

Architecture d'un environnement d'aide à l'apprentissage de la chirurgie orthopédique.

Dima Mufti Alchawafa, Vanda Luengo, Lucile Vadcard

Laboratoire CLIPS/IMAG, 385 rue de la Bibliothèque,

Domaine Universitaire, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

Dima.Mufti-Alchawafa@imag.fr, Vanda.Luengo@imag.fr, Lucile.Vadcard@imag.fr

Résumé

Dans cet article, nous présentons le composant didactique et pédagogique d'un EIAH (Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain) pour la chirurgie orthopédique. Nous étudions l'architecture logicielle de ce composant, qui sera ajouté comme couche d'apprentissage sur un outil de simulation de planification d'une trajectoire de vis. Enrichir cet outil permettra à l'apprenant de l'utiliser pour acquérir l'expérience de la prise de décision chirurgicale pour la planification du vissage (la partie procédurale de l'acte chirurgical).

Nous modélisons les connaissances chirurgicales avec le modèle de connaissance $ck\zeta$, afin de les intégrer dans l'architecture du composant. Cette architecture représente la connaissance sous forme d'agents et sera basée sur un modèle de diagnostic «Emergence de diagnostic par formation de coalition», déjà utilisé pour un EIAH en géométrie. Nous proposons une extension du modèle de diagnostic, afin de l'adapter au domaine de la chirurgie.

Mots clés : EIAH, Didactique, Chirurgie, Modélisation de la connaissance, Représentation de la connaissance, Diagnostic de la connaissance.

Abstract

In this paper we present a part of an orthopaedic surgery-learning environment which is its didactical component. We study the architecture of this component, who will be added like a learning level plugged to a tool for simulation of planning of screwing trajectory. Enrich this tool will allow the student to use it in order to acquire the experience of the surgical decision-making for the planning of screwing (procedural part of the surgical act).

We model surgical knowledge with the knowledge's model $ck\zeta$, in order to integrate it in the architecture of the component. This architecture represents knowledge as agents and will be based on a model of diagnosis called "Emergent diagnosis via coalition formation", already used for a learning environment in geometry. We then propose an extension of the model of diagnosis, in order to adapt it to the field of surgery.

Keywords : Learning system, Didactic, Surgery, Knowledge modelling, Knowledge representation, Diagnosis of knowledge.

Introduction

Dans cet article nous présenterons l'architecture d'un EIAH (environnement informatique pour l'apprentissage humain) qui a comme objectif principal d'améliorer l'enseignement de la chirurgie orthopédique. Notre travail fait suite à un projet européen VOEU (université virtuelle pour l'apprentissage de la chirurgie orthopédique, <http://voeu.vitamib.com/>) dans lequel un travail didactique sur l'apprentissage en chirurgie avait été mené.

Dans le cadre du projet VOEU, des outils pour la chirurgie assistée par ordinateur ont été développés. Par la suite, les didacticiens du domaine ont proposé d'enrichir ces outils afin de les utiliser comme outils d'aide à l'enseignement. Dans ce cadre, notre objectif est la production d'un modèle et d'une représentation informatique avec des contraintes issues de l'analyse de la connaissance du domaine. Ainsi, nous voulons réaliser cet objectif de manière à enrichir, du point de vue de l'apprentissage, un outil de la simulation de la planification d'une trajectoire de vis afin de préparer l'intervention. Plus précisément, les résultats de notre travail permettront le développement d'un outil pour aider l'apprenant à acquérir l'expérience de la prise de décision chirurgicale pour la planification du vissage.

Du point de vue des EIAH, nous nous appuyons sur l'approche de Self (1995) sur le modèle constructiviste qui considère que la construction de la connaissance sera réalisée par l'interaction de l'apprenant avec le système. Plus précisément, le système ne guide pas l'apprenant vers une solution précise (la solution optimale) mais il interagit avec lui en lui laissant construire sa solution dans une situation d'apprentissage précise. Dans notre travail, l'environnement laissera à l'apprenant la liberté d'agir dans une situation d'apprentissage. L'identification de la connaissance sera effectuée par l'application d'un diagnostic de la connaissance à partir des activités de l'apprenant. Ensuite l'environnement générera pour l'apprenant une rétroaction pertinente par rapport aux résultats du diagnostic, de manière à permettre à

l'apprenant d'acquérir lui-même l'expérience. Notre objectif est que la rétroaction soit une rétroaction de validation liée à la connaissance (Luengo 1999). Autrement dit, les rétroactions générées seront pertinentes et cohérentes par rapport aux connaissances de l'apprenant qui sont mobilisées lors de la résolution d'une situation d'apprentissage.

Le composant didactique et pédagogique, objet de notre article, a comme rôle le diagnostic de la connaissance. Pour concevoir l'architecture, nous prendrons en compte la particularité de la connaissance chirurgicale (la nature et la structure) ainsi que le fonctionnement de l'outil logiciel de planification.

Dans les paragraphes suivants, nous présenterons tout d'abord le contexte de travail, en particulier les caractéristiques de la connaissance chirurgicale, l'outil de simulation de planification et l'environnement d'apprentissage. Ensuite, nous présenterons successivement plusieurs phases de l'étude, afin de pouvoir intégrer la connaissance chirurgicale dans le composant didactique et pédagogique.

1. Contexte Et Problématique

1.1 La connaissance chirurgicale

Selon l'étude didactique de la chirurgie qui a été faite dans le cadre du projet VOEU, les connaissances mobilisées lors de la pratique chirurgicale sont classifiées en trois types (Vadcard 2003), à savoir déclaratives, opérationnelles et procédurales.

Les connaissances déclaratives sont formalisées et consensuelles, comme par exemple, les connaissances de l'anatomie et de la thérapie. Elles peuvent être transmises à l'apprenant dans un contexte habituel d'enseignement (livre, transparent du cours, site Internet, etc.). De plus, pour un problème donné à l'apprenant, les caractéristiques des solutions sont connues et déterminées a priori.

Les connaissances opérationnelles représentent la partie perceptivo-gestuelle. Par exemple, la dextérité, la coordination oeil main et les habiletés spatiales. Elles ne peuvent pas être complètement exprimées. L'enseignement de ce type de connaissance a lieu par la pratique, aussi bien pour la transmission que pour l'évaluation.

Les connaissances procédurales sont les connaissances situées au niveau de la prise de décision chirurgicale. Elles représentent la partie intermédiaire entre les deux autres parties de la connaissance, déclarative et gestuelle, et elles sont partiellement explicites et exprimées. Nous pouvons ainsi dire que l'exemple suivant est en rapport à la connaissance procédurale : la décision d'une trajectoire de vis comme dans la Figure 1 pour une fracture du bassin.

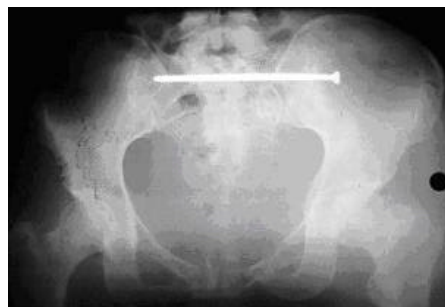


Figure 1 : Une trajectoire d'une vis pour une fracture du bassin.

La prise de décision chirurgicale est composée de trois facteurs principaux représentés dans la Figure 2. Le premier facteur est la pathologie qui représente les indications théoriques. Par exemple quel type de vissage le chirurgien pourrait appliquer pour ce type de fracture. Un deuxième facteur à prendre en compte est l'aspect lié au patient, par exemple les contre-indications (âge du patient, qualité des os, etc.). Finalement, l'environnement hospitalier qui se représente, entre autres, par le matériel disponible à l'hôpital ainsi que l'expérience de l'utilisation de ce matériel par le chirurgien.

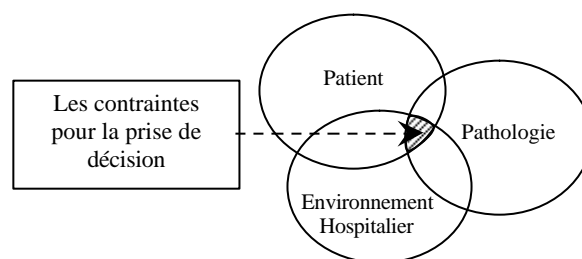


Figure 2 : Les trois facteurs principaux qui influencent la connaissance procédurale (Vadcard 2003)

Autrement dit, les connaissances procédurales sont influencées par les connaissances déclaratives mises en jeu dans la décision chirurgicale. Pour cette raison, il faut des moyens empiriques pour acquérir l'expérience de ce type de connaissances. De plus, l'évaluation d'une connaissance procédurale (décision chirurgicale) est effectuée en vérifiant si la décision chirurgicale prise a respecté les contraintes du cas clinique (l'état du patient, la pathologie, l'anatomie, etc.).

1.2 La stratégie de l'apprentissage

Notre étude porte sur une partie d'un environnement complet d'apprentissage de la chirurgie orthopédique qui traitera les parties déclarative, procédurale et gestuelle de l'acte chirurgicale. Nous précisons l'objectif de cet article qui est d'envisager une architecture d'un environnement d'aide à l'apprentissage de la partie procédurale des connaissances chirurgicales en nous appuyant sur une approche constructiviste.

L'idée proposée est de concevoir un environnement qui génère à l'apprenant des situations d'apprentissage, de manière à lui permettre de prendre des décisions chirurgicales afin d'acquérir une expérience. De plus, pour favoriser l'apprentissage, le composant didactique et pédagogique de l'environnement génère à l'apprenant des rétroactions de validation liées aux connaissances qu'il a mobilisées dans la situation d'apprentissage (Luengo 1997).

Pour comprendre le composant didactique et pédagogique, nous présenterons d'abord le logiciel de planification qui a été développé dans le cadre du projet VOEU pour la chirurgie assistée par ordinateur. Ce logiciel permet au chirurgien de planifier la trajectoire d'une vis pour un cas clinique particulier (selon les informations du dossier du patient, qui représentent sa situation médicale).

1.2.1 Le logiciel de simulation de la planification du vissage

Le logiciel a été développé par l'équipe GMCAO (Gestes Médico-Chirurgicaux Assistés par Ordinateur) du laboratoire TIMC/IMAG (Vadcard, Troccaz et Martin 2002). Il permet la planification d'une trajectoire de vissage en chirurgie orthopédique, et il contient trois étapes :

La première étape est la création d'un modèle à trois dimensions de l'os du patient, à partir des images scanner de son corps.

La deuxième étape, qui nous intéresse dans notre étude, est la planification de la trajectoire d'une vis (Figure 3). Cette étape permet au chirurgien de déterminer, dans deux plans, deux points selon trois dimensions. Ces deux points représentent le début et la fin de la vis. Cette étape permet ensuite la visualisation de la position de cette vis dans le modèle tridimensionnel de l'os du patient (différentes vues sont possibles).

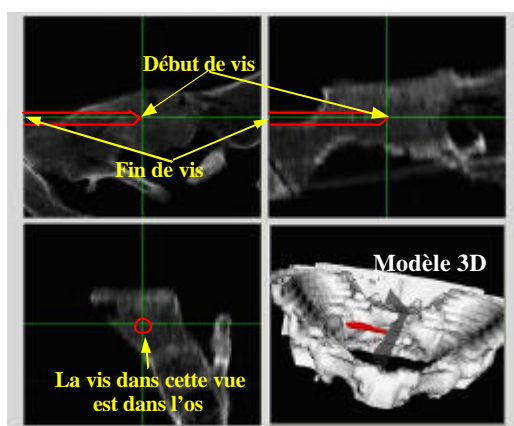


Figure 3 : l'étape de planification du logiciel.

La troisième étape est effectuée pendant l'intervention. Elle permet au chirurgien de déterminer la trajectoire réelle de la vis en fonction de la trajectoire planifiée.

Dans la suite nous présentons le travail que nous avons effectué lors de notre stage de DEA sur la représentation des connaissances chirurgicales et le diagnostic des connaissances lors des actions de l'apprenant sur ce logiciel (Mufti-Alchawafa 2003).

1.3 L'environnement d'apprentissage

Notre travail était donc de construire une partie d'un environnement informatique d'apprentissage de la chirurgie orthopédique. La Figure 4 représente un schéma général d'interaction de cet environnement.

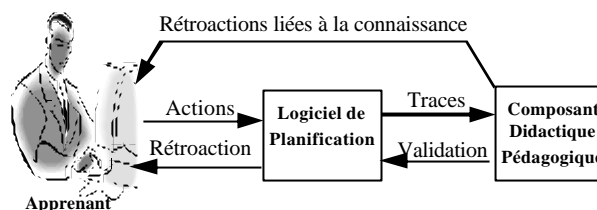


Figure 4 : Schéma d'interaction entre les différents composants de l'environnement d'apprentissage de la chirurgie.

A partir des actions de l'apprenant sur l'interface du logiciel de planification pour une situation d'apprentissage, le composant didactique et pédagogique récupère les traces significatives des actions de l'apprenant afin d'en déduire les connaissances chirurgicales mobilisées dans cette situation. L'identification de la connaissance permet ensuite la génération des rétroactions de validation liées à la connaissance chirurgicale mise en jeu.

Par conséquent, les rôles du composant didactique et pédagogique sont :

- Le diagnostic des connaissances chirurgicales mises en jeu, à partir des traces de l'activité de l'apprenant lors de la résolution de problème. C'est cette étude que nous avons effectuée, pendant notre stage de DEA (Mufti-Alchawafa 2003), en prenant en compte l'existence des autres rôles du composant.
- L'évaluation des connaissances basée sur les résultats du diagnostic et la situation d'apprentissage.
- La génération des rétroactions de validation liées aux connaissances de manière à favoriser l'apprentissage, à partir de l'évaluation du résultat du diagnostic.

2. Méthodologie

Pour permettre au composant didactique et pédagogique de réaliser ses trois rôles, il est nécessaire que nous intégrions les connaissances chirurgicales concernant la planification du vissage dans le composant.

Nous continuerons donc notre étude, en commençant par l'identification des connaissances chirurgicales

relatives au vissage vertébral. Cela permettra par la suite à les formaliser pour pouvoir enfin les intégrer dans l'environnement de l'apprentissage à l'aide de la représentation informatique de la connaissance modélisée.

2.1 Identification de la connaissance chirurgicale pour le vissage vertébral

La nature et la structure de la connaissance chirurgicale sont, pour nous, des contraintes de modélisation et de représentation informatique. Ainsi, nous démarrons l'étude par l'identification des connaissances chirurgicales mobilisées pour une planification du vissage. Pour simplifier la présentation de problématique, nous spécifions notre étude pour la planification du vissage vertébral. La Figure 5 représente une stratégie pour ce type de vissage ; au début, il y a la prise des points de repères et puis la détermination de la trajectoire de la vis.

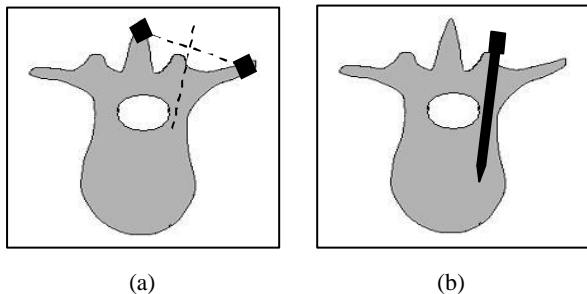


Figure 5 : (a) représente les points de repères essentiels pour déterminer le point d'entrée et la trajectoire d'une vis dans la vertèbre. (b) montre la position de la vis dans la vertèbre.

La planification de la trajectoire d'une vis est une décision chirurgicale. Cette décision est influencée par les indications du cas clinique (situation d'apprentissage). Ainsi, comme nous l'avons dit, la planification d'une trajectoire est une connaissance procédurale influencée par les connaissances déclaratives en jeu.

Nous classifions les connaissances chirurgicales mobilisées pour une planification du vissage vertébral en quatre types de connaissance :

- Pathologie : les connaissances déclaratives liées au type de maladie.
- Morphologie : les connaissances déclaratives liées à la spécificité du patient.
- Anatomie : les connaissances déclaratives liées à l'anatomie de la partie du corps en jeu.
- Planification : les connaissances déclaratives et procédurales qui sont liées à la vis et sa position dans l'os.

Nous avons établi les dépendances hiérarchiques existant entre ces quatre types de connaissance (Mufti-Alchawafa 2003). En conséquence de ces dépendances, nous devrions vérifier si les contraintes posées par les quatre types de connaissance (la pathologie, la morphologie, la partie déduite de l'anatomie et la

planification) sont respectées pour la validation de la planification.

Considérons comme exemple un cas clinique (les informations de pathologie et de morphologie) d'une fracture dans la colonne vertébrale chez une femme de 30 ans. Les informations de ce cas permettent d'abord de déterminer que les connaissances anatomiques concernées sont les parties liées aux vertèbres. Puis pour valider une planification dans ce cas, il faut vérifier les contraintes du type : la densité de la vertèbre supporte la taille et le diamètre de vis, il n'y a pas de lésion des nerfs qui entourent la vertèbre en jeu, la stratégie du vissage répond au cas clinique, la trajectoire planifiée de la vis est intra-osseuse (la vis ne sort pas de l'os), etc.

2.2 Modélisation de la connaissance

Pour l'évaluation de l'acquisition de la connaissance chirurgicale, nous ne souhaitons pas comparer la planification faite par l'apprenant avec la planification faite par l'expert. D'une part, en raison de notre cadre théorique sur l'apprentissage, car cette comparaison ne nous permettra pas d'avoir des rétroactions de validation dont nous souhaitons (l'évaluation de la planification dans le cas de la comparaison serait du « vrai ou faux »). D'autre part, parce que dans le domaine chirurgical, il n'y a pas qu'une solution optimale (pour chaque situation il y a un ensemble de solutions valides). C'est pourquoi nous ne souhaitons choisir ni des modèles qui ont la comparaison comme stratégie d'évaluation, ni des modèles qui représentent un apprenant idéal à des problèmes précis.

Notre choix du modèle de la connaissance est la conséquence des contraintes posées par l'analyse de la connaissance dans le domaine chirurgical. Nous avons cherché *un modèle qui permet de spécifier la connaissance sous forme d'éléments déclaratifs autonomes et qui fasse la liaison entre ces différents éléments afin de construire la connaissance procédurale*. Les contraintes sur le choix du modèle, sont les résultats de notre étude liée au domaine de la didactique de la chirurgie (Vadcard 2003).

D'abord, l'existence des relations hiérarchiques entre plusieurs types de connaissance (pathologie, morphologie, anatomie et planification) pour la validation d'une planification. Puis, pour la planification du vissage, les connaissances mobilisées sont des connaissances déclaratives et procédurales. Donc, pour formaliser une connaissance procédurale, il faut modéliser les connaissances déclaratives qui représentent les facteurs principaux qui influencent cette connaissance procédurale. De plus, la raison pour laquelle les connaissances déclaratives doivent être sous forme d'éléments autonomes, est qu'elles peuvent intervenir dans la construction de plusieurs connaissances procédurales en même temps.

Le respect des contraintes expliquées ci-dessus nous a mené à considérer l'approche de la théorie des

champs conceptuels (Vergnaud 1990), «*Un champ conceptuel : un ensemble de situations dont le traitement implique un ensemble de schèmes, concepts et théorèmes, en étroite connexion, ainsi que les représentations langagières et symboliques susceptibles d'être utilisées pour les représenter*». Autrement dit, un concept prend son sens dans des situations d'une grande variété, et une situation ne s'analyse pas à l'aide d'un seul concept mais d'un ensemble.

Cette approche se présente dans notre étude par le choix d'un modèle qui ne modélise pas des concepts d'une manière statique. Nous avons ainsi choisi de modéliser la connaissance chirurgicale avec le modèle ckç (Balacheff 1995). Il permet la modélisation d'un champ conceptuel sous forme d'un ensemble de situations dans lesquelles le concept intervient, et d'un ensemble de schèmes et d'invariants opératoires susceptibles d'être mis en œuvre pour traiter ces situations. Autrement dit, le modèle ckç permet de modéliser la connaissance mobilisée par l'apprenant et des situations d'apprentissages de ces connaissances, sous forme de conceptions en référence à un concept donné.

Selon ckç, une conception C est définie par un quadruplet C (P, R, L, S), dont les éléments sont :

- P est un ensemble de problèmes sur lequel C est opératoire,
- R est un ensemble d'opérateurs qui résout les problèmes P,
- L est un système de représentation permettant d'exprimer les éléments de P et R,
- S est une structure de contrôle qui assure la non-contradiction de C.

Ainsi, tous les éléments du quadruplet peuvent contribuer à la caractérisation de plusieurs conceptions.

Prenons comme exemple, «une conception du vissage vertébral» qui pourrait être :

- P : le problème de positionner une vis dans une vertèbre, en prenant en compte le cas clinique,
- R : les connaissances théoriques sur le geste du vissage vertébral (les points de repères, la trajectoire de vis), les connaissances anatomiques de la vertèbre (la structure de la vertèbre, les nerfs qui passent autour de la vertèbre), etc.,
- L : la représentation graphique (imagerie médicale), la représentation en langage naturel,
- S : des critères de validation de la trajectoire (trajet intra-osseux, trajet centré au niveau du pédicule), etc.

2.3 Représentation de la connaissance

Des contraintes s'imposent pour une représentation informatique appropriée à la connaissance chirurgicale du vissage vertébral. Comme nous l'avons indiqué plus

haut (en étudiant la nature et la structure de la connaissance chirurgicale), la connaissance chirurgicale est dynamique. Cela nous amène à l'exigence de concevoir une représentation informatique dynamique. Ainsi, cette représentation doit donner la possibilité de représenter la connaissance déclarative sous forme d'éléments autonomes et de les associer pour construire la connaissance procédurale.

De plus, la représentation informatique doit permettre l'utilisation ultérieure de la connaissance pour faire le diagnostic. Ce diagnostic sera effectué à partir des actions que l'apprenant a effectuées lors d'une situation d'apprentissage.

Comme nous n'avons pas trouvé en chirurgie des EIAH basés sur l'ensemble des contraintes décrites, nous avons fait le choix d'adapter le modèle «Emergence de diagnostic par formation de coalition» (Webber et Pesty 2002) pour le domaine chirurgical. Ce modèle est utilisé dans un EIAH de géométrie (<http://www-baghera.imag.fr/>), il représente la connaissance sous forme d'agents.

2.3.1 Le modèle « Emergence de diagnostic par formation de coalition »

Ce modèle a été développé, dans le cadre des EIAH, pour un environnement informatique pour l'apprentissage en géométrie (Webber et Pesty 2002). Il permet l'attribution à l'apprenant d'un ensemble de «conceptions» (au sens du modèle ckç), à partir de l'observation de son activité sur l'interface d'un logiciel. Le diagnostic, dans ce modèle, se base sur la combinaison de plusieurs approches et principes, à savoir le diagnostic émergent, les agents, le modèle ckç, la théorie du vote et la formation de coalition.

En simplifiant, dans ce modèle l'idée essentielle du diagnostic de la connaissance est celui du diagnostic émergent (Maxion 1990). Dans cette approche, il existe deux niveaux : un niveau macro qui contient les symptômes à surveiller, et un niveau micro qui contient les éléments observables de l'environnement. Ainsi le diagnostic sera la reconnaissance du symptôme à partir des éléments observables. Du point de vue des agents, il existe deux niveaux d'agents (micro et macro) pour faire le diagnostic qui est, dans ce cas, le résultat émergent de l'activité interactive des agents d'un niveau micro. Ce résultat est interprété par des agents spécialisés d'un niveau macro.

Dans ce modèle de diagnostic, étant donné que les connaissances à intégrer dans l'environnement d'apprentissage sont modélisées à l'aide du modèle ckç, les conceptions sont représentées par les agents au niveau macro, et tous les éléments du quadruplet ckç sont représentés par les agents au niveau micro. Ces derniers agents observent les activités de l'élève afin de faire le diagnostic, en lui attribuant un ensemble de conceptions. La Figure 6 représente cette approche.

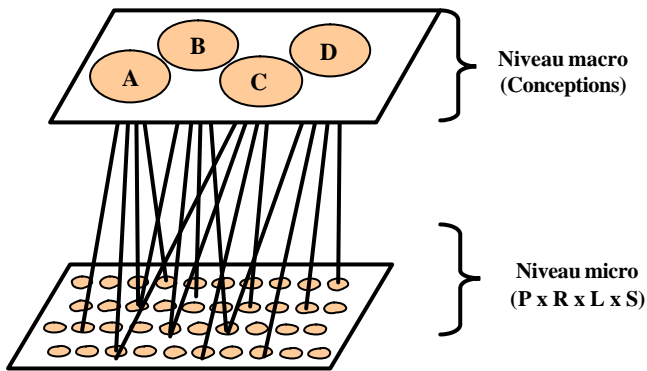


Figure 6 : Une approche émergente pour le diagnostic de conceptions (Webber et Pesty 2002).

Enfin, l'approche de la théorie du vote et de la formation de coalition représente la tâche du diagnostic. Ils modélisent une simulation d'élections (Schreiber 2000). Cette simulation est effectuée par la formalisation des candidats et des électeurs sous forme d'agents, puis l'obtention du consensus dans un processus de négociation, afin de prendre une décision du groupe des agents.

Plus précisément, les agents au niveau macro représentent les candidats et les agents au niveau micro représentent les électeurs. En simplifiant, 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 identifié pour ce changement, il se place dans l'espace de question et participe au vote. Chaque agent représentatif donne son avis sous forme d'un vecteur de vote pour tous les candidats. La dimension du vecteur est le nombre des candidats pour l'élection. Par exemple les valeurs suivantes [1, 0, 0, 1] d'un vecteur de vote d'un agent, indique qu'il y a quatre conceptions candidates pour le problème donné et 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 question, 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.

Prenons comme exemple, en simplifiant, les différentes trajectoires de planification qui peuvent être appliquées par l'apprenant pour le vissage vertébral (Figure 7.a). Nous modélisons quatre conceptions [C1, C2, C3, C4] pertinentes à ces trajectoires. Lors de la planification, si l'apprenant acquies le point de repères pour la trajectoire selon la figure (Figure 7.b), alors l'agent représentant de l'opérateur liée aux points de

repères, vote pour C1 et C4. Donc, son vecteur du vote (avis) sera [1, 0, 0, 1].

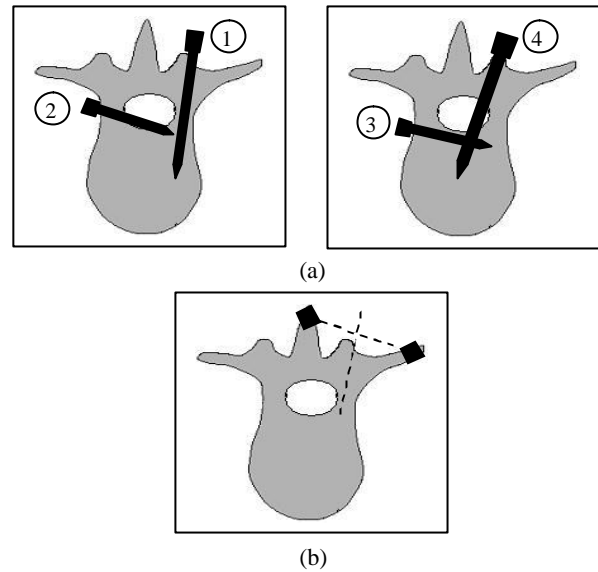


Figure 7 : (a) Différentes trajectoires peuvent être appliquées par l'apprenant. (b) les points de repères acquis.

Ce modèle de diagnostic a été développé dans le cadre de l'apprentissage de la géométrie. Nous avons voulu vérifier s'il peut être satisfaisant pour l'apprentissage de la chirurgie. Cette vérification nous amène à comparer la nature et la structure de la connaissance entre les deux domaines, ainsi qu'à comparer les contraintes posées par chaque domaine pour l'évaluation (validation de l'acquisition de la connaissance).

2.3.2 Géométrie Vs Chirurgie

Nous identifions plusieurs différences entre les domaines de la géométrie et de la chirurgie, en particulier pour le diagnostic de la connaissance de l'apprenant. En géométrie les connaissances représentées pour une situation d'apprentissage sont des connaissances déclaratives liées seulement à la géométrie. Ainsi, pour l'évaluation de la solution de l'élève, le système de diagnostic identifie (déduit) la conception mobilisée par l'élève pour résoudre cette situation d'apprentissage. Puis il évalue la validité de la conception mobilisée pour le problème donné.

En revanche, dans le domaine chirurgical, les connaissances représentées pour une situation d'apprentissage de planification du vissage, sont des connaissances déclaratives et procédurales liées à la pathologie, la morphologie, l'anatomie et la planification. Par conséquent, pour l'évaluation d'une planification, il n'est pas suffisant d'identifier uniquement les conceptions liées à la planification, Il est aussi nécessaire d'identifier les conceptions liées à la situation d'apprentissage ; autrement dit l'ensemble des conceptions liées aux connaissances déclaratives.

Ainsi il faut, pour l'évaluation de la planification, que le système de diagnostic analyse le regroupement des conceptions déduites. Cette analyse doit permettre

au système d'identifier l'absence des erreurs de l'apprenant au niveau des connaissances déclaratives, avant d'évaluer les connaissances procédurales qui les utilisent. Par exemple, pour valider la trajectoire d'une vis, il n'est pas suffisant de diagnostiquer qu'elle est intra-osseuse, il faut que le système diagnostique aussi si l'apprenant a choisi la bonne solution de vissage pour la situation proposée.

La différence entre ces deux domaines montre la nécessité d'adapter le modèle du diagnostic à la particularité du domaine chirurgical. L'adaptation doit permettre au système de distinguer deux niveaux de diagnostic selon le type de connaissance (procédurale ou déclarative), afin de différencier le type d'interaction avec l'apprenant en fonction des résultats du diagnostic. Par exemple, dans le cas d'une erreur au niveau déclaratif, cette interaction peut consister à diriger l'apprenant vers un web sémantique, qui lui expliquera la connaissance déduite par le système comme étant la source de l'erreur. Dans le cas d'une erreur au niveau procédural, l'interaction peut être la génération d'une autre situation d'apprentissage servant de contre exemple. Par exemple si le système a déduit une erreur procédurale de type «l'apprenant, pour planifier une deuxième vis dans une vertèbre, a utilisé la conception symétrique de la première vis» dans ce cas là (la conception «symétrie» fautive pour cette situation, bien qu'elle apparaisse vraie dans le cas où la vertèbre est symétrique), le système redirigera l'apprenant vers une situation dans laquelle la vertèbre n'est pas symétrique. Cela pour permettre à l'apprenant d'invalidier par lui-même l'usage de cette conception «symétrique» (Mufti-Alchawafa 2003).

Ainsi, l'adaptation du modèle de diagnostic doit permettre de détecter les erreurs liées à la connaissance déclarative avant celles qui sont liées à la connaissance procédurale. Cette contrainte de développement répond à la nature de la connaissance procédurale. En effet, les connaissances procédurales emploient les connaissances déclaratives et il n'est pas possible de les évaluer s'il existe des erreurs au niveau déclaratif.

2.3.3 Le développement

Dans l'objectif d'adapter le modèle de diagnostic, afin de permettre de capter et différencier les erreurs au niveau procédural et/ou déclaratif, nous proposons la création d'un masque informatique (forme de filtrage) (Mufti-Alchawafa 2003). Ce masque est ensuite appliqué pendant le diagnostic sur le vecteur résultant du vote afin de distinguer les erreurs de type déclaratif ou procédural.

Plus précisément, nous voulons, à l'aide du masque, distinguer deux niveaux de diagnostic de la connaissance. Le premier niveau permet l'identification des erreurs de l'apprenant liées à la connaissance déclarative. Par exemple, le système du diagnostic, dans ce niveau, va déduire que la théorie de vissage appliquée par l'apprenant est fautive dans cette

situation. L'absence d'erreur à ce niveau signifie que le système n'a pas identifié d'erreur liée à la connaissance déclarative. Ceci permet ensuite au système l'évaluation de la connaissance procédurale, dans un deuxième niveau du diagnostic.

Notre masque sera appliqué sur le vecteur du vote. Il est sous forme d'un vecteur de même dimension que le vecteur de vote (la dimension est le nombre de conceptions représentées pour la situation d'apprentissage). Chaque dimension représente une conception, qui prend une des trois valeurs : 0, 1 ou x. Dans le masque, la valeur «1» représente une conception dont la présence est prévue dans le vecteur résultant du vote pour une situation d'apprentissage et la valeur «0» représente une conception dont la présence n'est pas prévue. Enfin, la valeur «x» représente une conception liée à la connaissance procédurale. Dans ce cas, il n'est pas possible de déduire, avant la planification, la présence ou l'absence de cette conception dans le vecteur résultant du vote. Par exemple le système ne peut pas prévoir, avant la planification, qu'une conception représente une trajectoire de vis fautive. La Figure 8 montre un exemple du masque.

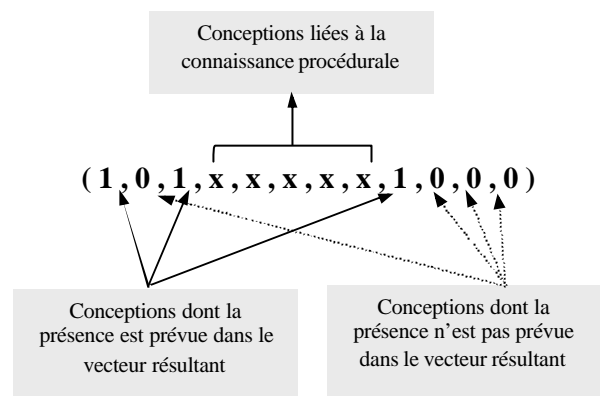


Figure 8: un exemple du masque.

Pour la construction du masque, le système applique une analyse «a priori» (avant la planification) de la situation d'apprentissage (Mufti-Alchawafa 2003). Cette analyse permet de spécifier les connaissances déclaratives pertinentes à une situation d'apprentissage, pour ensuite calculer les valeurs prévues des conceptions liées à ces connaissances dans le vecteur du vote.

Prenons pour exemple une situation d'apprentissage représentant une fracture dans la colonne vertébrale au niveau des lombaires. Le système peut prévoir, dans le vecteur résultant du vote, la présence de conceptions qui représentent la théorie de vissage pour cette situation, ainsi que l'absence de conceptions liées à une théorie de vissage dans les vertèbres cervicales. En revanche, il ne peut pas prévoir l'absence ou la présence de conceptions liées à la position de la vis dans l'os (la vis sort de l'os ou pas).

L'application du masque sera effectuée par le système pendant la phase de diagnostic de la planification (Mufti-Alchawafa 2003). D'abord le système récupère les traces des actions de l'apprenant sur le simulateur pour une situation d'apprentissage. Ces traces créent un changement dans l'environnement, ce qui permet de lancer le vote. Les agents représentatifs du niveau micro participent au vote et donnent leur avis sous forme d'un vecteur. Ensuite pour identifier les erreurs au niveau déclaratif, le système analyse le résultat de la comparaison des valeurs des conceptions dans le masque avec les valeurs correspondantes dans le vecteur de vote. Si le système déduit qu'il y a des erreurs au niveau déclaratif, il envoie à l'apprenant une rétroaction pertinente par rapport à ses erreurs. Sinon il lance l'analyse pour le diagnostic au niveau procédural. Dans ce niveau, le système analyse le regroupement des valeurs de toutes les conceptions dans le vecteur résultant du vote, afin de donner l'information à une autre partie de l'environnement d'apprentissage, qui prendra la décision qui concerne la rétroaction de validation liée à la connaissance.

Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté l'architecture informatique de l'environnement qui traite la partie procédurale. Les connaissances chirurgicales, à intégrer dans l'environnement, sont modélisées par le modèle de connaissance $ck\zeta$. Nous avons vérifié que ce modèle satisfaisait les contraintes posées par la connaissance dans le domaine chirurgical.

L'architecture de l'environnement est basée sur un modèle de diagnostic «Emergence de diagnostic par formation de coalition» utilisé en géométrie. Nous avons proposé d'enrichir ce modèle afin de l'adapter aux caractéristiques de la connaissance chirurgicale. L'adaptation permet au modèle de distinguer deux niveaux de diagnostic, liés au type de connaissance (déclarative ou procédurale).

Ce travail est une partie d'un projet plus vaste de création d'un environnement informatique pour l'apprentissage de la chirurgie orthopédique, concernant les trois facettes de l'acte chirurgical (déclarative, procédurale et gestuelle). Dans cet environnement, les résultats du diagnostic seront transmis aux autres parties de l'environnement, afin de procéder à l'évaluation, et de générer les rétroactions de validation liées à la connaissance. Nous envisageons de continuer l'étude concernant l'évaluation des résultats du diagnostic et la production des rétroactions pertinentes, en utilisant les réseaux bayésiens.

Enfin, pour évaluer l'analyse proposée de l'architecture du composant didactique et pédagogique, nous comptons faire des expérimentations, d'abord au niveau déclaratif, puis au niveau procédural.

Références

- [1] Self, J. A. (1995), *Computational Mathematics: Towards a Science of Learning Systems Design*. <http://www.cbl.leeds.ac.uk/~jas/cm.html>
- [2] 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, In *Sciences et Techniques Educatives* Vol. 6 n°1.
- [3] Vadcard, L. (2003), Final version of a pedagogical strategy, Final deliverable (n°35.07), VOEU IST 1999 – 13079, <http://vou-caos.vitamib.com>
- [4] Luengo, V. (1997), Cabri-Euclide : un micromonde de preuve intégrant la réfutation. Principes didactiques et informatiques. Réalisation. Thèse. Grenoble : Université Joseph Fourier.
- [5] Vadcard, L., Troccaz, J., Martin, M. (2002), Simulator for Percutaneous Iliosacral Screwing Surgery, Final deliverable (n°14.04), VOEU IST 1999 – 13079.
- [6] Mufti-Alchawafa, D. (2003), Outil pour l'apprentissage de la chirurgie orthopédique à l'aide de simulateur, Mémoire DEA Informatique, Systèmes et Communications, Université Joseph Fourier.
- [7] Vergnaud, G. (1990), La théorie des champs conceptuels, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 10. n° 23, pp. 133-170.
- [8] Balacheff, N. (1995), Conception, connaissance et concept. In : Grenier (ed) *Didactique et technologies cognitives en mathématiques, séminaires 1994-1995*. Grenoble : Université Joseph Fourier. ; pp. 219-44.
- [9] Webber, C., Pesty, S. (2002), Emergence de diagnostic par formation de coalitions - Application au diagnostic des conceptions d'un apprenant. In: Journées Francophones pour l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents 2002. J.P.Muller(ed), Hermes, Lille.
- [10] Maxion, R.A. (1990), Toward diagnosis as an emergent behavior in a network ecosystem, in *Physica D* 42, Elsevier Science Publishers, North-Holland.
- [11] Schreiber, D. (2000), The emergence of parties: an agent-based simulation, in The Annual Meeting of the Midwestern Political Science Association, Chicago, Illinois.