

TELEOS : de l'analyse de l'activité professionnelle à la formalisation des connaissances pour un environnement d'apprentissage

Vanda Luengo¹, Lucile Vadcard¹, Michel Dubois², Dima Mufti-Alchawafa¹

¹ Laboratoire CLIPS-IMAG, Equipe Arcade, Université de Grenoble, 385 rue de la Bibliothèque - B.P. 53 - 38041 Grenoble Cedex 9, <http://www-clips.imag.fr>, *@imag.fr

² Laboratoire LPS, 151 rue des universités - 38400 Saint-Martin d'Hères, http://www.upmf-grenoble.fr/LPS/0/fiche___laboratoire, Michel.Dubois@upmf-grenoble.fr

Résumé

L'article expose les fondements théoriques, la méthodologie et quelques illustrations du travail didactique d'analyse des connaissances et du système d'enseignement / apprentissage en milieu hospitalier (chirurgie orthopédique), ainsi qu'une partie de la formalisation informatique de cette connaissance. Cette modélisation permet la prise en compte dans l'environnement informatique de connaissances empiriques pour le diagnostic des connaissances de l'utilisateur en fonction des actions qu'il effectue à l'interface pendant la résolution d'un problème (pose de vis dans le bassin), et la prise de décision didactique qui suit : quelle réaction fournir pour affiner le diagnostic, et/ou permettre l'apprentissage souhaité.

Nous présentons ainsi l'analyse, le formalisme et la représentation des connaissances pour la production d'un EIAH (Environnement informatique pour l'apprentissage humain) en milieu professionnel.

Mots clés : Environnements informatiques pour l'apprentissage humain, prise de décisions, résolution de problèmes, didactique professionnelle.

1 Introduction

L'objectif de cet article est de présenter une méthodologie opérationnelle de conception d'Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. Cette méthodologie sera illustrée dans ce texte par un exemple de conception d'un EIAH destiné à la formation de chirurgiens orthopédiques novices à la pratique d'un geste chirurgical précis, le vissage percutané de la hanche. TELEOS, Technology Enhanced Learning Environment for Orthopaedic Surgery est un projet soutenu par le CNRS depuis 2003 pour trois années.

2 Fondements théoriques

2.1 Le milieu et le rôle de l'EIAH

Ce travail s'inscrit dans le paradigme de l'apprentissage humain accepté de façon dominante, le constructivisme. Le modèle initial de Piaget est fondamentalement un modèle de l'action fondé sur l'idée d'une évolution des structures mentales dans le cours de l'histoire de l'adaptation du sujet à son environnement. Mais depuis Piaget, le statut théorique même de l'environnement du sujet a changé, lui donnant une part plus essentielle dans la nature des connaissances construites, soit en analysant le rôle joué par les problèmes comme source de la connaissance comme le fait Vergnaud [15], soit en attribuant à l'interaction sociale et à la médiation du milieu un rôle majeur dans la nature des connaissances construites, comme le fait Brousseau dans la théorie des situations didactiques [3], soit encore en considérant l'influence des facteurs propres à l'environnement comme le fait le courant du *situated learning* [6]. Dans cette forme avancée du constructivisme, la connaissance n'est plus une propriété du seul sujet mais celle d'un complexe formé par le sujet, son environnement et leurs interactions. Le milieu pour l'apprentissage défini par Brousseau [3] est la composante épistémique de l'environnement du sujet. L'EIAH sera alors un élément de ce milieu au sein duquel est plongé l'apprenant.

3 Cadre du travail

3.1 Généralités médicales

Les fractures de la hanche peuvent être traitées sans chirurgie par une immobilisation en position allongée de deux mois avec une traction lourde, permettant au patient de poser le pied par terre trois mois après son accident.

Les traitements chirurgicaux de pose de vis pour maintenir l'os en position de reconstruction ont permis de réduire

le temps d'immobilisation à 45 jours. Deux type de chirurgie existent : à foyer ouvert ou percutanée c'est-à-dire sans incision. Le foyer ouvert permet de visualiser l'os et ainsi un meilleur contrôle de la trajectoire au niveau du point d'entrée osseux. Il entraîne cependant des risques d'infection, ainsi que des hématomes dus à la manipulation de certains muscles au cours de l'intervention. La chirurgie percutanée diminue considérablement ces risques. En revanche elle est plus délicate à effectuer puisque l'action est faite sans contrôle visuel direct. Le contrôle est alors effectué au moyen de radios qui sont prises au cours de l'action. Cette technique nécessite une très bonne connaissance de l'anatomie de la partie concernée, ainsi qu'une capacité de mise en correspondance des images radios avec l'espace du corps afin d'envisager la trajectoire de la broche (la pose de la broche est l'étape cruciale de cette technique, puisque c'est elle qui va guider la vis). C'est pourquoi l'entraînement du chirurgien à ce geste est primordial. Tonetti [13] explique que la plupart des premiers cas traités sont extra-osseux, c'est-à-dire incorrects et dangereux pour le patient. Un entraînement permettrait en outre de réduire le nombre de radios nécessaires au cours de l'intervention et ainsi de diminuer l'irradiation infligée au patient et à l'équipe médico-chirurgicale.

Un tel entraînement à ce geste doit s'inscrire dans le dispositif de formation hospitalier, que nous décrivons ci-après.

3.2 Formation, compagnonnage

En France, l'apprentissage de la chirurgie orthopédique requiert sept années de spécialisation, en plus des six années de formation médicale initiale. Il se compose d'une partie théorique qui permet d'acquérir des connaissances sur les indications et les contre-indications associées à chaque pathologie, et d'une partie pratique, qui se déroule selon différentes modalités d'enseignement comme le compagnonnage et les travaux pratiques en laboratoire d'anatomie. Parmi ces dispositifs le compagnonnage est une phase indispensable de l'apprentissage du métier, au cours de laquelle les connaissances opératoires qui permettent l'action en situation se construisent chez le novice. Ce mode d'apprentissage est basé sur l'observation de l'expert et l'acquisition progressive d'un savoir-faire. Durant l'opération l'apprenti chirurgien – l'interne – se place à proximité de l'expert, dans la zone stérile. Il peut ainsi observer de très près les actions entreprises par le chirurgien. Cela permet également au chirurgien, qui a la double responsabilité d'expert (il faut réussir l'opération) et d'enseignant (il faut former l'interne), de faire intervenir l'apprenant dans la réalisation du geste. Ces interventions sont d'une importance mesurée par l'expert, et qui s'accroît au fur et à mesure qu'avance la formation du novice. Si dans un premier temps l'expert peut lui demander de l'aider (tenir un outil, maintenir une position particulière du membre concerné), il l'incite ensuite de plus en plus à

réaliser certaines parties du geste en autonomie, mais sous son contrôle étroit. Ce type d'apprentissage nécessite une grande disponibilité de la part des experts puisque c'est un apprentissage qui se déroule en face à face, entre un interne et un expert. De plus, l'apprentissage est conditionné par les cas qui se présentent à l'hôpital. Un interne pourra n'avoir jamais rencontré une certaine pathologie. Enfin, elle n'est pas sans risque pour le patient qui se trouve impliqué dans une situation d'apprentissage.

Du point de vue du dispositif de formation hospitalier, la formation théorique médicale fournit à l'apprenant une masse importante de connaissances qui ont une valeur prédictive, non pas opératoire. Puis, lors du compagnonnage, les situations d'apprentissages ne sont pas construites à des fins didactiques mais existent de fait, en amont de l'intention d'enseigner. L'expert est ainsi placé au cours de chaque opération dans la double position d'expert et d'enseignant. Les connaissances qu'il transmet ne sont pas organisées pour l'apprentissage, mais dépendent du déroulement effectif de la situation. Il en résulte une difficulté pour l'apprenant qui doit intégrer des connaissances nouvelles et les structurer, tout ceci dans une situation stressante par nature [12,2].

Dans ce contexte, l'EIAH que nous présentons permettra aux internes de bénéficier d'une étape intermédiaire de formation. Cet environnement offre ainsi un espace de pragmatisme des connaissances théoriques, leur conférant une certaine valeur opératoire.

4 Notre modèle de référence

4.1 Le modèle ckç

Une de nos hypothèses de travail porte sur l'importance des contrôles dans la résolution de problèmes et pour l'apprentissage. Les contrôles sont des indicateurs de la conceptualisation des connaissances chez le sujet. Du point de vue de l'EIAH, nous allons donc chercher à repérer ces contrôles afin de nous en servir pour la production de rétroactions pertinentes pour l'utilisateur. Le modèle de formalisation des connaissances que nous adoptons reprend et étend le modèle des champs conceptuels proposé par Vergnaud [15]. Nous le choisissons pour deux raisons principales : il est adapté à notre hypothèse de travail concernant le rôle primordial des contrôles dans l'action ; il permet de rendre aisément computable l'analyse de la connaissance qui précède la formalisation. Ce modèle a été conçu dans l'optique interdisciplinaire du domaine des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain ; nous verrons ainsi qu'il rend possible un dialogue interdisciplinaire en rendant intelligible les modèles de la didactique pour les informaticiens. En conséquence ce modèle permet aux informaticiens de questionner le modèle de connaissances et aux didacticiens de questionner la représentation

informatique qui suit la formalisation. Ce modèle, intitulé *cké* [1], propose de décrire un état de connaissances comme un ensemble organisé de quadruplets P, R, L, Σ . P est un ensemble de problèmes, R un ensemble d'opérateurs, Σ un ensemble de contrôles et L l'ensemble des registres de représentations dans lequel sont exprimés les éléments précédents. La résolution d'un problème est donc un ensemble de pas de résolution qui s'expriment chacun sous la forme : « $\sigma(r(p(l))) = \text{vrai ou faux}$ », où σ, r, p , et l sont des éléments de P, R, Σ et L . Nous verrons plus précisément par la suite le fonctionnement de ce modèle.

5 Hypothèses de travail

5.1 La production des rétroactions épistémiques situées

Comme nous l'avons présenté dans notre cadre théorique, nous considérons qu'un EIAH fait partie du milieu, au sens didactique. La conception d'un EIAH pose alors le problème de la construction d'un contexte d'action, de la définition d'un domaine de validité de ce contexte, et de la production d'interactions pertinentes vis à vis de l'apprentissage.

Pour cela nous faisons donc l'hypothèse qu'il faudra définir un modèle des connaissances du domaine et un modèle des interactions possibles entre l'apprenant et le système.

Le modèle des interactions qui nous intéresse ici est uniquement relatif à la connaissance. Nous allons donc modéliser les interactions épistémiques vis-à-vis de l'objet d'apprentissage.

Ainsi, l'interaction se passe entre un sujet épistémique qui apprend, et un milieu épistémique qui met à la disposition des objets d'apprentissage et qui gère l'interaction.

La problématique principale réside ici dans l'analyse des productions d'un milieu qui soit capable de traiter des connaissances révisables, qui soit capable de réfuter et qui soit capable de progresser dans l'interaction vis-à-vis de ces connaissances.

Un environnement de cette nature ne peut pas contraindre celui qui apprend uniquement à des interactions produites par un modèle expert du domaine. Du point de vue de la connaissance notre hypothèse de travail est qu'il ne suffit pas de modéliser une connaissance pour l'enseigner. Du point de vue des EIAH, cela se traduit par le fait qu'il ne suffit pas de représenter la connaissance sous forme d'un système expert pour proposer un système d'apprentissage. Cela a été montré entre autres par Clancey [4] qui a construit un système d'apprentissage (Guidon) à partir d'un système expert de diagnostic en médecine (Mycin) et dont il a pu constater les problèmes de transposition.

Nous avons ainsi réalisé le choix fondamental de suivre le travail de l'apprenant sans avoir comme référence uni-

quement des solutions préalables. Cela nous a amenés à définir des moyens qui soient centrés sur l'activité propre à l'utilisateur et à son état de connaissance.

Avec ce choix, les interactions ne seront pas perturbées par des problèmes relatifs à une solution proposée par l'utilisateur et qui n'est pas connue par la machine ou inversement, par une solution connue par la machine et qui n'est pas comprise par l'utilisateur. Nous avons ainsi enlevé les contraintes d'interaction liées aux solutions préalablement construites par la machine, contraintes que nous avons montrées lors de travaux précédents [8].

Cela n'exclut pas l'utilisation d'un résolveur dans un système, mais il sera utilisé dans l'interaction non pour contraindre l'utilisateur à suivre la même résolution que celle prévue par la machine mais pour comprendre l'activité et gérer les rétroactions.

5.2 Le diagnostic et la prise de décision didactique

Dans le cadre de notre recherche, nous cherchons à concevoir un modèle qui permette l'automatisation de la production de rétroactions pertinentes vis-à-vis de l'objet d'apprentissage. Ces rétroactions doivent être générées à partir d'un état donné des connaissances d'un utilisateur lors de sa résolution de problème.

L'hypothèse est donc que pour calculer des rétroactions épistémiques nous avons besoin d'un modèle de connaissances du domaine, un modèle de diagnostic et un modèle de prise de décision, modèles qui nous permettent de calculer le diagnostic et la prise de décisions didactiques.

Pour modéliser ce type de décision, nous proposons quelques hypothèses basées sur l'analyse de la formalisation de la connaissance. Nos hypothèses prennent en compte l'existence de trois formes de connaissance, à savoir : déclarative, empirique et gestuelle.

Une hypothèse didactique que nous faisons, à partir de la nature des connaissances, est que les éléments empiriques seront mieux appropriés si les éléments déclaratifs associés à ces connaissances sont déjà acquis. Cela implique donc que si nous diagnostiquons plusieurs connaissances non acquises et que parmi celles-ci il y a des connaissances déclaratives, nous faisons le choix de traiter d'abord ces connaissances déclaratives.

Par ailleurs et du point de vue des EIAH, la machine peut avoir différents rôles non mutuellement exclusifs [14] :

- 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.

A partir de cette classification nous avons fait l'hypothèse que les connaissances déclaratives, de par leur forme, seront traitées dans des outils de présentation de l'information (Web sémantique) alors que les connaissances empirique seront abordées dans des environnements d'aide à la résolution de problèmes (Simulateurs et base de cas cliniques).

6 Méthodologie

La méthodologie proposée est appliquée aux domaines de la didactique professionnelle où des connaissances empiriques, peu formalisées et construites au cours de l'action, sont identifiées. Dans la suite nous allons l'illustrer avec l'enseignement en chirurgie orthopédique, mais nous travaillons également dans le domaine de l'apprentissage des pilotes de ligne.

Nous présentons dans la suite l'analyse des connaissances faite grâce à un travail en didactique et psychologie cognitive. Cette analyse doit aboutir sur une formalisation (§*Formalisation*) qui permettra de les représenter (§6.2) et de faire des calculs sur ces connaissances (§*La prise de décision*).

6.1 Identification des connaissances

Analyse psycho-ergonomique

L'analyse cognitive débute par une analyse psycho-ergonomique des expertises chirurgicales. L'objectif principal de cette phase est d'analyser l'activité opératoire chirurgicale, lors d'un vissage sacro-iliaque percutané, afin de recueillir les connaissances et compétences nécessaires à mettre en œuvre pour réaliser ce type d'intervention. Nous avons plus spécifiquement étudié le traitement de l'information effectué par le chirurgien lors de phases d'actions représentatives de l'activité opératoire globale. L'acquisition des données s'est déroulée en plusieurs phases. A partir de la réalisation d'une première vidéo portant sur la réalisation d'un vissage sacro-iliaque par un chirurgien débutant sous le tutorat d'un chirurgien expert nous avons formalisé le déroulement d'une intervention réelle, listé les différentes tâches à effectuer et noté les différents contrôles de l'action. Pour ne pas perturber la situation de travail, la méthode de recueil de données utilisée est celle de l'« observation assistée » [7]. Nous avons ensuite filmé une seconde intervention. Nous avons pu compléter les données de la première vidéo en utilisant plusieurs moyens. Une caméra numérique a permis d'enregistrer l'enchaînement réel des tâches exécutées lors du vissage sacro-iliaque. Cet enregistrement vidéo s'est surtout focalisé sur les gestes des chirurgiens et sur les différentes actions entreprises par les chirurgiens (acquisition de radiographies par exemple). Un micro cravate placé sur le chirurgien apprenant, a permis de recueillir l'ensemble des

échanges avec le chirurgien formateur. Nous avons aussi procédé à l'enregistrement sur des disquettes des radiographies prises lors de l'intervention. Les clichés pris au cours d'une intervention pouvant être très nombreux il n'a pas été matériellement possible de tout récupérer. Nous avons donc effectué un choix des clichés en collaboration avec les chirurgiens en fin d'intervention, sachant que nous récupérerons les clichés de bonne qualité, et significatifs des réussites et des échecs au cours de l'intervention.

Les recueils précédents ont permis de formaliser les différentes phases et le détail des phases permettant la réalisation de l'activité chirurgicale. Nous avons aussi retranscrit l'ensemble des dialogues entre le chirurgien expert et le chirurgien débutant ainsi que les gestes exécutés. A l'aide de ces différents éléments, nous avons pu construire un arbre des tâches, représentant à la fois les procédures prescrites issues de l'analyse documentaire et les activités réelles extraites de la vidéo de l'opération ainsi que des dialogues. Les radiographies ont pu, également, être insérées dans l'analyse.

Trois séquences chirurgicales ont alors été sélectionnées pour faire l'objet d'une étude approfondie : repérer le point d'entrée cutané, insérer une broche guide et pousser la broche guide. Ces trois séquences sont représentatives de la complexité de l'opération chirurgicale du vissage sacro-iliaque. Nous avons identifié des périodes de film pour les présenter aux chirurgiens afin de faire approfondir verbalement les données recueillies et permettre d'accéder aux raisonnements des chirurgiens. Les chirurgiens apprenants et chirurgiens experts ont été interrogés sans contrainte de temps. Des relances systématiques (pourquoi, comment) ont permis de faire expliciter le plus possible les raisonnements mis en œuvre. Les questions se rapportant à la représentation spatiale ont rapidement conduit les chirurgiens à expliquer leur raisonnement à partir d'une pièce osseuse réelle. Nous avons aussi assisté la verbalisation consécutive à l'aide de supports (croquis représentant le sacrum suivant les différentes incidences, diaporama formalisant les séquences sélectionnées décomposées en tâches et sous tâches).

Formalisation

Les éléments de connaissance identifiés lors de la phase précédente sont ensuite organisés de manière formelle afin de permettre un traitement ultérieur par un système informatique.

Ainsi nous produisons dans cette étape de formalisation les données suivantes.

- Un ensemble de problèmes qui sont définis en fonction de leurs variables didactiques (une variable didactique est un élément du problème qui, s'il varie, modifie les processus de résolution envisageables pour le problème). Nous décrivons également un ensemble d'états potentiels du problème (puisque chaque action effectuée sur le problème en cours de résolution le modifie). Les variables didacti-

TELEOS : Analyse et formalisation d'un EIAH en chirurgie.

ques que nous utilisons sont : le type de fracture, la qualité de l'os (un os peut être plus ou moins dense, ce qui modifie la stratégie de vissage), la tâche demandée (déterminer une trajectoire ou en valider une donnée), la nature du repère cutané donné (pour pouvoir agir sans incision, le chirurgien marque au feutre sur la peau du patient des repères, qui peuvent être de différentes natures). Les états du problème, que l'on appelle variables de situation, sont relatives à la position de la broche sur chacune des incidences radios disponibles, à la position de la broche par rapport aux contours osseux du bassin, aux zones anatomiques critiques (les racines nerveuses) et à la ligne médiane du corps (ligne imaginaire séparant le corps en deux parties selon le plan vertical). Ces variables de situation sont identifiées grâce aux traces des actions fournies par le simulateur, et permettent de connaître l'état du problème au cours de la résolution. Cette information est cruciale dans l'élaboration de notre modèle de connaissances, on le verra plus tard.

- Un ensemble d'opérateurs, qui sont les actions que l'utilisateur a la possibilité d'entreprendre au cours de la résolution du problème. Cet ensemble est lié aux actions que le simulateur autorise à l'interface. Cependant, ce simulateur ayant été conçu pour offrir une grande fidélité épistémique avec l'activité opératoire réelle du chirurgien, les actions possibles sont cohérentes avec la pratique. Les opérateurs sont décrits par des verbes : choisir un point d'entrée, choisir une orientation, enfoncer la broche, prendre une radio, valider, recommencer. Cet ensemble décrit les possibilités de l'utilisateur mais ne préjuge pas de la suite de ses actions, qui sera une combinaison de ces items.

- Un ensemble de contrôles, décrits sous forme de règles (si...alors) ou de prédicats (affirmation). Ces contrôles sont des éléments de connaissance, et peuvent être de nature déclarative ou empirique. Nous décrivons également des contrôles que nous qualifions d'importés, en ce sens qu'ils correspondent à des connaissances qui n'ont pas de domaine de validité dans le cadre de notre problématique, mais qui en ont en dehors. Par exemple, une correspondance 2D/3D issue de la vie courante et d'autres types de situations orthopédiques (si la trajectoire est trop haute sur la radio, alors elle est trop haute sur le corps du patient). Les contrôles de nature déclarative sont ceux qui sont explicités dans des cours ou des articles, et ainsi relativement consensuels. Par exemple « si la broche passe en dessus de la corticale antérieure de l'aileron sur l'outlet, alors elle lèse le tronc lombo-sacré », ou « la trajectoire de la broche doit rester strictement intra-osseuse ». Les contrôles empiriques sont ceux que nous avons pu identifier au cours de l'observation des interventions chirurgicales et des entretiens d'explicitation. Ces contrôles correspondent à des connaissances qui se sont forgées en cours d'action chez l'expert. Elles ont une valeur d'usage et non une valeur d'échange, et sont ainsi difficilement explicites. Par exemple, « si l'orientation de la broche risque de la faire

sortir vers le canal sacré sur l'inlet, alors c'est qu'elle est trop orientée vers les pieds du patient ».

- Enfin, nous établissons une mise en correspondance des trois 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). Nous donnons ci-dessous un aperçu de cette mise en correspondance :

PB	R	choisir point	choisir orient	enfoncer	prendre profil	prendre inlet
Σ						
$\Sigma 1$	X					
$\Sigma 2$			X			
$\Sigma 3$						X
$\Sigma 3bis$						X
$\Sigma 4$						X
$\Sigma 5$					X	
$\Sigma 6$						
$\Sigma 6bis$						
$\Sigma 7$					X	
$\Sigma 8$						X
$\Sigma 8bis$						X
$\Sigma 9$						X
$\Sigma 9bis$						X
$\Sigma 10$						
$\Sigma 11$						
$\Sigma 55$					X	
$\Sigma 12$	X					
$\Sigma 13$	X					
$\Sigma 14$	X (e1PB)					X (e1PB)
$\Sigma 15$	X (e2PB)					X (e2PB)

Figure 1 – un tableau de correspondances

Dans la figure 1 on retrouve, pour le problème nommé PB, les opérateurs R (choisir point d'entrée, choisir orientation, etc..) et les contrôles Σ , désignés par des numéros. Ainsi, nous pouvons voir que dans la famille de problèmes PB, le contrôle $\Sigma 1$ peut être mise en jeu lors de la résolution de l'opérateur « choisir point d'entrée ». Les contrôles sont des règles, généralement écrites sous la forme de « si...alors », comme par exemple $\Sigma 1$ qui décrit le contrôle sur l'action (choisir point d'entrée) de la façon suivante : *si les repères cutanés tracés sont les projections du sacrum, alors le point d'entrée cutané se situe dans le quadrant dorso-cranial*. Les contrôles inscrits sur fond blanc sont de nature déclarative, ceux sur fond gris sont de nature empirique. Les croix indiquent le domaine de validité des contrôles, relativement au problème donné (ici PB) et aux opérateurs. Par exemple, le contrôle 14 est relatif à la correspondance entre la position de la broche sur la radio inlet et sa position dans le corps du patient : « si la broche est située vers le bas sur l'inlet, alors elle est située vers le ventre du patient ». Ainsi, son domaine d'application concerne l'opérateur « prendre une radio inlet » et « choisir un point d'entrée ». De plus, ce contrôle s'applique lorsque la position de la broche sur l'inlet a un sens au niveau de la résolution du problème, c'est-à-dire quand la variable de situation « position de la broche sur inlet » a une valeur.

En l'état actuel du projet, nous avons identifié une centaine de contrôles, une trentaine de variables de situations et nous nous sommes centrés sur 4 problèmes. Le paragra-

pe suivant décrit le traitement de cet ensemble organisé d'éléments de connaissances.

6.2 Traitement : réseaux bayésiens

L'ensemble organisé des connaissances du domaine est formalisé à l'aide de l'ensemble des problèmes, contrôles et opérateurs décrit antérieurement. Nous avons défini les relations de dépendance et de causalité entre ces ensembles afin de les représenter sous forme d'un réseau bayésien. Nous identifions dans la **Figure 2** les relations de dépendances suivantes : un problème P est résolu si les opérateurs associés R sont appliqués d'une manière valide. Un opérateur R est appliqué d'une manière valide si les contrôles Σ associés et utilisés lors de la résolution de problème P sont valides.

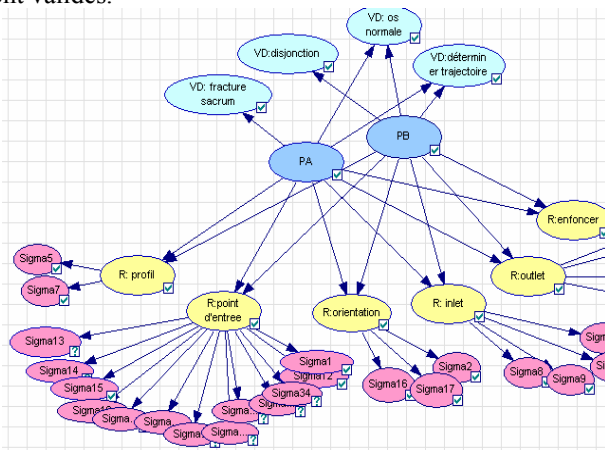


Figure 2 - le réseau des conceptions

L'avantage essentiel des réseaux bayésiens [11] est de permettre une formalisation d'un domaine de connaissance sous forme de graphe causal. Ce réseau permet également d'intégrer une notion d'incertitude dans le système, à partir d'une approche quantitative.

Le réseau permet de diagnostiquer la connaissance mobilisée lors de la résolution de problème avec un certain degré d'incertitude. Ainsi, un contrôle Σ est valide si les traces des actions de l'apprenant lors de la résolution sont cohérentes par rapport au contexte du problème P. Actuellement le diagnostic permet de déduire l'état des contrôles utilisés lors de la résolution du problème (valide ou non) en fonction, d'une part, du contexte du problème et, d'autre part, des actions de l'utilisateur dans l'interface de l'environnement d'action (le simulateur de vissage sacro-liaque). Le résultat de ce diagnostic est rendu sous forme de probabilité sur les contrôles utilisés (Figure 3).

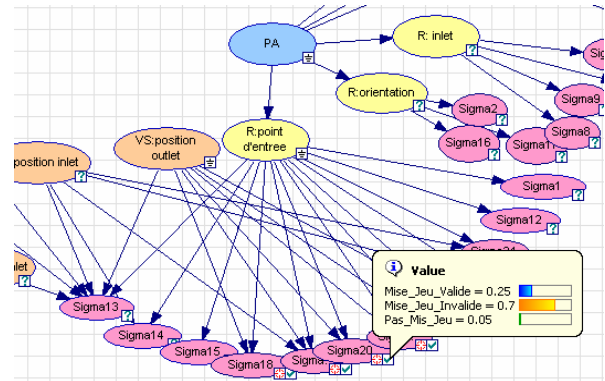


Figure 3 - calcul du diagnostic

Par rapport au réseau de connaissances initialement présenté, nous ajoutons donc un type nœud que nous appelons VS (variable 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 (**Figure 3**).

Ces contrôles seront pris en compte pour la prise de décisions que nous verrons plus en détail dans la suite.

La prise de décision

Du point de vue informatique, et pour la conception du modèle informatique qui prend des décisions didactiques concernant le type et le contenu des rétroactions, nous situons notre problématique de recherche essentiellement dans les domaines de la représentation de la connaissance et l'analyse de décision.

Dans une première étape nous identifions deux décisions:

- La décision concernant le sujet de la rétroaction (choisir l'élément de la connaissance en jeu qui sera l'objet de la rétroaction),
- La décision concernant la forme de la rétroaction (choisir la forme la mieux adaptée pour transmettre un élément de connaissance).

Ces deux décisions seront les entrées d'une deuxième étape de décision. La deuxième étape formule la rétroaction en choisissant son contenu à partir de ces deux entrées (§Choix de la formulation de la rétroaction).

Ainsi, par exemple, si le système a décidé de produire une rétroaction sur un contrôle déclaratif, il faut décider de la référence au cours qui sera la plus appropriée ; ou si le système a décidé de produire une rétroaction sur un contrôle empirique il faut également décider quel est le meilleur problème à donner à l'utilisateur pour remédier à la difficulté identifiée.

Pour faire un modèle calculable de la prise de décision nous avons donc décidé d'utiliser les diagrammes

d'influence dans les réseaux bayésiens [14]. Nous avons ainsi rajouté encore deux nœuds qui sont les nœuds d'utilité et de décision. Nous obtenons un graphe avec une structure particulière (diagramme d'influence) comme celui présenté ici (Figure 4). Nous verrons le calcul d'utilité dans la suite.

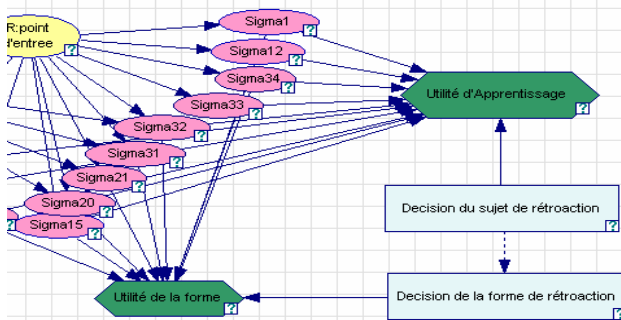
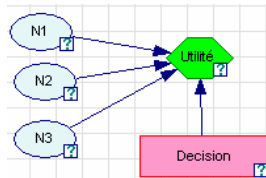


Figure 4 – la représentation de la prise de décision

Le choix du sujet de la rétroaction et sa forme

Dans la représentation du diagramme d'influence le nœud de l'utilité a comme entrée les nœuds d'incertitudes (chance nodes) et le nœud de la décision. Ce nœud contient un tableau avec les valeurs correspondantes à l'utilité de chaque décision pour chaque ensemble possible des valeurs des nœuds des chances. Prenant par exemple trois nœuds de chance N1, N2 et N3 qui ont deux valeurs possibles (state0 et state1) et un nœud de décision qui prend deux valeurs D1 et D2 dans ce cas le tableau de l'utilité aura la forme suivante :



Decision	D1		D2	
	State0N1	State1N1	State0N2	State1N2
N1				
N2	State0N2	State1N2	State0N2	State1N2
N3	State0N3	State1N3	State0N3	State1N3
Value	10	-22	30	-5
			12	25
				-3

Figure 5- calcul de l'utilité

Pour modéliser le calcul d'utilité à propos de l'objet de la rétroaction (l'objet de connaissance dont on a décidé qu'il sera sujet de la rétroaction), il faut prendre en compte plusieurs facteurs. Ces facteurs sont construits à partir de l'analyse didactique. Ils vont permettre d'ajouter ou d'enlever des poids (ou d'importance) lors de la procédure de la prise de décision pour soutenir ou affaiblir les possibilités de choix. Les facteurs que nous présentons dans la suite sont proposés selon l'ordre de leur importance pour le calcul de l'utilité :

1. L'état de l'objet de connaissance en jeu (mis en jeu d'une manière valide, mis en jeu d'une manière invalide, pas mis en jeu),

2. Le type de l'objet de connaissance en jeu (empirique, déclaratif ou hors domaine de connaissances),
3. L'ordre de l'apparition de l'objet de connaissance en jeu dans la résolution de problème, autrement dit, l'ordre de l'opérateur qui lie cet objet de connaissance,
4. La nature de l'objet de connaissance lors de la résolution de problème : est ce qu'il est simple (intervient dans la résolution du problème en générale) ou contextuel (intervient dans la résolution d'un état particulier du problème).

Ainsi, pour chaque élément de connaissance « ei » nous calculons l'utilité de le considérer comme sujet de rétroaction (décision) en fonction des états des autres éléments de connaissance. Le calcul d'utilité ainsi proposé est le suivant :

$$(1) U_{app}(D=ei | E) = U_{etat}(ei | E) + U_{car}(ei) ;$$

E est l'ensemble des éléments de connaissance du modèle. Ici nous considérons que le choix d'un élément de connaissance comme sujet de rétroaction ei sera influencé par : ses caractéristiques Ucar(ei) et son diagnostic vis-à-vis des autres, c'est-à-dire la probabilité que cet élément a été mis en jeu lors du diagnostic en prenant en compte les probabilités des autres.

Ainsi, l'état de connaissances de l'utilisateur concernant les autres contrôles influence le choix de la forme de rétroaction. Par exemple si l'objectif de la rétroaction est de vérifier l'apprentissage d'un contrôle en particulier et que au même temps, il existe d'autres contrôles dans l'état « incertain » alors nous considérons qu'il est plus utile de donner à l'utilisateur un autre problème orienté vers l'apprentissage de ce contrôle au lieu de lui demander de travailler sur l'état incertain des autres contrôles.

Pour affiner plus le choix nous calculons Ucar(ei) comme l'utilité correspondante aux caractéristiques de chaque élément. Ucar(ei) est donc calculé à partir du type d'élément de connaissance (déclaratif, empirique, hors domaine), l'ordre dans lequel il est apparu dans la résolution (calculé grâce aux opérateurs) et sa nature (simple ou contextuel).

$$(2) U_{car}(ei) = U_{type}(ei) + U_{ordre}(ei) + U_{nature}(ei)$$

Une fois calculée l'utilité, nous pouvons appliquer l'inférence dans ce diagramme. Ce qui donne comme résultat le choix des éléments de connaissance (les contrôles) à prendre en compte pour la rétroaction.

Pour la prise de décision de la forme de la rétroaction, il faut avoir le résultat de la décision précédente et prendre en compte essentiellement trois facteurs selon un ordre d'importance :

1. L'état de l'élément de connaissance (acquis, pas acquis, incertain),

2. Le type de l'élément de connaissance (empirique, déclaratif),
3. La forme de l'élément de connaissance (simple ou contextuel).

A ce niveau, il y a des prises de décisions concernant le sujet et la forme de la rétroaction. Cette étape donnera donc comme résultat la forme de rétroaction (partie du cours à consulter, problème à résoudre dans le simulateur ou cas clinique à consulter).

Cette décision permettra au modèle informatique à un autre niveau de décision de formuler la rétroaction. Par exemple si à ce niveau la décision est d'envoyer à l'apprenant un autre problème à résoudre visant l'apprentissage d'un contrôle (Σ), alors il faut à un autre niveau décider quel est le bon problème à renvoyer à l'utilisateur. Nous expliquons cette dernière étape dans la suite.

Choix de la formulation de la rétroaction

Dans ce niveau nous étudions comment formuler la rétroaction en fonction de son sujet (par exemple le prise de radio inlet) et de sa forme (déclarative ou empirique). Plus précisément nous définissons les facteurs et les procédures nécessaires pour le choix du contenu de la rétroaction. Nous avons identifié ci-dessus trois formes possibles de rétroaction. Étant donné que la procédure de formulation de la rétroaction varie selon sa forme, nous définissons par la suite la décision pour le choix du contenu de la rétroaction en fonction de chaque forme possible.

Première forme, consulter le cours :

Pour formuler cette rétroaction le modèle informatique doit trouver dans le réseau de croyance (qui représente la connaissance chirurgicale) l'opérateur qui lie l'élément de connaissance (contrôle) choisi comme sujet de rétroaction. La « décision » demande alors au « cours en ligne » d'envoyer à l'utilisateur l'ensemble de pages qui expliquent le contrôle déclaratif identifié.

Nous pouvons en voir un exemple dans la **Figure 6**.

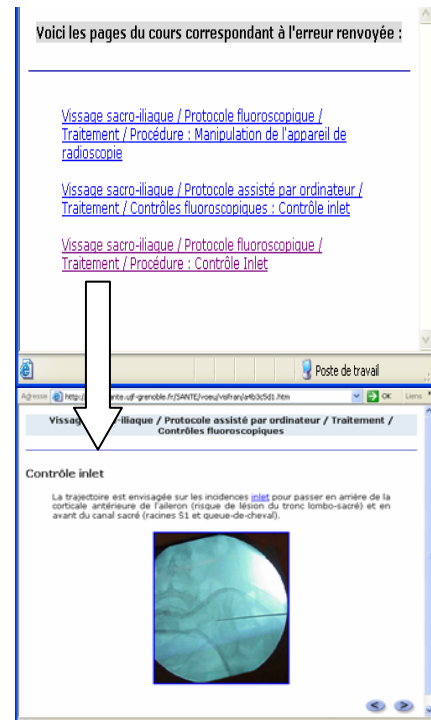
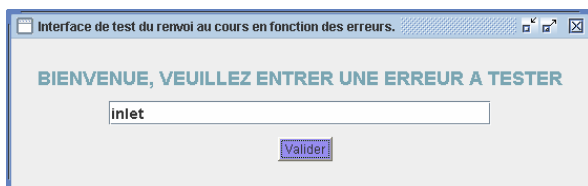


Figure 6 – exemple de rétroaction déclarative

Ainsi pour illustrer nous présentons une première fenêtre de teste où on rentre l'opérateur associé au contrôle diagnostiqué (dans notre cas c'est l'opérateur prise de radio inlet). Ensuite dans la deuxième fenêtre nous avons un ensemble de liens pertinents qui vont être calculés à partir d'une ontologie et d'un moteur de recherche [9]. Enfin l'utilisateur pourra choisir parmi l'ensemble des liens celui qui lui semble le plus approprié (troisième fenêtre). La proposition d'une liste de liens sur les pages pertinentes se fait grâce à un module WEB sémantique qui est composé d'un ensemble d'ontologies liées entre elles (décrites en OWL), une ensemble de pages HTML (avec des meta-données liées à l'ontologie) et un moteur de recherche [9].

Deuxième forme, consulter un cas clinique :

Pour formuler cette rétroaction il faut décider du cas clinique qui est le plus adapté vis-à-vis de l'objet de la rétroaction. Le cas clinique peut être présenté sous forme d'un exemple pour renfoncer un élément de connaissance ou sous forme d'un contre-exemple pour réfuter un élément de connaissance incohérent par rapport au contexte.

Autrement dit pour choisir entre exemple ou contre-exemple, il faut prendre en compte le type du sujet de la rétroaction et l'historique de la rétroaction. Le cas clinique à envoyer à l'utilisateur doit dans tous le cas être similaire au problème en cours de résolution (nous donnerons plus de précisions sur la notion de similarité plus loin).

Dans l'état actuel du projet nous n'avons pas encore développé cette partie.

Troisième forme, résoudre un autre problème :

Pour formuler cette rétroaction il faut choisir un autre problème similaire au problème résolu et dans lequel l'objet de connaissance de la rétroaction intervient, soit pour déstabiliser cette connaissance, soit pour la renforcer.

Ainsi pour le choix du problème le plus pertinent à renvoyer, le modèle informatique doit trouver un problème similaire au problème actuel. Dans la formalisation de la connaissance que nous proposons le contexte du problème se représente sous forme de variables didactiques (§0).

Les valeurs de ces variables définissent les différents problèmes. Deux problèmes sont similaires si la plupart de ses variables didactiques ont les mêmes valeurs. Nous définissons donc une mesure de similarité entre deux problèmes par le nombre des variables didactiques qui ont les mêmes valeurs dans les deux problèmes.

La recherche d'un problème similaire dans le réseau de croyance a besoin d'un seuil de similarité, des valeurs de variables didactiques pour le problème actuel, ainsi que des critères qui orientent la recherche (le sujet de la rétroaction et son objectif). Nous travaillons actuellement sur cet aspect.

7 Validations

7.1 Points de vue informatique et didactique

Nous présentons dans cette section les différentes validations liées au projet, en cours ou à venir.

Du point de vue hospitalier, la validation du système se fera par des tests pratiques de vissages sacro-iliaques pratiqués sur des bassins humains en conditions réelles (l'interne pourra donc prendre les radios nécessaires à la bonne réalisation de ce geste). Nous partagerons une cohorte d'internes n'ayant jamais pratiqué ce geste en deux groupes. Un groupe suivra les explications classiques précédant un vissage sacro-iliaque (consultation du fascicule de formation, explications orales du chirurgien expert, illustrées par la manipulation d'une pièce osseuse sèche). Un autre groupe utilisera notre système un certain temps. Nous procéderons à une comparaison de la qualité des trajectoires obtenues (intra ou extra osseuses, présence de lésions critiques...).

Du point de vue didactique, il nous importe de valider le diagnostic et la prise de décision. Les expérimentations mises en place à cet effet pourront être du type magicien d'Oz. Nous pourrions ainsi valider de manière indépendante les deux composants auprès des chirurgiens experts et des didacticiens.

Du point de vue informatique, la validation est centrée sur la notion de complétude pour les interactions et d'adéquation de la représentation vis-à-vis du modèle.

Nous travaillons actuellement sur la validation de notre représentation sous forme de réseau bayésien ainsi que des algorithmes de calcul de l'utilité. Nous construisons une expérimentation avec laquelle nous pourrions valider auprès des experts (didacticiens et médecins formateurs) les différents facteurs considérés, l'ordre de ces facteurs ainsi que leur poids.

Ensuite, si la représentation est validée nous travaillerons sur l'optimisation des algorithmes pour la prise de décision pour le versant informatique et sur l'analyse des formes de rétroaction pour le versant didactique.

8 Conclusion, l'EIAH proposé et ses interactions

Ainsi, dans l'état actuel du projet, deux types de connaissances sont prises en compte, les connaissances empiriques et les connaissances déclaratives. Alors que les connaissances déclaratives sont formalisées et consensuelles, les connaissances empiriques sont des connaissances en acte, qui interviennent dans la résolution de problèmes. Ces connaissances empiriques sont en partie explicites, mais restent validées par des moyens empiriques. Les formes de ces connaissances nous ont conduit à formaliser les connaissances déclaratives (partagées, explicites) avec une ontologie [9] et les connaissances empiriques (non monotones, incomplètes) avec les réseaux bayésiens. Les outils d'apprentissage ne sont pas non plus les mêmes (**Figure 7**): pour le premier type de connaissance nous utilisons les hypermédias (Web sémantique) et pour le second les simulateurs. Ainsi selon le diagnostic la rétroaction fera référence aux connaissances déclaratives et enverra sur une partie précise de l'hypermédia ou fera référence aux connaissances empiriques et enverra sur la résolution d'un nouveau problème dans le simulateur. Le choix des formes des rétroactions est calculé.

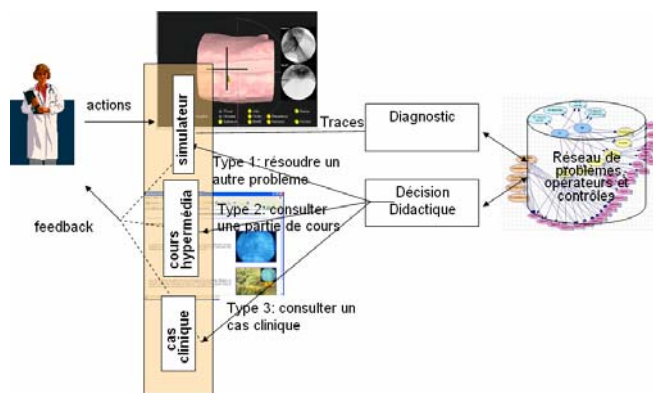


Figure 7- l'architecture et l'environnement

Du point de vue de l'architecture nous séparons le diagnostic de la prise de décision pour pouvoir les étudier et

les valider séparément [10]. La condition pour qu'ils fonctionnent est sous-jacente au modèle : le diagnostic doit pouvoir identifier les contrôles qui sont intervenus dans une résolution, la prise de décision doit se faire en fonction des contrôles identifiés. La méthodologie adoptée permet un réel travail pluridisciplinaire dans les différents composants de cette architecture.

Du point de vue du processus d'enseignement / apprentissage, l'environnement permet aux internes de travailler la mise en oeuvre de leurs connaissances déclaratives et d'identifier au cours des interactions avec le système des éléments de connaissances empiriques. Cette caractéristique est directement issue des choix que nous avons fait au niveau de l'identification des connaissances et de leur formalisation.

D'un point de vue hospitalier enfin, ce projet intéresse les praticiens de deux points de vue. Le premier est lié à la problématique de l'enseignement de leur discipline. Comme nous l'avons montré, cet environnement offre un terrain d'application des connaissances sans problème de coût humain d'encadrement ni de déontologie. En outre, les chirurgiens sont à la fois experts et enseignants. Ces deux aspects de leur métier peuvent bénéficier de la mise en place d'une méthodologie d'analyse de leurs pratiques du point de vue de l'action et de la validation. Mieux comprendre leur geste pour mieux le transmettre ; mieux analyser le déroulement d'une opération en vue de l'évaluation par des pairs de techniques novatrices.

Les perspectives actuelles que nous offre ce projet sont d'appliquer le même type de méthodologie et le même modèle de formalisation des connaissances dans deux contextes différents. Tout d'abord, nous travaillons à la conception d'un EIAH dans un autre contexte de formation professionnelle, celui des pilotes de ligne d'une compagnie aérienne [5]. Par ailleurs, nous souhaitons identifier et formaliser les connaissances gestuelles associées au geste chirurgical déjà traité dans TELEOS, en interaction avec les connaissances déclaratives et empiriques déjà identifiées.

Références

- [1] N. Balacheff, Conception, propriété du système sujet/milieu, *Actes de la VIIème école d'été de didactique des mathématiques*, Noiralise R., Perrin-Glorian M.-J. (Eds), Clermont-Ferrand : IREM de Clermont-Ferrand, p. 215-229, 1995.
- [2] A. Bisseret, Représentation et décision experte – Psychologie cognitive de la décision, Toulouse, Octarès, 1995.
- [3] G. Brousseau, *Théorie des situations didactiques*, Grenoble, La Pensée Sauvage éditions, 1998.
- [4] W. J. Clancey, « GUIDON », *Journal of Computer-Based Instruction*, vol. 10, n°1, p. 8-14, 1983.
- [5] S. Larrieu, L. Vadcard, V. Luengo, Didactical approach for the design of a learning environment for airline pilots, European Research Workshop on Understanding and Rethinking the Technology-mediated workplace, Liège, Belgium, October 26– October 28, 2005
- [6] J. Lave, *Cognition into practice*, Cambridge University Press, 1988.
- [7] J. Leplat, L'activité psychologique de l'activité en ergonomie: aperçu sur son évolution, ses modèles et ses méthodes, Toulouse : Octarès, 2000.
- [8] V. Luengo, N. Balacheff, « Contraintes informatiques et environnements d'apprentissage de la démonstration en mathématiques », *Sciences et Technologies Educatives*, 5, p. 15-45, 1998
- [9] V. Luengo, L. Vadcard, Design of adaptive feedback in a web educational system. *Workshop on Adaptive Systems for Web-Based Education: Tools and Reusability*, In *12th International Conference on Artificial Intelligence in Education*, Amsterdam, 2005.
- [10] D. Mufti-Alchawafa, V. Luengo, L. Vadcard, Architecture d'un environnement d'aide à l'apprentissage de la chirurgie orthopédique, Conférence des Technologies de l'Information et de la Connaissance dans l'Enseignement Supérieur et l'Industrie, TICE 2004, 20-22 octobre 2004, Compiègne, France, 2004
- [11] P. Naïm, P.H. Willemin, P. Leray, O. Pourret, A. Becker, Réseau Bayésien, Paris, Eyrolles, 2002.
- [12] D.A. Schön, Le praticien réflexif : à la recherche du savoir caché dans l'agir professionnel, Montréal: Éditions Logiques, 2004
- [13] J. Tonetti, Réalisation d'outils de réalité augmentée – Apprentissage, Simulation et Guidage de gestes en chirurgie du bassin. *Thèse de l'Université Joseph Fourier Grenoble 1*, 2003.
- [14] P. Tchounikine, Pour une ingénierie des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, *Revue I3*, 2, p. 59-95, 2002.
- [15] G. Vergnaud, La théorie des champs conceptuels, *Recherches en Didactique des Mathématiques* 10(2/3) 133/169, 1991.
- [16] R. Winkler, *Introduction to Bayesian Inference and Decision*. Eds. Probabilistic Publishing. ISBN 0-9647938-4-9, 2003

Les auteurs tiennent à remercier le CNRS de son soutien à nos travaux dans le cadre du programme TCAN (Traitement des Connaissances, Apprentissage et NTIC), ainsi que le service d'orthopédie et de traumatologie du CHU de Grenoble pour son accueil et son optimisme dans la réalisation de ce projet.