurs en formation à distance ont été très limitées et peu significatives pour faire des analyses et pouvoir en tirer des conclusions.

2.2. Un modèle de décision didactique

Le modèle de décision qui a été proposé dans le travail de thèse Dima Mufti-Alchawafa (2008), et que nous avons présenté dans (Mufti-Alchawafa, Luengo, & Vadcard, 2007) et (Mufti-Alchawafa, Luengo, & Vadcard, 2008), a été appliqué dans le cadre du projet TELEOS 1. Ce modèle prend en compte des critères issus de l'analyse didactique pour produire une rétroaction épistémique en quatre étapes :

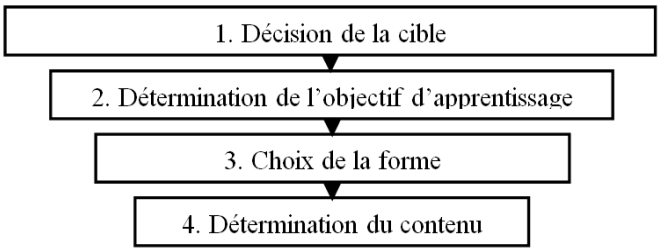


Figure 64 Etapes pour la production d'une rétroaction épistémique

Ainsi, dans la première étape, le système décide quel(s) élément(s) de connaissance sera(ont) ciblé(s) par la rétroaction. Puis, à partir de la connaissance ciblée, il détermine l'objectif d'apprentissage de la rétroaction. Ensuite, en fonction de la cible et de l'objectif, le système choisit une forme de rétroaction parmi les formes possibles dans l'environnement. Enfin, selon la forme choisie, le système formule la rétroaction en définissant son contenu.

Pour l'étape de la décision de la cible, nous faisons intervenir des éléments de décision venant du diagnostic de l'apprenant et du modèle de connaissance. Autrement dit, les facteurs qui influencent le choix de la cible sont l'état de l'élément de connaissance (résultat du diagnostic) et ses caractéristiques (issues du modèle de connaissance et du diagnostic). En effet, les caractéristiques identifiées sont le type d'élément de connaissance (déclaratif, empirique, …), l'ordre dans lequel cet élément intervient dans la résolution du problème, et la nature de l'élément dans la résolution du problème : "*L'élément peut intervenir soit dans le cas « général » du processus de résolution, comme par exemple lors du « choix du point d'entrée de la vis », « l'orientation de la vis », … ; soit dans un cas « particulier », comme par exemple « la correction d'une vis trop basse dans la radio inlet »*" (Mufti-Alchawafa, 2008, p. 76).

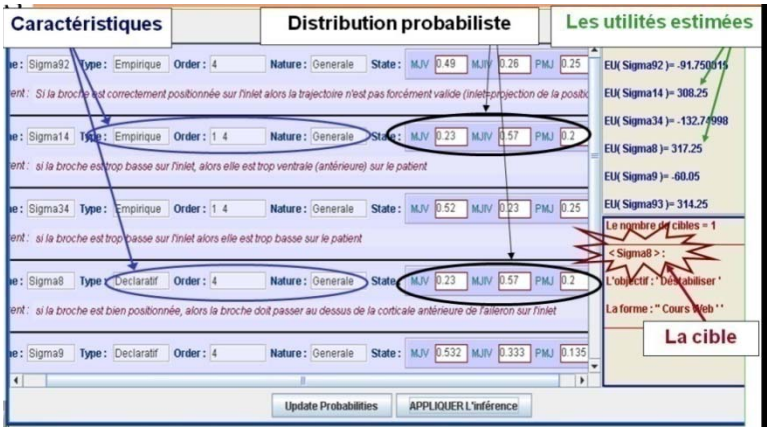
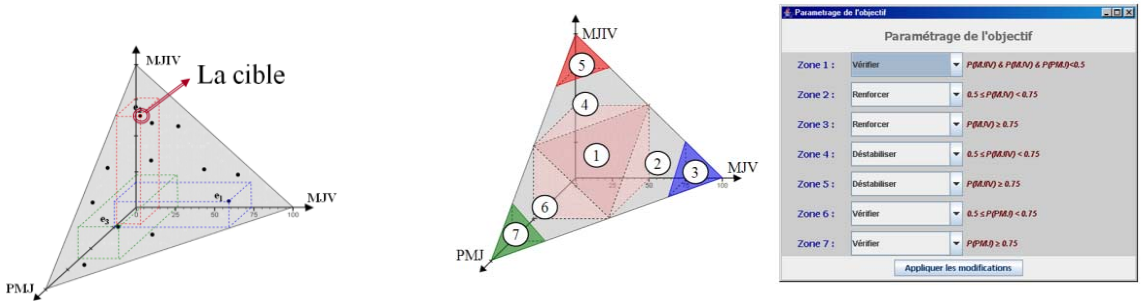


Figure 65 Interface de test pour le calcul de la cible

Comme nous pouvons voir dans la figure présentée ci-dessus, nous avons développé une interface de test qui nous permet de rentrer des simulations sur les diagnostics des apprenants (distribution probabiliste sur trois possibilités) et les caractéristiques des connaissances, pour ensuite estimer quel est l'élément, ou quels sont les éléments, de connaissance sur lequel/lesquels il est le plus utile de cibler la rétroaction. Ce système nous permet de pouvoir inspecter le modèle de prise de décision à partir des simulations des diagnostics. Etant donné que le modèle de décision sur la cible est paramétrable, nous avons également construit des interfaces de calibrage pour le calcul. Autrement dit, le calcul pour cibler l'élément de connaissance est basé sur des hypothèses didactiques qui peuvent être modifiées. Par exemple, concernant le type de connaissance, une hypothèse didactique qui peut être proposée est « *il est plus important de focaliser la rétroaction sur un élément déclaratif que de la focaliser sur un élément empirique* ». Concernant l'ordre, nous pouvons configurer le calcul pour qu'il respecte l'hypothèse didactique : *« il est plus important de focaliser la rétroaction sur un élément qui intervient dans les premières étapes du processus de résolution que de la focaliser sur un élément qui*

intervient dans une étape ultérieure ». Enfin, en ce qui concerne la nature, une hypothèse possible est : « *il est plus important de focaliser la rétroaction sur un élément qui apparaît dans le contexte général du processus de la résolution de problème que de la focaliser sur un élément qui apparaît dans un cas particulier*».

La détermination de l'objectif d'apprentissage se calcule en fonction de la position d'élément ciblé dans l'espace du diagnostic (partie gauche de la Figure 66) et de l'objectif de l'interaction déterminé (milieu de la Figure 66), objectif que Mufti-Alchawafa appelle « objectif d'apprentissage »). Les objectifs d'apprentissage peuvent se définir en segmentant l'espace en différentes zones. Ainsi, dans l'exemple, la cible est dans la zone 5 et l'objectif de l'interaction est de déstabiliser l'élément de connaissance.



Choix de la cible (étape 1)

la segmentation de l'espace de résultats du diagnostic en sept zones ; à droite, l'interface qui permet l'attribution des objectifs d'apprentissage à ces zones.

Figure 66 Détermination de l'objectif de l'interaction à partir de l'élément de connaissance ciblé

Ici aussi les choix sont paramétrables. En effet, nous avons développé l'interface de paramétrage (partie droite de la Figure 66) qui permet d'attribuer des objectifs d'apprentissage, dans l'exemple sept zones, représentant les segments de l'espace des possibles valeurs (milieu de la Figure 66), aux possibles valeurs des contrôles (mis en jeu valide, mis en jeu Invalide ou Pas mis en jeu).

L'étape 3, appelée le choix de la forme, concerne le modèle de situations avec les environnements associés. Le choix d'une forme adaptée de rétroaction se fait en fonction de son objectif (déstabiliser, vérifier, etc. des contrôles diagnostiqués), qui est déterminé dans l'étape 2, et des caractéristiques de la cible (si le contrôle est déclaratif, empirique , ...). Pour cela, Mufti-Alcahwafa a choisi de présenter ce choix sous forme d'un tableau indiquant la forme adaptée pour chaque objectif et chaque type possible. Les hypothèses didactiques concernant ce choix sont aussi paramétrables. Dans l'exemple du projet TELEOS avec la formulation des hypothèses didactiques, nous voyons que si l'objectif de la rétroaction est de « renforcer » la connaissance de l'apprenant par rapport à une partie « déclarative » de la connaissance, la situation la plus adaptée est celle de renforcement dans un environnement de type hypermédia. Aussi, si l'objectif est de déstabiliser une connaissance empirique, la situation d'action proposée utilisera l'environnement de type simulateur ou les cas cliniques.

Objectif :	Déstabiliser		Vérifier		Renforcer	
Type de la cible :	Déclarative	Empirique	Déclarative	Empirique	Déclarative	Empiriqu
Simulateur	☐	☑	☑	☑	☐	☐
Cours Web	☑	☐	☐	☐	☑	☐
Cas Clinique	☐	☑	☐	☐	☐	☑

Figure 67 Paramétrages du choix d'environnement à partir de l'objectif et des caractéristiques des connaissances ciblées.

Enfin, l'étape 4, concernant le choix du contenu, dépend principalement de la forme de la rétroaction afin de définir la manière dans laquelle il sera formulé. Par exemple, dans notre cadre d'étude, le contenu proposé se calcule pour la forme « Cours Web » par la recherche des pages pertinentes à consulter (tel que présenté dans le chapitre 3), pour le « Cas clinique » par l'identification

du cas adapté à illustrer, et pour le « Simulateur », par la définition du problème pertinent à résoudre avec le simulateur (tel que présenté dans le chapitre 5). Ici nous pouvons voir que des caractéristiques du modèle de connaissance et des situations interviennent dans le choix.

Comme montré préalablement, nous avons choisi dans la conception de ce modèle de rendre paramétrables les hypothèses didactiques (dont nous pouvons voir l'ensemble dans la Figure 68), bien que cela entraîne un calcul plus compliqué. Cet aspect rend d'une part notre modèle un peu plus générique et permet d'autre part de le valider du point de vue informatique sans avoir besoin de justifier les hypothèses didactiques. En outre, il donne plus de flexibilité aux experts (didacticiens) pour paramétrer ou modifier les hypothèses dans le modèle. Ce choix est particulièrement important dans le domaine médical, où les procédures évoluent assez rapidement au cours du temps.

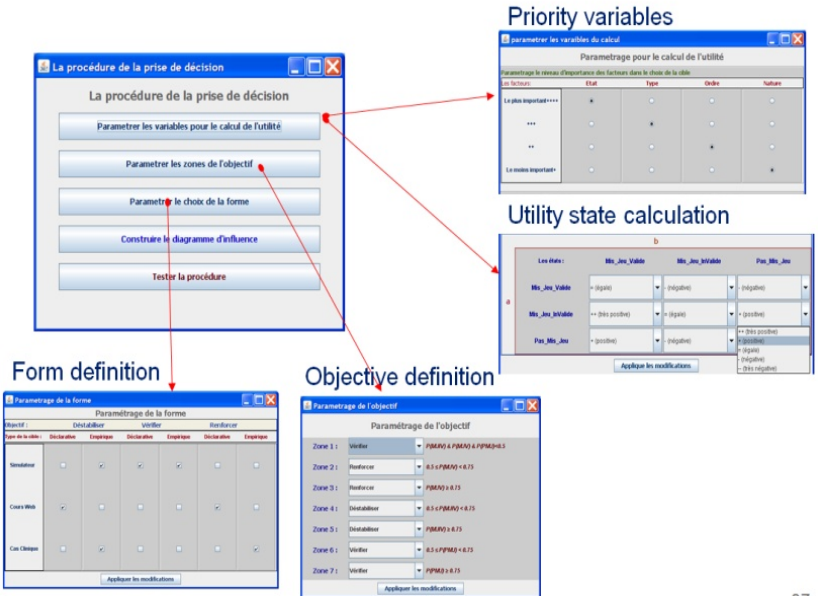


Figure 68 Interfaces de paramétrage du processus de décision pour le calcul de la rétroaction

Cette première proposition a donc été implantée et évaluée dans le cadre du projet TELEOS. L'aspect le plus étudié dans le cadre de la thèse de Dima Mufti-Alchawafa a été la première étape qui concerne le choix de la cible de la rétroaction.

Ce choix a été représenté sous la forme d'un diagramme d'influence prenant en compte les facteurs que nous avons décrits. Dans les validations mises en place, nous avons pu observer que la fonction d'utilité déterminée devrait être plus complexe que celle qui a été établie. *"Nous avons défini notre fonction d'utilité d'apprentissage en se basant sur l'hypothèse de l'indépendance entre les facteurs qui influencent la décision, pour cela elle est sous forme d'une expression additive. Cependant, lors du paramétrage de calcul par l'expert nous avons découvert l'existence d'une interdépendance entre les paramètres"* (Mufti-Alchawafa, 2008, p. 120) .

Les différentes validations appliquées au modèle nous ont permis de valider sa faisabilité, la sensibilité du modèle aux différentes informations qu'il reçoit en entrée, et la pertinence de la rétroaction par rapport aux scénarios étudiés.

Ces expérimentations nous ont montré également quelques limites. Par exemple, le modèle produit des rétroactions à partir d'un état donné de connaissance de l'apprenant sans prendre en compte l'historique des rétroactions déjà produites avec cet apprenant. Il est peut-être utile de rappeler ici que la dimension historique est prise en compte, au niveau du diagnostic, par l'évolution des valeurs des probabilités au fur et à mesure des actions de l'apprenant.

Par ailleurs ce modèle ne prend pas en compte la cible d'apprentissage dans la prise de décision, ni dans la construction de la rétroaction, puisqu'elle n'est pas explicitement représentée. En conséquence, comme nous l'avons analysé dans le chapitre 5, si l'espace des problèmes est grand, les parcours réalisés peuvent ne pas être optimaux.

3. Modèles informatiques pour la prise de décision et la rétroaction épistémique

Comme nous l'avons écrit dans les chapitres précédents, les modèles de connaissance considérés dans notre cadre de travail se représentent avec un degré d'incertitude sous forme de probabilités (modèle de l'apprenant et éventuellement modèle de connaissance). De ce fait, nous nous intéressons aux systèmes qui produisent des rétroactions basées sur un raisonnement et sur une prise de décision avec un degré d'incertitude.

Des modèles intelligents tels que les stratégies basées alternative ou diagnostic (Mayo & Mitrovic, 2001), que nous avons présentées dans le chapitre 2 (§ 3.2), sont utilisés pour produire des rétroactions basées sur des décisions, entre autres, didactiques. Un exemple de stratégie basée diagnostic est celui d'Ecolab présenté dans l'article de Du Boulay et Luckin (2001) et que nous avons étudié dans ce chapitre :

"The Ecolab uses a bayesian belief network model of the difficulty of transitions between nodes and the history of success and help required at previous nodes to decide: Which node in the curriculum will be tackled next (which level of complexity and which level of terminology abstraction). What level of help will be offered. How much activity differentiation will be offered to the child." (Du Boulay & Luckin, 2001).

Comme le présente (Russell & Norvig, 2006, p. 654), le principe de base de la théorie de la décision est la maximisation de l'utilité espérée. La nature de la fonction d'utilité est essentielle dans la modélisation car c'est elle qui permettra de prendre en compte les différents facteurs de la prise de décision et de les calibrer. L'utilité est définie comme une fonction qui fait correspondre des états à des nombres réels (Russell & Norvig, 2006, p. 658).

Par ailleurs, il existe quelques travaux récents dans le domaine de l'EIAH qui adoptent l'approche basée sur la théorie de la décision pour sélectionner ce que les auteurs appellent (Mayo & Mitrovic, 2001) « la prochaine action pédagogique du système ».

Pour proposer sa prochaine rétroaction dans CAPIT (Mayo & Mitrovic, 2001), qui est un environnement pour l'apprentissage de la ponctuation et de la capitalisation en anglais, le calcul de l'utilité se base sur le nombre d'erreurs faites par l'apprenant avec l'hypothèse pédagogique « qu'il faut donner à l'apprenant un problème un peu au–dessus de son niveau actuel, mais pas trop difficile pour ne pas le décourager » (Mayo & Mitrovic, 2001).

DT Tutor (Murray, VanLehn, & Mostow, 2004) est un autre exemple utilisant cette approche. Il propose une architecture indépendante du domaine. Le calcul de l'utilité estimée pour la sélection de la prochaine action du système est fonction de plusieurs facteurs liés à l'apprenant (connaissance, moral, indépendance, et attention). Le choix de la prochaine action dans DTutor se fait en deux phases : d'abord le choix du thème sur lequel l'action (le prochain problème) sera focalisée, puis le choix du type d'action (aide, message, rétroaction positive ou négative, …). Le système DT Tutor a été implémenté dans deux applications : « Résolution de problème de calcul » et « Tutoriel de lecture pour les enfants ».

Les connaissances dans CAPIT sont sous forme de connaissances correctes et incorrectes, et dans DT Tutor elles sont plutôt sous forme de plans de résolution. Du point de vue de l'utilité, DT Tutor se base sur plusieurs facteurs liés à l'apprenant pour choisir la prochaine action du tuteur, et CAPIT se base sur le nombre d'erreurs de l'apprenant pour produire la prochaine action.

Ainsi les décisions qui sont montrés dans ces systèmes sont fondamentalement pédagogiques, nous avons décidé d'explorer ces solutions en prenant en compte la spécificité des connaissances en jeu.

3.1. Notre modèle basé sur la théorie de la décision et les diagrammes d'influence

Pour pouvoir proposer un modèle de décision découplé des autres modèles, nous avons choisi l'approche basée sur la théorie de décisions. Ainsi que nous l'avons introduit dans le chapitre 2 (§ 3.2), c'est aussi une des formes intelligentes de rétroaction.

En définissant la fonction d'utilité, cette approche nous permet d'exprimer numériquement les hypothèses didactiques et pédagogiques qui représentent les préférences pour un choix de rétroaction

et de calculer ensuite la rétroaction la plus utile en fonction de l'état déduit de la connaissance de l'apprenant.

Dans le cas de la thèse de Dima Mufti-Alchawafa (2008), la fonction d'utilité est une fonction additive qui calcule l'utilité de chacun des facteurs identifiés pour le calcul de la décision est décrite ci-dessous :

" […] les facteurs qui influencent le choix de la cible sont : l'état de l'élément de connaissance et ses caractéristiques, qui sont dans notre cadre d'étude le type, l'ordre et la nature. A partir de ces facteurs, nous définissons « la fonction d'utilité d'apprentissage » comme dans l'équation suivante :

$$U_{app}(c,E)=\alpha\cdot U_{Etat}(c,e_1,e_2,\ldots e_n)+\beta\cdot U_{Type}(c)+\gamma\cdot U_{ordre}(c)+\delta\cdot U_{nature}(c)$$

L'utilité Uapp(c, E) de choisir un élément de connaissance comme cible c de rétroaction en prenant en compte l'ensemble E= {e_1, e_2,..., e_n} des éléments présents dans l'espace de connaissances, est la somme des utilités de chaque facteur influençant ce choix, pondérées par des coefficients : α, β, γ, et δ que nous appelons « les variables de priorité ». Étant donné que dans les premières analyses les facteurs état, type, ordre et nature sont apparus comme indépendants dans leurs influences, la fonction est additive.

Les facteurs n'influencent pas le choix de la même manière, ils n'ont donc pas le même poids. Les variables de priorité permettent de définir leurs poids, et ainsi de s'adapter aux choix pédagogiques et didactiques faits par les experts du domaine et par les didacticiens " (Mufti-Alchawafa, 2008).

Les différentes fonctions d'utilité utilisées dans ce travail sont décrites en détail dans (Mufti-Alchawafa, 2008) et (Mufti-Alchawafa, Luengo, & Vadcard, 2008).

Dans notre cas, il faut aussi prendre en compte la dimension didactique en intégrant les contraintes issues de la particularité de la connaissance mise en jeu dans l'apprentissage. Par exemple, ainsi que nous l'avons présenté dans le chapitre 3, une rétroaction qui vise des connaissances déclaratives est différente de celle qui vise des connaissances empiriques.

Ce sont donc des fonctions d'utilité multi attribut qui doivent être utilisées dans le cas de la prise de décision didactique.

En effet, la théorie de l'utilité multi attribut traite des utilités qui dépendent de plusieurs attributs d'états distincts (Russell & Norvig, 2006, p. 678) et, dans notre cas, la décision didactique dépend des états distincts venant des différents modèles épistémiques.

Quant à la représentation du modèle de décision, nous avons décidé d'utiliser les diagrammes d'influence puisque la prise de décision est également incertaine et des propositions comme les arbres de décision ne permettent pas de prendre en compte explicitement cette dimension.

Un diagramme d'influence utilise trois types de nœuds pour modéliser un problème de décision : 1) les nœuds de décisions, qui intègrent la liste des choix d'actions possibles ; 2) les événements observés avec incertitude ; et 3) les nœuds d'utilité, qui décrivent numériquement les utilités correspondant à chaque choix d'action possible en fonction de tous les états des observables qui influencent ce choix. Voici un exemple extrait de (Russell & Norvig, 2006, p. 669).

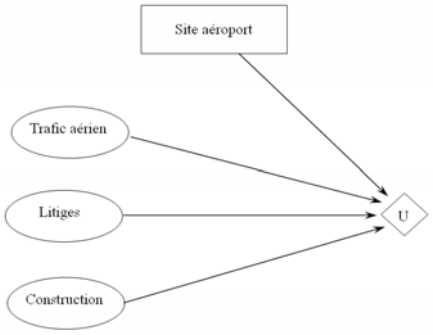


Figure 69 Exemple de diagramme d'influence issue de (Russell & Norvig, 2006, p. 669).

Dans le cadre de la thèse de Dima Mufti-Alchawafa, nous proposons le diagramme d'influence présenté dans la Figure 70 pour représenter le choix de la cible (l'élément de connaissance dont on

souhaite cibler la rétroaction). Dans ce diagramme, les nœuds « élément » de connaissance représentent les observables et contiennent les distributions probabilistes résultant du diagnostic. Le nœud « choix de la cible » contient la liste des candidats à la sélection de cible. Enfin, le nœud « utilité d'apprentissage » représente l'utilité du choix d'un candidat du point de vue de l'apprentissage et il est rempli en se basant les facteurs qui influencent ce choix (l'état, le type, l'ordre et la nature) et qui sont décrits à travers la fonction d'utilité. Un exemple dans le cadre du projet TELEOS est montré dans la partie droite de la Figure 70.

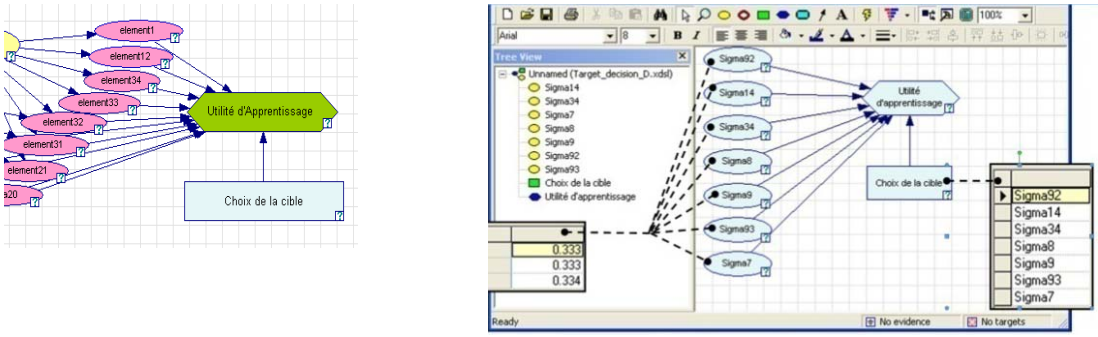


Figure 70 Diagrammes d'influence pour le choix de la cible de la rétroaction

Un réseau avec une bonne structure et une bonne définition des probabilités donne des résultats fiables. D'autre part, avec le diagramme d'influence, la fiabilité d'une meilleure décision dépend de la structure du diagramme (tous les facteurs qui influencent cette décision sont bien pris en compte) ainsi que des valeurs de l'utilité (les utilités représentent bien les préférences du décideur).

Dans notre cas, l'analyse de sensibilité montre que le calcul de l'utilité dans notre modèle est sensible aux petites modifications des probabilités et des paramètres. Nous avons en effet pu constater que le modèle proposé peut, selon le calibrage, être très dépendant de la fiabilité du diagnostic.

En conclusion, si le comportement du modèle proposé est sensible aux paramétrages, il est donc important d'appliquer un bon paramétrage, ou un bon calibrage, pour avoir de bonnes décisions.

4. Résultats liés à la décision didactique et à la rétroaction épistémique

Dans ce chapitre, nous proposons des modèles qui permettent la prise de décisions didactiques. Deux voies sont explorées: la voie semi-automatique, qui propose une instrumentation à l'enseignant pour suivre l'activité de l'élève, et la voie automatique qui propose un processus de prise de décision et des modèles basés sur la théorie de la décision et des diagrammes d'influence.

Nous avons montré qu'il est possible de prendre en compte des critères liées au sujet épistémique et à la situation pour produire la rétroaction. Nous avons rendu cela possible en intégrant des hypothèses didactiques dans le calcul.

Nous avons également tenu compte des contraintes issues de la particularité de la connaissance mise en jeu dans l'apprentissage. Par exemple, une rétroaction qui vise des connaissances déclaratives(le renvoi sur le cours hypermédia) est différente de celle qui vise des connaissances empiriques (la résolution d'un autre problème dans le simulateur).

Nous avons évalué ce dernier modèle par deux moyens. La première évaluation est une analyse de la sensibilité du modèle, qui a montré que le modèle est très sensible aux informations en entrée et au paramétrage et que donc le paramétrage est essentiel pour avoir le comportement attendu. La deuxième évaluation a été réalisée par la méthode gold-standart en comparant des rétroactions expertes aux rétroactions du système : cette validation a montré quelques limites que nous avons présentées plus haut (§ 2.2, p. 134).

Ainsi, si le modèle de décision doit raisonner sur les dimensions historiques auxquelles nous avons fait référence dans le chapitre 4, cela implique que la problématique n'est pas celle d'une décision épisodique, tel que proposé dans notre modèle actuel, mais bien une problématique de décision séquentielle. Le modèle de diagnostic que nous avons proposé tient compte de la dimension historique

(chapitre 4 §2.6.2.2), mais le modèle de décision lui-même doit aussi être un réseau de décision dynamique. Nos perspectives vont donc dans ce sens.

Comme dans le cas du sujet épistémique, nous considérons qu'il est également nécessaire d'aller plus loin dans l'analyse des prises de décisions didactiques afin de tenir compte des facteurs qui permettent de prendre ce type de décisions. Entre autres, il est nécessaire de mettre en place des méthodologies d'analyse plus systémiques et de faire non seulement des analyses qualitatives (centrées *experts*), tel que nous l'avions fait jusqu'à présent, mais de mettre en place des analyses quantitatives (centrées *données*) du processus de prise de décisions.

5. Perspectives liées à la décision didactique et à la rétroaction épistémique.

Tel que nous l'avons présenté dans le chapitre 4, des initiatives internationales récentes s'intéressent à la collecte et à l'analyse des données pour la conception, la validation et l'analyse des usages des environnements informatiques pour l'apprentissage humain. Ces initiatives sont fondamentalement centrées sur l'activité de l'apprenant. Une des perspectives est donc d'avancer vers la collecte des données qui puisse également alimenter les recherches autour de la prise de décision du point de vue de l'enseignant, ou formateur, et, en ce qui nous concerne, de la prise de décision didactique. Ce type de collecte est plus centré sur l'analyse du processus de prise de décision pour la production des rétroactions. C'est également pour cette raison que nous participons à la mise en place d'un système de benchmark au sein du projet Cluster ISLE soutenu par la région. Il nous permettra ainsi de capitaliser des données issues des différentes expériences. Ce travail doit également se faire en relation avec la communauté internationale Educational Data mining (www.educationaldatamining.org).

Ces données permettraient, entre autres, d'affiner nos modèles de décision. En effet, étant donnée l'importance du calibrage du modèle de prise de décisions, un des moyens d'améliorer sa fiabilité est d'utiliser des méthodes d'apprentissage automatique de paramètres à partir d'un nombre significatif de paires « diagnostic, rétroactions» afin de trouver le meilleur jeu de paramètres. Cela implique d'intégrer dans nos processus de conception une itération centrée *données*.

En ce qui concerne l'instrumentation du tuteur pour la rétroaction semi-automatique, nous collaborons au niveau national à une initiative autour de l'instrumentation du tuteur et du suivi qui a donné lieu à un atelier lors de la dernière conférence EIAH (http://eiah2009.univ-lemans.fr/ateliers.php). Ce type de collaboration nous intéresse principalement dans le but d'obtenir des données liées à la prise de la décision pour la rétroaction afin de dégager des facteurs à prendre en compte dans le modèle de prise de décision automatique.

Il est également nécessaire de renforcer le travail pluridisciplinaire pour l'analyse du processus de prise de décision lui-même. Nous envisageons ainsi des collaborations, principalement au sein de l'équipe MeTAH, en ce qui concerne le domaine de l'électricité et des mathématiques. Nous avons ainsi collecté récemment des données de prises de décisions des enseignants, sur l'analyse des traces produites par les apprenants dans plusieurs situations d'apprentissage autour des circuits électriques. Ces situations font intervenir plusieurs contextes épistémiques. Nous avons proposé un projet de collaboration pour démarrer une analyse de ces données du point de vue de la prise de décisions didactiques.

En outre, les résultats que nous avons obtenus nous ont montré que le modèle de prise de décision didactique doit prendre en compte l'histoire du sujet épistémique vis-à-vis des situations, mais aussi l'histoire de la décision elle même. C'est une problématique où les informations sont incertaines et partiellement observables, comme nous l'avons montré dans les chapitres précédents. Nous explorons donc la conception de modèles de décisions dynamiques avec des actions perceptives dans le modèle qui soient susceptibles de réduire l'incertitude. Il est donc nécessaire d'étudier quelles sont ces actions perceptives, c'est-à-dire quelles sont les informations à obtenir à un moment précis d'interaction afin de produire la bonne décision. Nous venons ainsi de démarrer un projet scientifique dans ce sens dans le cadre du projet TELEOS.

Enfin, et tel que suggérée par Woolf (2009, p. 133), une perspective est d'intégrer plusieurs stratégies de rétroaction dans un même modèle: *A single teaching strategy was implemented within each tutor with the thought that this strategy was effective for all students. However, students learn at*

different rates and in different ways, and knowing which teaching strategy (...) is useful for which student would be helpful. This section suggest the need for multiple teaching strategies within a single tutor so that an appropiate strategy might be selected for a given student. Il est ainsi important d'étudier la dimension adaptative de la prise de décision en modélisant plusieurs stratégies de rétroaction qui s'adapteront au sujet épistémique, à la situation et au domaine de connaissance en jeu. En effet, selon le sujet et la situation, nous pourrions envisager une rétroaction immédiate guidée par la solution du problème, tel que proposé dans les systèmes issus d'ACT, ou plutôt une rétroaction différée qui vise l'apprentissage sur un ensemble de problèmes, tels que nous l'avons proposé dans nos systèmes.

6. Bibliographie de nos travaux sur la prise de décisions didactiques et le calcul de rétroactions

Diagne, F., & Luengo, V. (2008). Supervision d'une activité d'apprentissage à partir d'Indicateurs réutilisés dans l'environnement EM-AGIIR. *Colloque International Journées Communication et Apprentissage Instrumentés en Réseau*, (p. 10 pages). Amiens.

Diagne, F. (2009). *Modèle de supervision des processus d'apprentissage.* Grenoble: Thèse Informatique. Université Joseph Fourier.

Luengo, V., Vadcard, L., Dubois, M., & Mufti-Alchawafa, D. (2006). TELEOS : de l'analyse de l'activité professionnelle à la formalisation des connaissances pour un environnement d'apprentissage. *Ingénierie de Connaissances*, (p. 10 pages). Nantes.

Luengo V., Vadcard L., Mufti-Alchawafa D., Vu Minh C. (2007). Conceptions and Bayesian Network for an adaptative Orthopaedic Surgery Learning Environment. 11th International Conference on User Modeling. 2nd Workshop on Personalisation for E-Health, Greece, June 2007. 8 pages.

Luengo, V. (2008). Take into account knowledge constraints for TEL environments design in medical education. *International Conference on Advanced Learning Technologies.* (p. 5 pages). Santander: Springer.

Mufti-Alchawafa, D.; Luengo, V., Vadcard, L. Didactic Decision-Making Process In a Surgery Learning Environment Actes des 3ème Journées Francophones sur les Réseaux Bayésiens JFRB'06 JFRB06, 3èmes *Journées Francophones sur les Réseaux Bayésiens*, 2006, 9 pages.

Mufti-Alchawafa, D., Luengo, V., Vadcard, L. (2007). Un modèle informatique pour la production de rétroactions épistémiques. *Environnements Informatiques d'Aprentissage Humain* (p. 12 pages). Laussane: INRP.

Mufti-Alchawafa, D., Luengo, V., & Vadcard, L. (2008). A decision-making process to produce adaptive feedback in learning. *International Conference on Human System Learning.*, (p. 8 pages). Toulousse.

Mufti-Alchawafa, D. (2008). *Modélisation et représentation de la connaissance pour la conception d'un système décisionnel dans un environnement informatique d'apprentissage en chirurgie.* Grenoble: Université Joseph Fourier.

Mufti-Alchawafa D., Luengo V. (2009) Design Implementation and computer validation of didactical decision model in a learning environment for ortopaedic, *In Intelligent Support for Exploratory Environments. 14th International Conference on Artificial Intelligence in Education*, Brighton 2009.

CHAPITRE VII

Conclusion et perspectives

Nous avons présenté les résultats et les perspectives de nos travaux de recherche à la fin des chapitres 3 à 6. Les résultats peuvent se résumer à la proposition des modèles épistémiques construits à partir des analyses didactiques, à la conception des rétroactions et à leur réification dans les systèmes informatiques. Nous avons ainsi montré nos méthodologies, selon le type de modèle épistémique considéré, et proposé un modèle intégrateur qui est celui de la décision didactique. Pour aller plus loin dans la conception et la validation de ces modèles et systèmes, nous avons également montré la nécessité de ne pas rester dans des modèles centrés *expert* mais de considérer les traces d'activité et donc de passer à des modèles centrés *données*.

Dans ce chapitre de conclusion, nous avons choisi de considérer nos travaux en utilisant l'axe directrice de l'ingénierie des environnements informatiques pour l'apprentissage humain tel que défini par Tchounikine (2002) : *travaux visant à définir des éléments de méthodes et de techniques reproductibles et/ou réutilisables facilitant la mise en place (conception –réalisation – expérimentation – évaluation - diffusion) d'environnements de formation ou d'apprentissage (dans leur articulation avec les dispositifs informatiques d'aujourd'hui) en permettant de dépasser le traitement ad hoc des problèmes*.

Comme cela a été développé tout au long du manuscrit, notre point de vue est centré connaissances et transdisciplinarité.

En ce qui concerne la conception centrée connaissance, notre objectif est de permettre, au travers de méthodes, le passage d'une analyse des connaissances à la conception et à la validation d'environnements informatiques pour l'apprentissage humain, en particulier à la gestion de l'interaction épistémique.

La dimension transdisciplinaire repose sur le fait que les modèles élaborés s'intéressent à plusieurs disciplines. Ce sont donc des modèles propres aux EIAH, car ils ne restent pas inscrits dans la recherche disciplinaire proprement dite mais sont des modèles cherchant à tenir compte des contraintes venant de plusieurs disciplines (didactique, sciences de l'éducation, psychologie, informatique, etc..). En effet, l'analyse d'une connaissance experte, par exemple, ne suffit pas pour qu'elle soit matérialisée dans un système informatique d'apprentissage, de même qu'une analyse didactique, sans la prise en compte des modèles informatiques, ne pourra pas garantir sa réification dans l'environnement informatique. Il n'est donc pas envisageable pour nous de construire une recherche en EIAH comme une série d'interactions entre prestataires de services spécialisés par disciplines.

Du point de vue de la généricité, la difficulté en ce qui nous concerne est que nous nous intéressons à la connaissance en jeu, ce qui implique qu'une partie de notre travail sur les modèles n'est pas complètement reproductible parce qu'elle dépend des formes de connaissances. Par contre, nous cherchons à faire en sorte que les méthodes et les techniques soient reproductibles.

Ainsi, puisque notre difficulté est liée au fait que notre travail est centré connaissances, nous considérons que, afin de dépasser le traitement ad hoc des problèmes tout en gardant leur spécificité, il est nécessaire d'articuler notre recherche sur trois axes : des outils et des méthodes de conception de modèles transdisciplinaires mais partagés par tous les acteurs de la conception ; le découplage des différents composants du système avec les validations associées; et enfin la capitalisation des recherches dans le domaine (traces d'usage, expérimentations, modèles et outils d'analyse de ces résultats).

1. La problématique de la modélisation transdisciplinaire des connaissances dans les environnements informatiques pour l'apprentissage humain

Comme résumé par Woolf (2009, p. 394), une des raisons pour lesquelles il n'existe que très peu de tuteurs intelligents utilisables est la difficulté de conception associée au fait que très peu d'outils existent pour assister cette tâche. En effet, construire des tuteurs intelligents nécessite un raisonnement complexe et la collaboration de plusieurs disciplines. Des efforts sont réalisés pour proposer des outils auteurs, mais pour l'instant, en raison de la complexité des tâches, les propositions ne définissent pas de façon explicite les composants d'un tuteur (domaine, apprenant, tutorat et communication) (ibid. p 395). L'auteur énumère l'ensemble des briques qui permettent de concevoir des tuteurs intelligents: *A variety of primary building blocks for developing intelligent tutor authoring tools are described in this section, classified in four levels : representation and domain, student, teaching and communication knowledge*.

En ce qui nous concerne, nous avons utilisé jusqu'à présent le même modèle (les conceptions en tant que quadruplet) de l'analyse de l'activité experte jusqu'au système de diagnostic. Cependant, les analyses didactiques sont décrites sous forme de tableaux à plusieurs dimensions et ensuite « codées à la main » par les informaticiens dans les différentes représentations. De plus, du point de vue de l'analyse et dans l'état actuel de cette approche, l'explicitation des conceptions devient peu utilisable quand il y a un passage à l'échelle.

Notre perspective est de proposer des modèles et des processus permettant de tenir compte de la phase en amont de la conception des EIAH, à savoir la phase d'analyse des connaissances vis-à-vis de l'apprentissage. En effet, si nous utilisons le même modèle de l'analyse des connaissances jusqu'au calcul des rétroactions, nous n'introduirons pas de bruit (des sources d'erreur) entre les différentes étapes du processus par l'interprétation et la transposition d'un modèle vers un autre.

C'est dans ce cadre et par rapport à l'apprentissage en médecine que nous avons élaboré le projet KDREAMS :

"The fundamental objective of KADREAM is to develop a new perspective on the design of technology-enhanced learning environments for a complex knowledge domain. This new perspective will take into account, in a formal way, not only the realistic dimension of the expert knowledge but also other design constraints, related to the learning context or learning as an activity (Pastré 2002). Our approach is based on a symbiosis between knowledge representation and fine-grained analysis of didactics (Brusseau 1997).

[…] The applicative objectives of KADREAM are to consolidate the computer science dimension of our multidisciplinary project. For that we propose two computer science research objectives and one technological objective

Software engineering: our research object requires sharing the same "formalism" and related concepts across the disciplines. First, let us note that in the following, we use "knowing" as a noun to distinguish the students personal constructs (connaissance in french) from "knowledge" which refers to constructs recognized by a social body (savoir in french). Then, we call this objective: "Knowing centered design tools for medical TEL". The idea is to design computer tools for cognitive analysis based on a model validated in the framework of a FET Open project; the cK¢ model (Balacheff 2003). Using the formalization of the cK¢ model, we establish a complex network of problems, operators (pieces of knowledge to act on the problem), controls (pieces of knowledge to control the problem-solving process) and representation system. This fine-grained analysis is expected to provide a significant support for the implementation of a robust domain component to take into account the knowledge dimension of the learning context. Of course, this work is domain-dependent and time-consuming. Therefore, we will search for a methodology for the development of easy-to-use tools in order to help educational researchers;

2. Artificial intelligence: the objective is to find methods, algorithms and representations to manipulate the information produced by the cognitive analysis in order to organize the didactical system. The system must propose diagnosis and learning feedback models. We call this objective: "Computer inference, based on knowing formalization, for the building of didactical situations in medicine"."

Nous avons construit ce projet à partir du modèle du sujet épistémique et des connaissances en jeu (en nous basant sur le quadruplet du modèle ck¢) que nous avons utilisées dans plusieurs de nos

analyses en formation professionnelle. Actuellement, et étant donné la dynamique du groupe de travail sur le modèle ck¢, nous pensons qu'il est possible de l'élargir à d'autres domaines.

Par ailleurs, suite à l'évolution de nos travaux, nous considérons qu'il faut tenir compte d'autres éléments de conception, en particulier en ce qui concerne la dimension prise de décisions didactiques. En effet, comme nous l'avons montré dans le chapitre 6, le modèle ckç ne prend pas en charge de cette dimension. Il est donc nécessaire de baser nos analyses de connaissances sur plusieurs modèles qui permettront le passage de cette analyse à la conception de systèmes d'apprentissage mais aussi aux formes des rétroactions basées sur la décision didactique.

Nous cherchons également à tenir compte dans nos méthodes de conception du type d'analyse de façon à pouvoir mettre en place plusieurs types de validation. En effet, une analyse centrée expert ne demandera pas le même type de validation qu'une analyse centrée données.

2. Lé découplage et la validation des systèmes

Du point de vue de l'architecture logicielle, nous avons fait l'effort depuis le début de nos travaux de concevoir une architecture ouverte où tous les modèles sont découplés, et ceci afin de pouvoir valider ces derniers séparément mais aussi d'envisager la possibilité d'ajouter de nouvelles formes de rétroaction qui n'ont pas encore été étudiées dan nos travaux. C'est le cas par exemple des modèles de rétroactions langagières qui sont, en effet, complètement absentes de nos recherches actuelles, ou d'autres modèles potentiellement intéressants, comme les nouveaux modèles d'apprenant tenant compte des dimensions autres que la connaissance ou l'animation des systèmes de rétroactions (c'est-à-dire la matérialisation des agents de rétroaction).

A long terme, ce découplage permet, entre autres, la réutilisation de ces différents systèmes. Cela doit se faire avec des conditions qui doivent être étudiées et caractérisées. Ainsi, dans le cas des simulateurs, qualifiés d'objets pédagogiques interactifs, un ensemble minimal de services a été identifié (Guéraud, Adam, Pernin, Calvary, & David, 2004) pour permettre le couplage avec d'autres types de systèmes, à savoir : la référence, l'inspectabilité, l'observabilité et la scriptabilité. Du point de vue de l'architecture logicielle, c'est avec ces critères que nous avons décidé d'intégrer une simulation existante dans notre projet avec Brit-Air. C'est aussi sur ce type de critères que des entreprises de formation professionnelle (Jensen, Sanders, Marshall, & Tasoluk, 2005) ont choisi de baser leur méthodologie de conception.

Ainsi, comme nous l'avons présenté tout au long du manuscrit, nous séparons les systèmes directement utilisés par l'apprenant, tels que les micromondes, simulateurs ou hypermédias, des systèmes de diagnostic ou de prise décisions. Cette différentiation permet d'associer des méthodes de validation qui correspondent aux caractéristiques du modèle proposé.

En effet, même si l'objectif final est de faciliter un apprentissage, il est nécessaire de valider les modèles par rapport à ses propriétés informatiques. Le découplage facilite alors cet aspect. Une architecture faiblement couplée permet d'isoler le système à évaluer des autres systèmes et d'appliquer les validations nécessaires : *Our architecture and methodology allow us a progressive validation. Indeed, we are able to validate each agent separately. For the student learning resources, the computer representations are a close world well specified. Consequently, the validation is related to the completeness and the usability factors. For the knowledge domain, the model has to take into account the evolution of the knowledge extraction. The validation is related to the expressiveness and the adequacy factors. For the empirical dimension (diagnosis and didactical decision agents) we define a gold standard validation where we define a set of scenarios with a set of correct (input, output) pairs. Finally for the decision agent, we propose a sensitivity analysis: checks whether the best decision is sensitive to small changes* (Luengo V. , 2008).

Il faut ainsi partager, au sein de notre communauté scientifique, des EIAH et des moyens de validation équivalents selon le type de système. Une des perspectives dans ce sens est de le réaliser par la proposition de benchmarks dont les éléments de mesure correspondraient aux caractéristiques du système. En effet, autant il est nécessaire d'analyser la complétude d'un simulateur ou d'un micromonde vis-à-vis des connaissances qu'il est censé représenter, autant ce critère de complétude ne sera pas pertinent pour un système de diagnostic. Dans un système de benchmark, il serait donc

possible de comparer deux systèmes de diagnostic par rapport à leurs caractéristiques et non uniquement par rapport à la courbe d'apprentissage des utilisateurs qui est la validation ultime.

Il est donc nécessaire de déterminer quels sont les éléments de comparaison pour l'évaluation. Par exemple, Woolf (2009, p. 188) présente un résumé des éléments de comparaison (*Tutor alone ; Tutor versus non-interventional control ; Benchmark : Tutor versus traditional classroom ; Within system : Tutor$_1$ versus Tutor$_2$; Tutor versus ablated tutor ; Between systems : Tutor A vs Tutor B) et les méthodes d'évaluation employées (Intervention + posttest ; Pretest + Intervention + Postest ; Pretest + Intervention + Postest + delayed posttest ; Interrupted time series ; Crossover ; Partial Crossover*) dans le domaine des tuteurs intelligents.

Dans ce domaine, les évaluations actuelles sont souvent basées sur le benchmark où le système de référence utilisé est le cours traditionnel ou l'enseignant, comme nous l'avions fait également pour nos systèmes de diagnostic. Cela signifie que l'on propose la comparaison du tuteur avec un cours traditionnel ou avec le comportement des enseignants. Or, si cela permet de voir si le diagnostic est proche ou non d'un tuteur, cela ne donne pas des éléments pour améliorer et comparer les systèmes de diagnostic informatiques.

Le passage à l'échelle des usages des systèmes informatiques pour l'apprentissage humain nous permet d'émettre l'hypothèse qu'il sera possible de pouvoir étudier plusieurs systèmes à partir des mêmes traces, tel que c'est fait par exemple dans le domaine du traitement automatique de la langue. C'est dans ce sens que nous envisageons le dernier point de nos perspectives, celui de la capitalisation.

3. Capitalisation

Comme nous l'avons évoqué dans les chapitres 4 et 6 le passage à l'échelle dans les usages des systèmes d'apprentissage permettra au domaine des EIAH d'améliorer les processus de conception mais aussi le processus de validation, souvent ad-hoc et empirique.

Ce passage à l'échelle est également accompagné par la mise en œuvre des expérimentations en milieu écologique. Cela apporte un milieu d'expérimentation beaucoup plus riche mais également plus complexe pour son traçage et son analyse.

Pour que ces deux aspects soient profitables à la recherche dans le domaine des EIAH, il est nécessaire de mettre en place des systèmes de capitalisation des expérimentations et usages de nos systèmes mais aussi les analyses réalisées. Cette capitalisation passe par la considération des modèles de collecte et de partage de la trace, des modèles d'analyse de la trace, des modèles d'apprentissage automatique à partir des traces et des modèles de validation à partir des traces. C'est dans ce sens que nous nous sommes engagée dans la responsabilité du projet régional sur les traces et la personnalisation des EIAH.

La trace est donc un objet central de l'objectif de capitalisation : "*Depuis quelques années, l'analyse des traces s'est développée et de nouveaux champs de recherche sont apparus concernant la nature et, surtout, la structuration des données recueillies, les modèles, méthodes et techniques pour analyser et visualiser les indicateurs construits, notamment dans le but de favoriser des apprentissages.*

Ainsi, un projet international comme LISTEN (LISTEN, 2005) a connu une évolution remarquable. D'abord préoccupés par le développement d'un tuteur intelligent capable d'écouter et d'interpréter les productions orales de l'apprenant dans son apprentissage de la lecture de l'anglais, les membres du projet LISTEN se sont ensuite également attachés à étudier les techniques « d'écoute » de l'interaction apprenant-EIAH. Ils ont développé un ensemble de savoir-faire sur le recueil et l'analyse de traces, puis ont cherché à formaliser ce savoir-faire sous la forme d'une architecture logicielle et de recommandations méthodologiques (Mostow, 2004) et (Mostow et Beck, 2006).

Cette dynamique nous semble révélatrice d'une tendance générale dans ce champ de recherche qui se structure d'une part en prenant l'ingénierie des traces dans un EIAH comme objet d'études et, d'autre part, en cherchant à partager et capitaliser les savoir-faire." (Choquet, Delozanne, E., & Luengo, 2007).

En ce qui nous concerne, nous nous intéressons à la collecte des traces en milieu écologique. De ce point de vue, nous mettons en place des systèmes de collecte dans des milieux pour la formation, en

particulier le bloc opératoire. Les traces collectées sont peu classiques dans notre domaine et interrogent les modèles qui peuvent y être associés. En effet, ce type de collecte s'intéresse à des traces perceptivo-gestuelles (traces oculaires, traces spatiales et de force liées au geste), et nos perspectives de recherche portent sur l'étude des modèles de collecte, l'analyse, l'évaluation et l'apprentissage avec ce type de données.

4. Des cycles de conception

Comme nous l'avons montré tout au long de notre manuscrit, nous ressentons la nécessité de trouver un équilibre dans nos recherches entre un modèle centré *expert*, qui peut être efficace mais dont la validation est souvent qualitative et empirique, et donc incertaine et peu capitalisable, et un modèle centrée *données*, qui peut être systémique et avec lequel on peut faire une validation quantitative, mais dont la variété et le nombre d'observables sont déterminants vis-à-vis de la pertinence du modèle.

En outre, les modèles en EIAH utilisent des théories et des modèles empiriques et transdisciplinaires.

Il est donc nécessaire de proposer des processus de conception qui tiennent compte de ces dimensions.

Ce processus de conception peut être proche de la conception en spirale classique en ingénierie logicielle, sauf qu'il est nécessaire ici de prendre en compte la dimension recherche et donc d'inscrire dans le cycle les théories et les modèles qui accompagnent ce processus. C'est un peu de cette façon que l'a envisagé Self à la fin des années 90 en ce qui concerne la conception de tuteurs intelligents, comme nous pouvons le voir dans la Figure 71.

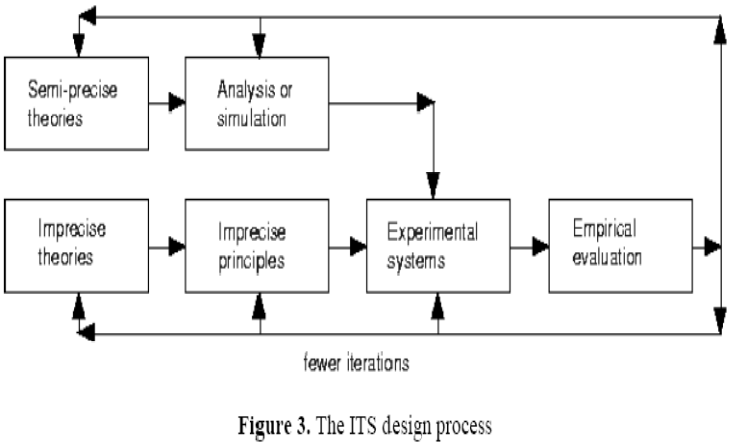


Figure 71, Processus de conception des tuteurs intelligents, pris de Self 1999.

Même si cette proposition n'est pas récente, il n'existe à l'heure actuelle pas de modèles et plateformes qui supportent un tel type de processus en EIAH. Or nous croyons, comme Self, que c'est dans cette interaction entre les théories proposées, les modèles et les systèmes qui en découlent que nous pouvons faire avancer notre domaine : "*Aircraft design has progressed through many centuries of visions and a few decades of serious experimentation to largely depend on the theory of aeronautics and specialised test environments. Would ITSs ever be built by a blend of beautiful theory and empirical fine tuning?"* (Self 1999, p. 354).

A l'heure actuelle, avec les nouvelles technologies et la perspective de capitalisation - des traces mais aussi des modèles, des méthodes et des résultats de recherché associés- nous nous engageons sur cette perspective.

REFERENCES

A3. (2009, juillet). *Equipe A3*. Consulté le septembre 2009, sur laboratoire LIPN,: http://www-lipn.univ-paris13.fr/A3/

Adam, J., Anastique, P., Cagnat, J., David, J., Ferraris, C., Giraud, S., et al. (2006). *Demonstrator of an infrastructure to collect and exchange experimental trails.* Kaleidoscope NoE, Deliverable D07-08-01 final.

Adam, J., Michellet, S., Martel, C., David, J., & Guéreaud, V. (2007). Une infrastructure logiciel pour instrumenter l'expérimentation EIAH. *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain.* Laussanne: INRP.

Adam, J., Michellet, S., Martel, C., J.P., D., & V., G. (2007). Une infrastructure logiciel pour instrumenter l'expérimentation EIAH. *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain.* Laussanne: INRP.

Adam, J., P.B., A., J.M., C., David, J., Ferraris, C., Giraud, S., et al. (2006). *Demonstrator of an infrastructure to collect and exchange experimental trails.* Kaleidoscope D7.8.1.

Aleven, V., & Bodnar, J. (2007). *AIED Applications in Ill-Defined Domains*. Consulté le septembre 2009, sur AIED 2007: http://www.cs.pitt.edu/~collinl/AIED07/

Aleven, V., & Koedinger, K. (2002). An effective metacognitive strategy: learning by doing and explaining with a computer-based cognitive Tutor. *Cognitive Science 26* , 147–179.

Aleven, V., McLaren, B., Sewall, J., & Koedinger, K. (2006). The Cognitive Tutor Authoring Tools (CTAT) : Preliminary Evaluation of Efficiency Gains. *Intelligent Tutoring Systems* (pp. 61-70). Taiwan: Springer.

Anderson J, B. F., & Corbett, A. Y. (1985). The Geometry Tutor. . *IJCAI*, (pp. 1-7). Los Angeles.

Anderson, J. R., Boyle, C. F., Corbett, A. T., & Lewis, M. W. (1990). Cognitive modeling and intelligent tutoring. *Artificial intelligence , 42* (1), 7-49.

Anderson, J., Bothell, D., Byme, M., Douglass, S., Lebiere, C., & Y., Q. (2004). An Integrated Theory of the Mind. *Psychological Review* , 1036-1060.

Aplusix. (2009). *logiciel aplusix*. Consulté le 2009, sur http://aplusix.com/fr/index.html

Ardissono, L., & Goy, A. (2000). Dynamic Generation of Adaptive Web Catalogs. *International Conference on Adaptive Hypermedia and Adaptive Web-Based Systems* (pp. 5-16). Trento: Springer-Verlag .

Arez, M. (2008). *Conception d'un simulateur vidéo de chirurgie Aortique laparoscopique.* Paris: Master Chirurgie. Université Paris V.

Arroyo, I., Woolf, B., & Beal, C. (2006). Addressing Cognitive Differences and Gender During Problem Solving. *International Journal of Technology, Instruction, Cognition and Learning.* , 31-63.

Artigue, M. (2002). Ingénierie didactique : qeul rôle dans la recherche didactique aujourd'hui. *Revue Internationale des Sciences de l'Education* , 59-72.

Artigue, M. (1998). Ingénierie didactique. *Recherches en Didactiques de Mathématiques* , 281-308.

Baker, M., de Vries, E., k., L., & Quignard, M. (2001). Interactions épistémiques médiatisées par ordinateur pour l'apprentissage des sciences : bilan de recherches. *Scienes et Techniques Eduatives* , 21-32.

Baker, R. (2007). Is Gaming the System State-or-Trait? Educational Data Mining Through the Multi-Contextual Application of a Validated Behavioral Model. *Workshop on Data Mining for User Modeling, at International Conference on User Modeling*, (pp. 76-80). Corfu.

Balacheff, N. (1994). Didactique et intelligence artificielle. *Recherches en didactique des mathématiques , 14* (1), 9-42.

Balacheff, N. (2004). Knowledge, the keystone of TEL design. . *Information and communication technologies in education*, (p. 10 pages). Athena.

Balacheff, N. (2001, février). *Les connaissances, pluralité des conceptions. Le cas des mathématiques.* Consulté le avril 2009, sur Les Cahiers Leibniz: http://www-leibniz.imag.fr/LesCahiers

Blavier, A., Gaudissart, Q., Cadière, G. B., & Nyssen, A. S. (2007). Comparison of learning curves in classical and robotic laparoscopy according to the viewing condition. *American Journal of Surgery* , 115–121.

Boticario, J., Santos, O., Couchet, J., Fabregat, R., Baldiris, S., & Moreno, S. (2009). *Towards User Modeling and Adaptive Systems for All (TUMAS-A 2009): Modeling and Evaluation of Accessible Intelligent Learning Systems*. Consulté le juin 2009, sur Towards User Modeling and Adaptive Systems for All (TUMAS-A 2009): Modeling and Evaluation of Accessible Intelligent Learning Systems: https://adenu.ia.uned.es/web/es/projects/tumas-a/2009

Brousseau, G. (2002). *Glossaire de la théorie des situations didactiques.* Consulté le 06 23, 2008, sur Guy Brousseau: http://pagesperso-orange.fr/daest/guy-brousseau/textes/Glossaire_Brousseau.pdf

Brousseau, G. (1997, juin). La théorie des situations didactiques. *Cours donné lors de l'attribution du titre de Docteur Honoris Causa de l'Université de Montreal* . Montreal, Canada.

Brousseau, G. (1998). *Théorie des situations didactiques.* Grenoble: La Pensée Sauvage.

Brusilovsky, P. (1999). Adaptive and Intelligent Technologies for Web-based Education. *Special Issue on Intelligent Systems and Teleteaching , 4*, 19-25.

Brusilovsky, P. (1994). Student model centered architecture for intelligent learning environments. *International conference on User Modeling*, (pp. 31-36). Hyannis, MA.

Brusilovsky, P., & Millán, E. (2009). Modèles utilisateurs pour les hypermédias adaptatifs et les systèmes d'enseignement adaptatifs. Dans J. Marty, & A. Mille, *Analyse de traces et personnalisation des environnements informatiques pour l'apprentissage humain* (pp. 67-138). Paris: Lavoisiers.

Charlet, J. (2002). *L'ngénierie des connaissances. Développements, résultats et perspectives pour la gestion des connaissances médicales.* Paris: Université Pierre et Marie Curie.

Chevalard, Y. (1999). L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en didactique des mathématiques* , 221-226.

Choquet, C., Delozanne, E., & Luengo, V. (2007). Analyses des traces d'utilisation dans les EIAH. *uméro spécial STICEF* .

Clancey, W. (1987). *Knowledge Based tutoring: The Guidon program.* Cambridge, MA: MIT Press.

Clancey, W. (1997). *Situated Cognition: On Human Knowledge and Computer Representations.* Cambridge: Cambridge University Press.

Collins, A., & Stevens, A. L. (1991). A cognitive theory of inquiry teaching. Dans P. Goodyear, *Teaching Knowledge and Intelligent Tutoring,* (pp. 203–230). Norwood: Ablex Publishing Corporation.

Conati, C., Gertner, A., & VanLehn, K. (2002). Using Bayesian networks to manage uncertainty in student modeling. *User modeling and User Adapted Interaction*, (pp. 371-417).

Confrey, J. (1986). "Misconceptions" across subject matters: charting the course from a constructivism perspective. *Annual meeting of the American Educational Research Association*, (p. Document polycopié).

Corbett, A. T., & Anderson, J. (1995). Knowledge tracing: modeling the acquisition of procedural knowledge. *User Modeling and User Adapted Interaction , 4*, 253-278.

Corbett, A., & Anderson, J. (2001). Locus of Feedback Control in Computer-Based Tutoring: Impact on Learning Rate, Achievement and Attitudes. Dans J. Jacko, A. Sears, M. Beaudouin-Lafon, & R. Jacob (Éd.), *ACMHI, humain Factors in Computing Systems* (pp. 245-252). New York: ACM Press.

Couarraze, L. (2006). *Développement en Java 3D d'un simulateur de vissage sacro-iliaque.* Grenoble: Master 2 Professionel « Ingénierie de l'Image et de la CAO », Université Joseph Fourier.

Croset, M. (2007). Prise en compte du contexte algébrique dans la modélisation des connaissances d'un élève. Le cas de la factorisation. *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain* (pp. 401-412). Laussane: INRP.

de Jong, T., & der Meij, J. (2009, 01). *Simquest*. Consulté le 09 2009, sur Simquest: http://www.simquest.nl/

de Jong, T., & Ferguson-Hessler, M. (1996). Types and qualities of knowledge. *Educational Psychologist , 31*, 105-113.

Di Eugenio, B., Fossati, D., Haller, S., Yu, D., & Glass, M. (2008). Be Brief, And They Shall Learn: Generating Concise, Language Feedback for a Computer Tutor. *Artificial Intelligence in Education* , 317-345.

Diagne, F. (2009). *Modèle de supervision des processus d'apprentissage.* Grenoble: Thèse Informatique. Université Joseph Fourier.

Diagne, F., & Luengo, V. (2008). Supervision d'une activité d'apprentissage à partir d'Indicateurs réutilisés dans l'environnement EM-AGIIR. *Colloque International Journées Communication et Apprentissage Instrumentés en Réseau*, (p. 10 pages). Amiens.

diSessa, A. (1983). Phenomenology and the evolution of intuition. Dans D. Gentner, & A. Stevens, *Mental Models* (pp. 15-33). Hillsdale: Lawrence Erlbaum.

Du Boulay, B., & Luckin, R. (2001). Modelling human teaching tactics and strategies for tutoring systems. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* , 235-256. .

Eliot, C., Williams, K., & Woolf, B. (1996). An intelligent Learning environnement for Advanced Cadiac Life Support. *AMIA* (p. 7_11). Washington: Hanley & Belfus.

Emin, V. (2008). ScenEdit: an authoring environment for designing learning scenarios. *International Conference on Advanced Learning Technologies* (pp. 737-739). Santander: IEEE .

Faulhaber, A., & Melis, E. (2008). An Efficient Student Model Based on Student Performance and MetaData. *European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 276-280). Patras: IOS Press.

Flammier, A. (2005). *Modélisation de la connaissance experte en chirurgie orthopédique pour la conception d'un EIAH.* Grenoble: MASTER II Professionnel, « Formation, Emploi, Compétences ». Université Pierre Mendes France.

Flemming, & Levie. (2009, février 16). *Feedback*. Consulté le mai 15, 2009, sur Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Feedback#cite_note-Fleming-4

Goguadze, G., & Melis, E. (2009). Artificial Intelligence in Education. *AIED* (pp. 668-670). Brighton: IOS Press.

Guéraud, V., Adam, J.-M., Pernin, J.-P., Calvary, G., & David, J.-P. (2004). L'exploitation d'Objets Pédagogiques Interactifs à distance: le projet FORMID. *STICEF* .

Guin, D. (1991). Modélisation de la démonstration géométrique dans Geometry Tutor. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives* , 5-40.

Haddawy, P., & Suebnukarn, S. (2006). Modeling individual and collaborative problem-solving in medical problem-based learning. *User Modeling and User-Adapted Interaction* , 211-248.

Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The power of feedback. *Review of educational Research , 77* (1), 81-112.

Heffernan, N. T., & & Koedinger, K. R. (2002). An intelligent tutoring system incorporating a model of an experienced human tutor. *Intelligent Tutoring System* (pp. 596-608). Biarritz: Springer.

Heffernan, N., Koedinger, K., & Razzaq, L. (2008). Expanding the Model-Tracing Architecture: A 3rd Generation Intelligent Tutor for Algebra Symbolization. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* , 153-178.

Hersant, M., & Perrin-Glorian, M. (2005). Characterization of an ordinary teaching practice with the help of the theory of didactic situations. *Educational Studies in Mathematics Education* , 113-151.

Hibou, M. (2006). *Réseaux bayésiens pour la modélisation de l'apprenant : une approche basée sur les multi-réseaux.* Paris: Université René Descartes.

Hibou, M., & Labat, J. (2006). How to Orientate Arcs in a Bayesian Network Based Student Model? *International Conference on Advance Learning Technologies* (pp. 560-562). Kerkrade: IEEE Computer Society.

Howland, K., du Boulay, B., & Good, J. (2009). Fostering Engaged and Directed Learning by Activity Foregrounding and Backgrounding. *Artificial Intelligence in Education.* Brighton: Springer.

http://aplusix.imag.fr/. (s.d.). *Edition d'expressions*. Consulté le juillet 2009, sur Aplusix: http://aplusix.imag.fr/fr/Edition-fr.htm

IMS-LD. (2009, 08 18). *IMS Global Learning Consortium, Inc.* Consulté le septembre 2009, sur IMS Global Learning Consortium: (IMS LD 2003) , http://www.imsglobal.org/learningdesign/, dernière consultation, avril 2004

Jensen, R., Sanders, H., Marshall, C., & Tasoluk. (2005). FCS Intelligent Structured Training - Experimental Results and Future Applications. *Industry/Interservice, Training, Simulation & Education Conference.*

Kabanza, F., Bisson, G., Charneau, A., & Jang, T. (2006). Implementing tutoring strategies into a patient simulator for clinical reasoning learning. *Artificial Intelligence in Medicine* , 79-96.

kaleidoscope. (2008). *kaleidoscope*. Consulté le juin 2009, sur kaleidoscope: http://www.noe-kaleidoscope.org/

Kluger, A. N., & DeNisi, A. (1996). The effects of feedback interventions on performance: A historical review, a meta-analysis, and a preliminary feedback intervention theory. *Psychological Bulletin , 119* (2), 254-284.

Koedinger, K. R., & Aleven, V. (2007). Exploring the assistance dilemma in experiments with Cognitive Tutors. *Educational Psychology Review* , 239-264.

Koedinger, K., Anderson, J., Hadley, W., & Mark, M. (1997). Intelligent tutoring goes to school in the big city. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* , 30-43.

Koper, R. (2002). *Educational Modelling Language : adding instructional design to existing specifications.* Open University of Neederlands.

Laforcade, P., Nodenot, T., & Sallaberry, C. (2005). Un langage de modélisation pédagogique basé sur UML. *STICEF* , 22 pages.

Lajoie, S., Faremo, S., & Wiseman, J. (2001). Identifying Human Tutoring Strategies for Effective Instruction in Internal Medicine. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* , 293-309.

Lakatos, I. (1976). *Proof and Refutations.* . Cambridge: Cambridge University Press.

Larcher, A. (2009). *Conception d'un simulateur en chirurgie orthopédique.* Grenoble: CNAM.

Larrieu, S. (2005). *Modélisation de la connaissance des pilotes de ligne : les limitations au décollage.* Grenoble: Master 2. Information, Cognition, Apprentissage.

Larrieu, S., Vadcard, L., & Luengo, V. (2005). Didactical approach for the design of a learning environment for airline pilots. *European Research Workshop on Understanding and Rethinking the Technology-mediated workplace* (p. 5). Liège, Belgium: NOE Kaleidoscope.

LearnLab. (2009). *Pittsburgh Science of Learning Center*. Consulté le septembre 2009, sur Pittsburgh Science of Learning Center: http://www.learnlab.org/

Leinhardt, G., & Greeno, J. G. (1991). The cognitive skill of teaching. Dans P. Goodyear, *Teaching Knowledge and Intelligent Tutoring* (pp. 233–268). Norwood: Ablex Publishing Corporation.

Lejeune, A., & Pernin, J. (2004). Modèles pour la réutilisation de scénarios d'apprentissage. *Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement (TICE) Méditérranée*, (pp. 48-55). Nice.

Lepper, M. R., Woolverton, M., Mumme, D. L., & Gurtner, J.-L. (1993). Motivational techniques of expert human tutors: Lessons for the design of computer-based tutors. Dans S. P. Lajoie, & S. J. Derry, *Computers as Cognitive Tools* (pp. 75–105). Hillsdale: Lawrence Erlbaum.

Liabeuf, C. (2006). *Système de diagnostic pour l'apprentissage en chirurgie orthopédique.* Grenoble: Master 2 R « Master 2 EIAH et Didactique. Université joseph Fourier.

Lima, I., & Tragalová, J. (2008). Connaissances des professeurs susceptibles d'influencer leurs decisions didactiques. *Simpósio internacional de Pesquisa em Educaçao matemática.* Recife.

LISTEN. (2008, octobre 23). *Summary Listen project*. Consulté le juin 2009, sur Project LISTEN: http://www.cs.cmu.edu/~listen/index.html

Luckin, R., & Du Boulay, B. (1999). Ecolab : the development and evaluation of a Vygotskyan design framework. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* , 198-220.

Luengo, V. (1999). A semi-Empirical Agent for learning mathematical proof. *Artificial Intelligence and Education* (pp. 475-482). Amsterdam: IO Press.

Luengo, V. (1999). Analyse et prise en compte des contraintes didactiques et informatiques dans la conception et le développement du micromonde de preuve Cabri-Euclide. *Sciences et Techniques Educatives , 6* (1), 256-277.

Luengo, V. (1997). *Cabri-Euclide: un micromonde de preuve intégrant la réfutation. Principes didactiques et informatiques. Réalisation.* Grenoble: Thèse Université Joseph Fourier.

Luengo, V. (2009, juin). *Description projet TELEOS*. Consulté le aout 2009, sur Projet TEleos: http://teleos.imag.fr/

Luengo, V. (2005). Some didactical and epistemological considerations in the design of educational software : the Cabri-Euclide example. *International Journal of Computers for Mathematical Learning* , 1-29.

Luengo, V. (2008). Take into account knowledge constraints for TEL environments design in medical education. *International Conference on Advanced Learning Technologies.* (p. 5 pages). Santander: Springer.

Luengo, V. (2008). *Utilisation des réseaux bayésiens pour la conception des Environnements informatiques d'apprentissage Humain.* Paris 13: Séminaire A3, LIPN.

Luengo, V., & Vadcard, L. (2005). Design of adaptive feedback in a web educational system. *Workshop Adaptive Systems for Web-Based Education: Tools and Reusability. In International Conference on Artificial Intelligence in Education* (p. 5 pages). Amsterdam : Springer-Verlag.

Luengo, V., Aboulafia, A., Blavier, A., Shorten, G., Vadcard, L., & J, Z. (2009). Novel Technology for learning in Medicine. Dans N. L. Balacheff, T. de Jong, A. Lazonder, & S. Barnes, *Technology Enhanced Learning. Principles and products.* (pp. 105-120). Berlin: Springer Verlag.

Luengo, V., Aboulafia, A., Blavier, A., Shorten, G., Vadcard, L., & Zottmann, J. (2009). Novel Technology for learning in Medicine. Dans N. L. Balacheff, T. de Jong, A. Lazonder, & S. Barnes, *Technology Enhanced Learning. Principles and products.* (pp. 105-120). Berlin: Springer Verlag.

Luengo, V., Dubois, M., Vadcard, L., & Tonetti, J. (2007). TELEOS: Technology enhanced Learning in orthopaedic surgery. *« présentation des projets soutenus par le programme CNRS TCAN ».* (pp. 1-18). Grenoble: Plate-forme AFIA.

Luengo, V., Mufti-Alchawafa, D., & Vadcard, L. (2004). The knowledge like the object of interaction in an orthopaedic surgery-learning environment. *International Conference on Intelligent Tutoring Systems* (pp. 108-117). Macéio, Brésil: Springer.

Luengo, V., Vadcard, L., & Balacheff, N. (2006). Les EIAH à la lumière de la didactique. Dans M. L. Grandbastien, *Environnements informatiques pour l'apprentissage humain. Collection IC2.* (pp. 47-66). Paris: Hermes.

Luengo, V., Vadcard, L., Dubois, M., & Mufti-Alchawafa, D. (2006). TELEOS : de l'analyse de l'activité professionnelle à la formalisation des connaissances pour un environnement d'apprentissage. *Ingénierie de Connaissances*, (p. 10 pages). Nantes.

Mameli, A. (2008). *Conception d'un simulateur vidéo de chirurgie aortique laparoscopique.* Paris: Master 2 de Sciences Chirurgicales, Université Paris 12.

Mameli, A., Luengo, V., Cau, J., & Mesas, A. (2009). Méthodologie de conception d'un simulateur vidéo laparoscopique. De l'analyse des connaissances à la création des parcours d'apprentissage : Le cas de la chirurgie aortique. *EIAH* (pp. 319-326). Le Mans: INRP.

Margolinas, C. (2002). Situations, milieux, connaissances : analyse de l'activité du professeur. . *Ecole d'Eté de Didactique des Mathématiques* (pp. 141-156). Grenoble: Pensée Sauvage.

Margolinas, C., & Rivière, O. (2005). La préparation de séance : un élément du travail du professeur. *Petit X* , 32-57.

Martel, C., Vignollet, L., Ferraris, C., David, J., & Lejeune, A. (2006). Modeling collaborative learning activities on e-learning platforms. *International Conference on Advanced Learning Technologies*, (pp. 838-844). Kerkrade.

Martel, C., Vignollet, L., Ferraris, C., David, J., & Lejeune, A. (2006). Modeling collaborative learning activities on e-learning platforms. *International Conference on Advanced Learning Technologies* (pp. 838-844). Kerkrade: IEEE.

Mayo, M., & Mitrovic, A. (2001). Optimising ITS Behaviour with Bayesian Networks and Decision Theory. *International Journal of Artificial Intelligence in Education , 12*, 124-153.

Mazé, O. (2009). *Appariement des élèves à l'aide d'une modélisation des connaissances de l'apprenant.* Le Mans: Master Communication Homme-Machine et Ingénierie Educative, Université du Mans.

Medina, N. (2004). *Simulations, Scénarios et Gestion des Connaissances en électricité.* Grenoble: Master 2, Environnements informatique pour l'apprentissage humain.

Mendola, L. (2007). *Modélisation du geste technique en chirurgie orthopédique à des fin de formation professionnelle.* Grenoble: Master Psychologie du Travail. Université Pierre Mendès France.

Messas, A. (2006). An Online Video simulator to shorten and secure laparoscopic learning period. *Technology Enhanced Learning in Working Context.* Grenoble: Kaleidoscope.

Michelet, S. (2005). *Modélisation de la connaissance en électricité.* Grenoble: Master 2, Information, Cognition, Apprentissage.

Michelet, S., Adam, J., & Luengo, V. (2007). Adaptive learning scenarios for detection of misconceptions about electricity and remediation. *International Journal of Emerging Technologies in Learning* .

Michelet, S., Luengo, V., & Adam, J. (2009). DiagElec: A model of Diagnosis in Electricity using a learner's model. *European Conference on Technology Enhanced Larning.* Nice.

Millán, E., Pérez-de-la-Cruz, J., & E., S. (2000). Adaptive Bayesian Networks for Multilevel Student Modelling. In r. G. Gauthie, C. Frasson, & K. VanLehn (Ed.), *5th International Conference on Intelligent Tutoring Systems* (pp. 534-543). Montréal: Springer-Verlag.

Mitrovic, A., & Ohlsson, S. (1999). Evaluation of a Constraint-Based Tutor for a Database Language. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* (10), 238-256.

Mitrovic, A., Koedinger, K., & Martin, B. (2003). A Comparative Analysis of Cognitive Tutoring and Constraint-Based Modeling. *User Modeling* (pp. 313-322). Johnstown, PA: Springer.

Mohammed, J., Ong, J., & L., J. (2005). Rapid Development of Scenario-Based Simulations and Tutoring Systems. *American Institute if Aeronautics and Astrnautics. Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibition.* . San Francisco, CA.

Morales, R., Van Labeke, N., & Brna, P. (2006). Approximate modelling of the multi-dimensional learner. *International Conference on Intelligent Tutoring Systems* (pp. 555-564). Taiwan: Springer, LNCS.

Morris, D., Sewell, C., Barbagli, F., Salisbury, K., Blevins, N., & Girod, S. (2006). Visuohaptic Simulation of Bone Surgery for Training and Evaluation. *IEEE Computer Graphics and Applications* , 48-57.

Mory, E. H. (2004). Feedback research revisited. Dans D. Jonassen, *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (pp. 745-783). Mahwah: Erlbaum.

Mufti Alchawafa, D., Luengo, V., & Vadcard, L. (2004). Architecture d'un environnement d'aide à l'apprentissage de la chirurgie orthopédique. *TICE.* Compiegne.

Mufti-Alchawafa, D. (2008). *Modélisation et représentation de la connaissance pour la conception d'un système décisionnel dans un environnement informatique d'apprentissage en chirurgie.* Grenoble: Université Joseph Fourier.

Mufti-Alchawafa, D. (2003). *Outil pour l'apprentissage de la chirurgie orthopédique à l'aide de simulateur.* Grenoble: DEA Informatique, Systèmes et Communication. Université Joseph Fourier.

Mufti-Alchawafa, D., Luengo, V., & Vadcard, L. (2008). A decision-making process to produce adaptive feedback in learning. *International Conference on Human System Learning.*, (p. 8 pages). Toulousse.

Mufti-Alchawafa, D., Luengo, V., & Vadcard, L. (2007). Un modèle informatique pour la production de rétroactions épistémiques. *Environnements Informatiques d'Aprentissage Humain* (p. 12 pages). Laussane: INRP.

Muldner, K., & Conati, C. (2007). Evaluating a Decision-Theoretic Approach to Tailored Example Selection. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (pp. 483-488). Hyderabad, India.

Murray, R., VanLehn, K., & Mostow, K. (2004). Looking ahead to select tutorial actions: A decision-theoretic approach". *International Journal of Artificial Intelligence and Education* , 235-278.

Murray, T. (1999). Authoring Intelligent Tutoring Systems: An Analysis of the State of art. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* , 98-129.

Murray, T., & Arroyo, I. (2002). Towards Measuring and Maintaining the Zone Proximal Development in Adaptive Instructional Systems. *Intelligent Tutoring Systems.* Biarritz: Stringer.

Naïm, P., Wuillemin, P., Leray, P., Pourre, O., & Becker, A. (1999, 2004, 2008). *Réseaux bayésiens.* Paris: Eyrolles.

Nicaud, J., Bouhineau, D., Pavard, X., & Sander, E. (2001). Un micromonde pour aider les élèves à apprendre l'algèbre. *Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur* (pp. 33-48). Paris: Hermès.

Nodenot, T. (2005). *Contribution à l'ingénierie dirigé par les modèles en EIAH: le cas des situations-problèmes coopératives.* Bayonne: IUT de Bayonne, Université de Pau.

Ohlsson, S. (1992). Constraint-based student modeling. *Artificial Intelligence and Education , 3* (4), 429-447.

Ohlsson, S. (1996). Learning from Performance Errors. *Psychological Review* , 241–262.

Ohlsson, S. (1995). Learning to Do and Learning to Understand: A lesson and a Challenge for Cognitive Modeling. In P. Reiman, & H. Stade, *Learning in Humans and Machines: Towards an interdisciplinary learning science* (pp. 37-62). Oxford: Elsevier Science.

Ohlsson, S. (n.d.). *skill & errors.* Retrieved juin 13, 2009, from Stellan Ohlsson research interest: http://www.psch.uic.edu/stellan.asp#skills%20&%20errors

Ohlsson, S. (2008). *skill & errors*. Retrieved juin 13, 2009, from Stellan Ohlsson research interest: http://www.psch.uic.edu/stellan.asp#skills%20&%20errors

Pastré, P. (1999). La conceptualisation dans l'action : bilan et nouvelles perspectives. *Éducation Permanente* , 13-35.

Pastré, P. (2002). L'analyse du travail en didactique professionnelle. *Revue française de pédagogie* , 9-17.

Pavlik, P., Cen, H., & Koedinger, K. (2009). Performance Factors Analysis - A New Alternative to Knowledge Tracing. *AIED* (pp. 531-539). Brighton: IOS Press.

Perez, L. (2005). *Software architecture proposal for a learning environment in orthopaedic surgery.* Grenoble: Stage de troisième année d'ingénieur ENSIMAG. Institut National Polytechnique.

Pernin, J., Emin, V., & Guéraud, V. (2009). Intégration de la dimension utilisateur dans la conception de systèmes pour l'apprentissage, Scénarisation pédagogique dirigée par les intentions. *Ingénierie des systèmes d'Information* , 9-31.

Perrin-Glorian, M. (2009). L'ingénierie didactique à l'interface de la recherche avec l'enseignement. Vers une ingénierie didactique de deuxième génération ? *Ecole d'été de didactique des mathématiques* (p. 20 pages). Clermont Ferrand: ARDM.

Ploix, S., Desinde, M., & Michau, F. (2004). Assessment and diagnosis for virtual reality training. *Conference on Computer Aided Learning in Engineering education.* Grenoble.

Razzaq, L., & Heffernan, N. (2009). To Tutor or Not to Tutor: That is the Question. *Artificial Intelligence in Education* (pp. 457-464). Brighton: IOS Press.

Resnick, L., & Ford, W. (1981). *The psychology of mathematics for instruction.* Hillsdale NJ: Lawrence Erlbaum.

Reye, J. (1998). Two-phase updating of student models based on dynamic belief networks. *intelligent tutoring systems* (pp. 274-283). San Antonio TX: Springer.

Reznick, R., & MacRae, H. (2006). Teaching Surgical Skills — Changes in the Wind. *The new england journal o f medicine* , 6 pages.

Richard, J. F. (1990). *Les activités mentales, Comprendre, raisonner, trouver des solutions.* . Paris: Armand Colin.

Richard, J. F. (1990). *Les activités mentales. Comprendre, raisonner, trouver des solutions.* Paris: Armand Colin.

Ritter, S., Brusilovsky, P., & Medvedeva, O. (1998). Creating More Versatile Intelligent Learning Environments with a Component-Based Architecture. *Intelligent Tutoring Systems* (pp. 554-563). San Antonio, Texas: Springer.

Rogalski, J. (1995). From real situations to training situations: conservation of functionalities. Dans J. Hoc, C. Cacciabue, & E. Hollnagel, *Expertise and Technology: Cognition and Human-Computer Cooperation.* (pp. 125-137). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Asociates,.

Rogalski, J. (2004). La didactique professionnelle: une alternative aux approches de « cognition située » et «cognitiviste » en psychologie des acquisitions. *@ctivités* , 103-120.

Rogalski, J., & Samurçay, R. (1994). Modélisation d'un savoir de référence et transposition didactique dans la formation de professionnels de haut niveau. Dans J. Arsac, Y. M.-L. Chevallard, & T. A, *La transposition didactique à l'épreuve* (pp. 35-71). Grenoble: La Pensée Sauvage.

Roulin, C. (2004). *Modélisation de conceptions d'élèves en électricité.* Grenoble: Master Environnements Informatiques pour l'apprentissage Humain. Université Joseph Fourier.

Russell, S., & Norvig, P. (2003). *Artificicial Intelligence a modern approach.* Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall Series in Artificial Intelligence.

Russell, S., & Norvig, P. (2006). *Intelligence artificielle.* Paris: Pearson Education.

Saarland, U. (2009). *ActiveMath Home*. Consulté le septembre 2009, sur ActiveMath: http://www.activemath.org/

Schneider, D. (2009, janvier 6). *Langage de modélisation pédagogique*. Consulté le septembre 3, 2009, sur edutechwiki: http://edutechwiki.unige.ch/fr/Langage_de_modélisation_pédagogique

Schoenfeld, A. H. (1998). Towards a theory of teaching-in-context. *Issues in Education* , 1–94.

Self, J. (1988). Bypassing the intractable problem of student modelling. *Intelligent Tutoring Systems*, (pp. 18-24). Montréal.

Self, J. (1999). The defining characteristics of intelligent tutoring systems research: ITSs care, precisely. *International Journal of Artificial Intelligence in Education , 10*, 350-364.

Self, J. (1999). The defining characteristics of intelligent tutoring systems research: ITSs care, precisely. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* , 350-364.

Sénéchal, M. (2006). *Etudes de phénomènes d'apprentissage pour les pilotes de ligne.* Grenoble: Master 2 Information, Cognition et Apprentissage. Université Pierre Mendès France.

Settouti, L. (2008). *Elaboration du modèle de l'apprenant à partir des traces issues d'EIAH.* Lyon: Master Connaissance et Raisonnement. Institut National des Sciences Appliquées (INSA).

Sharples, M., du Boulay, J., Teather, B., Teather, D., Jeffery, N., & du Boulay, G. (1995). The MR Tutor Computer based Training and Professional Practice. *Artificial Intelligence and Education*, (pp. 429-436). Washington.

Shute, V. (2007). *Focus on Formative Feedback.* Educational Testing Services. USA: Educational Testing Services.

Shute, V. (2009). Simply Assessment. *International Journal of Learning, and Media , 1* (2), 1-11.

Sleeman, D., Kelly, A., Martinak, R., Ward, R., & Moore, J. (1989). Studies of diagnosis and Remediation with High School Algebra Students. *Cognitive Science* , 551-568.

Slotta, J. D., & Linn, M. C. (2009). *WISE Science: Inquiry and the Internet in the Science Classroom.* . Teachers College Press.

Soury_Lavergne, S. (2003). *Baghera Assessment Project, designing an hybrid and emergent educational society* . Grenoble: Cahiers Leibniz.

Tahri, S. (1993). *Modélisation de l'interaction didactique. Un tuteur hybride sur Cabri-Géométre.* Grenoble: Thèse Université Joseph Fourier.

Tchounikine, P. (2002). Pour une ingénierie des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. *I3 Information Interaction Intelligence* , 59-95.

Tetchueng, J., Garlatti, S., & Laubé, S. (2009). MAT, un outil d'aide et d'accompagnement des enseignants dans la conception de scénario pour un EIAH. *Ingénierie des systèmes d'information* , 31-52.

Thouvenin, I. M. (2009). *Interaction et connaissance : construction d'une expérience dans le monde virtuel.* Compiègne: Université de Technologie de Compiègne.

Tomás, J.-L., Méritan, A., & Kostulski, K. (2007). *L'activité chirurgicale entre travail et métier : la question de la transmission du geste professionnel.* Rapport pour l'ONDPS, Ministère de la Santé.

Trausan-Matu, S., Dessus, P., Lemaire, B., Mandin, S., Villiot-Leclercq, E., Rebedea, T., et al. (2008, Dec 19). *D5.1: Writing support and feedback design.* Consulté le 22 2, 2009, sur 5. LN: Deliverables, Reports, Work Documents: http://dspace.ou.nl/handle/1820/1700

Trouche, L. (2003). *Construction et conduite des instruments dans les apprentissages mathématiques : nécessité des orchestrations.* Paris: Université Paris VII.

Ullrich, C. (2007). *Course Generation as Hierarchical Task Network Planning Problem.* Saarbrücken: Computer Science Department, Saarland University.

Ullrich, C., & Melis, E. (2009). Pedagogically Founded Courseware Generation based on HTN-Planning. *Expert Systems With Applications* , 9319--9332.

User Modeling, A. a. (2008). *User Modeling, Adaptation and Personalization.* Consulté le septembre 4, 2009, sur User Modeling, Adaptation and Personalization.: http://julita.usask.ca/UM/index.html

Vadcard, L. (2003). *A pedagogical strategy for VOEU.* Final Deliverable (35.07) of the VOEU European Project (IST-1999-13079),: http://vou-caos.vitamib.com/.

Vadcard, L. (2003). *Pedagogical strategy for VOEU, Final Deliverable.* European Union ProjectIST-1999-13079: http://vou-caos.vitamib.com/.

Vadcard, L., & L. V. (2005). Réduire l'écart entre formation théorique et pratique en chirurgie : conception d'un EIAH,. *Environnements informatiques pour l'Apprentissage Humain* (pp. 129-140). Montpellier : INRP.

Vadcard, L., & Luengo, V. (2005). Interdisciplinary approach for the design of a learning environment. *E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, and Higher Education.*, (p. 5 pages). Vancouver.

Vadcard, L., & Luengo, V. (2005). Réduire l'écart entre formation théorique et pratique en chirurgie : conception d'un EIAH,. *Environnements informatiques pour l'Apprentissage Humain* (pp. 129-140). Montpellier: INRP.

VanLehn, K. (1990). *The Origins of Procedural Misconceptions.* Canbidge, MA: MIT Press.

VanLehn, K., Schulze, K., Shapiro, J., Shelby, R., Taylor, L., Treacy, D., et al. (2005). The Andes Physics Tutoring System: Lessons Learned. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* , 147-204.

Varela, F. J., Thomson, E., & Rosch, E. (1993). *L'inscription corporelle de l'esprit.* Paris: Seuil.

Vergnaud, G. (1996). Au fond de l'action, la conceptualisation. Dans Barbier, *Savoirs théoriques et savoirs d'action* (pp. 275-292). Paris: PUF.

Vergnaud, G. (1991). La théorie des champs conceptuels. (L. P. Sauvage, Éd.) *Recherche en didactique des mathématiques* , 133-170.

Vergnaud, G. (2002). Piaget visité par la didactique. *Intellectica. Numéro spécial : Piaget et les sciences cognitives.* , 107-123.

Vu Minh, C., Luengo, V., & Vadcard, L. (2006). A Bayesian Network Based Approach for Student Diagnosis. *Information and Communication Technologies in Higher Education and Industry*, (p. 6 pages).

Vu Minh, C., Luengo, V., & Vadcard, L. (2007). A Framework for Building Intelligent Learning Environments in Illdefined domains. *Workshop AIED Applications in Ill-Defined Domains. Artificial Intelligence in education* (p. 5 pages). Los Angeles: Springer.

Webber, C., Pesty, S., & Balacheff, N. (2003). A two-level multi-agent architecture for a distance learning environment. Dans P. Aniorte, & S. Gouarderes, *Cognitique.* Toulouse: Cepadeus.

Webber, K. (2004). From Errors to Conceptions - An approach to Student Diagnosis. *Intelligent Tutoring systems* (pp. 710-719). Macéio, Alagoas: Springer-Verlag.

Webber, K. (2003). *Modélisation informatique de l'apprenant. Une approche basée sur le modèle ck¢ et la théorie de l'émergence.* Grenoble: Université Joseph Fourier.

Weil-Barais, A. (1994). *L'homme cognitif.* Paris: Presses Universitaires de France (PUF).

Woolf, B. P. (2009). *Building Intelligent Interactive tutors : student-centered strategies for revolutionizing e-learning.* Burlington, MA, USA: Elsevier.

www.educationaldatamining.org. (s.d.). *International Working Group on Educational Data Mining*. Consulté le juillet 2009, sur International Working Group on Educational Data Mining: http://www.educationaldatamining.org/