



Système tutoriel intelligent pour la résolution de problèmes en thermodynamique

Michel VEILLETTE

Faculté des sciences appliquées,
Département de génie mécanique

Bernard MARCOS

Faculté des sciences appliquées,
Département de génie chimique

Loïc THÉRIEN

Faculté d'éducation

François BOURGET

Faculté des sciences appliquées,
Département de génie mécanique

Jean LAPOINTE

Faculté des sciences appliquées,
Département de génie mécanique

Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec,
Canada, J1K 2R1

Résumé

L'enseignement stratégique a traduit plusieurs principes de l'approche cognitive dans une démarche d'enseignement en faisant de la résolution de problèmes une partie importante du curriculum scolaire. Cet article présente un système tutoriel intelligent qui accompagne l'étudiant dans sa démarche de résolution et lui offre des interventions spécifiques et graduées, lorsqu'il éprouve

des difficultés. Le tutoriel s'appuie sur un ensemble de catégories d'erreurs déterminées expérimentalement et utilise le formalisme mathématique associé au domaine d'application à travers les formules, les hypothèses et les valeurs numériques. Appliqué à la thermodynamique, un prototype a été expérimenté et a fourni des résultats intéressants.

Abstract

The strategic learning has expressed several principles of the cognitive approach in a learning process by making the problem solving an important part of curriculum. This paper presents an intelligent tutoring system that helps students in the problem solving process and proposes specific interventions when students meet with difficulties. The tutoring system relies on a classification of errors produced by the students and uses the mathematical formalism related to the application field such as mathematical expressions, hypotheses and numerical values. In the domain of thermodynamics, a prototype has been experimented and has provided promising results.

1. LA RÉOLUTION DE PROBLÈMES

L'approche cognitive a influencé le développement de plusieurs logiciels en offrant un modèle concernant l'organisation et l'utilisation des connaissances de l'humain et en faisant ressortir les facteurs qui favorisent ou diminuent l'efficacité de celles-ci. L'enseignement stratégique a traduit plusieurs des principes de l'approche cognitive dans une démarche d'enseignement, suggérant des orientations privilégiées (Jones, 1987). L'enseignement stratégique propose ainsi l'activité de résolution de problèmes comme la pierre angulaire du curriculum scolaire, car c'est l'activité la plus susceptible de produire des apprentissages significatifs et permanents et de provoquer et soutenir le transfert de connaissances. La résolution de problèmes constitue, de plus, une forme appropriée pour favoriser et vérifier l'intégration des connaissances.

Anderson (1990, 1983), dans son modèle ACT, montre que la résolution de problèmes est une activité qui permet la procéduralisation et la composition des connaissances et qu'elle participe au processus de généralisation et de discrimination de celles-ci. Pour que l'activité de résolution de problèmes soit efficace, il faut s'assurer que l'étudiant prenne une part active à l'élaboration de ses connaissances. Il ne doit pas assister seulement à un exposé de connaissances. Il doit explorer les solutions possibles, préparer une stratégie de résolution, questionner sa démarche, s'assurer que les règles qu'il utilise sont adéquates. Il doit modifier, s'il y a lieu, les schèmes mentaux dans un pro-

cessus de changement conceptuel, de façon à intégrer de nouvelles connaissances dans un réseau cohérent et compatible avec les connaissances qu'il possède déjà. À l'intérieur de ce processus, l'enseignant a plusieurs rôles à jouer. Il doit fournir à l'apprenant un contexte d'apprentissage qui favorise le choix de l'information pertinente et la construction du réseau de connaissances. Ce rôle nécessite parfois une intervention plus explicite pour fournir à l'étudiant une rétroaction sur le processus de la tâche au niveau des connaissances à utiliser, des stratégies à choisir et de l'exécution des procédures de résolution (Tardif, 1992).

Dans les domaines scientifiques, la résolution de problèmes prend une place prépondérante. De façon générale, c'est la méthode utilisée pour diagnostiquer les difficultés et les manques de l'étudiant et pour évaluer sa maîtrise des divers concepts. Il est donc important d'aider l'étudiant dans la résolution de problèmes, de diagnostiquer ses difficultés et d'intervenir adéquatement. La diversité des démarches individuelles requiert souvent des interventions particulières que l'enseignement traditionnel ne permet pas. Le développement de tutoriels spécifiques à la résolution de problèmes apporte un support intéressant aux professeurs. Mais pour être efficaces, de tels tutoriels doivent non seulement présenter un problème et un environnement de résolution, mais doivent aussi diagnostiquer les erreurs commises par l'étudiant et lui apporter des moyens de poursuivre ou modifier sa démarche avec succès.

Au niveau universitaire, notamment dans les facultés d'ingénierie, l'enseignement est traditionnellement constitué de leçons magistrales accompagnées de séances d'exercices dirigés, dont la fonction est d'aider les étudiants à intégrer et à manipuler les concepts appris. Durant ces séances, un corrigé des exercices est distribué. Les séances d'exercices sont un lieu propice d'aide aux étudiants qui éprouvent des difficultés. Très souvent, la tâche de répondre aux questions des étudiants relève d'assistants de cours, choisis habituellement parmi les étudiants gradués de la faculté. Or, en pratique, plusieurs difficultés ont été relevées et plusieurs auteurs se sont penchés sur la fonction d'assistant et des charges assumées (Righter, 1987). Ainsi on note les points suivants : il est difficile de trouver des assistants ; le ratio étudiants/assistant est important ; les assistants n'ont pas toujours les habiletés nécessaires au niveau de l'enseignement et des stratégies de résolution de problèmes ; la motivation des assistants et des étudiants n'est pas toujours présente ; une majorité des assistants sont des étudiants étrangers qui ont des difficultés de communication et une pratique différente de l'enseignement ; les étudiants complètent souvent leurs exercices en dehors des séances prévues et ne peuvent recevoir l'aide de l'assistant ; les assistants et les professeurs ne sont pas toujours disponibles au moment où l'étudiant en a besoin ; les corrigés fournis ne constituent qu'une solution exacte et ne peuvent apporter d'explication quant aux erreurs commises, ni graduer l'information donnée sur les étapes de la solution.

Les périodes d'exercices sont essentielles à la phase de consolidation des connaissances. Elles offrent aux étudiants la possibilité d'acquérir une expérience pratique pour bien intégrer et appliquer les concepts reçus et pour développer des heuristiques particulières à la résolution de problèmes. Mais cette expérience doit être soutenue par l'accès à des aides tout au long de ce processus. Nous croyons que cette aide doit être apportée lorsque l'étudiant en a besoin, qu'elle doit être graduée en fonction du contexte et qu'elle doit leur transmettre une méthodologie les aidant à vérifier leur démarche. C'est en fixant ces objectifs que nous avons considéré le développement d'un système tutoriel intelligent (STI). Ce STI fournit une aide personnalisée en identifiant les concepts manquants ou mal maîtrisés et en apportant une intervention appropriée et graduée. Cette intervention peut prendre la forme d'une simple notification d'erreur, d'un indice relatif à l'erreur commise, d'un correctif à apporter ou d'un renvoi à une source d'information spécifique. De plus, le STI apporte à l'étudiant une formalisation du domaine et une méthodologie de résolution de problèmes. Le STI tente de reproduire l'aide que fournirait un "bon assistant".

2. LE DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME TUTORIEL INTELLIGENT

Dans une démarche d'aide à la résolution de problèmes, un enseignant fait appel à plusieurs connaissances et stratégies plus ou moins explicites qui sont souvent difficiles à énoncer et surtout à systématiser. Pour reproduire une telle démarche, il est essentiel de déterminer ces connaissances et stratégies. Ainsi, la réalisation d'un tutoriel intelligent pour la résolution de problèmes amène plusieurs considérations et soulève plusieurs questions.

Le choix d'un type d'activité. Le type d'activité choisi a des conséquences sur l'ensemble du développement du STI. Il faut déterminer le genre de problème que l'on donne à l'étudiant et le degré de liberté alloué dans la recherche d'une solution. L'étudiant doit-il déterminer les lois qui sous-tendent le domaine considéré ou doit-il utiliser sa connaissance des lois et les appliquer à un problème spécifique ? S'agit-il d'un problème de simulation ou d'un problème de conception ?

Le choix d'un style d'enseignement. L'approche cognitive préconisée détermine les éléments d'informations et les stratégies qui doivent être modélisés dans le STI. Plus une démarche d'aide ou d'enseignement tient compte de divers facteurs et offre des alternatives, plus il y a d'éléments à modéliser et plus elle s'avère complexe à systématiser pour l'ordinateur. Doit-on adapter nos interventions en fonction des préférences cognitives de l'apprenant ? Sous quelle forme le STI doit-il exprimer sa connaissance ?

La représentation du domaine considéré. Les manipulations, le traitement et les inférences engendrées par l'utilisation d'une connaissance

dépendent largement de la forme de représentation utilisée, de sa facilité à représenter les objets et les concepts du domaine et de sa capacité à offrir un niveau de détail suffisant pour répondre aux besoins de l'activité. Chaque représentation a ses forces et ses faiblesses.

Le traitement du problème. Le STI doit-il être capable de résoudre lui-même le problème ou possédera-t-il une solution préalable ? Doit-il élaborer tous les chemins de solution ? Peut-il considérer des solutions qui dévient du chemin prévu ? Doit-il présenter une solution à l'apprenant ?

Le choix du type d'interaction. De quelle façon l'apprenant interagit-il avec le tutoriel ? L'interface laisse-t-elle place à l'exploration de plusieurs chemins de solution ou donne-t-elle un cadre rigoureux ? De quelle façon tient-on compte des aspects cognitifs de l'apprenant telles les limites liées à la mémoire et à la charge cognitive ? Une lourdeur excessive peut rapidement indisposer l'utilisateur.

Le diagnostic d'une erreur commise. A partir de quels éléments diagnostique-t-on qu'il y a une erreur et quelle est cette erreur ? Peut-on considérer les erreurs multiples qui peuvent s'additionner au cours de la résolution d'un problème ? Comment faire pour discriminer une erreur par rapport à une autre lorsqu'elles se traduisent par une même conséquence (ce cas est fréquent lorsque l'on manipule des valeurs numériques) ?

Le choix d'une intervention appropriée. Le choix d'une intervention doit mettre en relation les informations relatives aux erreurs commises et celles relatives à l'étudiant. A quel moment doit-on intervenir lorsqu'une erreur est détectée ? Comment choisit-on une intervention lorsqu'une erreur est commise ? Quelles sont les diverses formes d'intervention et peut-on les graduer ? Comment génère-t-on les interventions auprès de l'étudiant ? L'intervention doit-elle s'attarder aux modèles mentaux erronés de l'étudiant ? Que faire lorsqu'une intervention s'avère inefficace ? Comment doit-on poursuivre lorsqu'une intervention particulière est complétée ?

La modélisation de l'étudiant. Le modèle étudiant constitue la représentation qu'a le logiciel de l'étudiant. Quelles sont les informations nécessaires pour modéliser l'étudiant et tenir compte de ses préférences cognitives ? Comment peut-on évaluer l'état de ses connaissances ? Quelles sont les interventions antérieures qu'il a reçues ? Comment peut-on déterminer la qualité du transfert de connaissances apporté par l'activité ?

3. DES MODÈLES PROPOSÉS

Actuellement, il n'existe pas de réponse absolue à toutes ces questions dans la construction d'un STI. En fait, le choix du domaine d'application et du type d'activité a un tel impact sur le contexte de construction qu'il faut à

chaque fois reconsidérer l'ensemble de ces questions. Plusieurs démarches ont ainsi été proposées, chacune d'elles apportant des réponses intéressantes mais partielles. Parmi celles-ci, certaines présentent des similitudes qui permettent de dégager quelques modèles généraux.

Les modèles de type logiciel-outil. Cette approche consiste à développer des environnements d'aide à l'exploration des connaissances et à l'acquisition d'habiletés techniques (Paquette, 1991). Ce type d'application s'éloigne du rôle de professeur pour adopter un rôle d'outil intelligent simulant un environnement réel de travail. Un tel outil s'intègre dans le cadre d'activités pédagogiques supervisées par un professeur qui suggère les démarches et vérifie la qualité du transfert de connaissances. Ce genre d'approche apporte des solutions au niveau de l'acquisition de concepts et de lois, mais offre peu de support lorsqu'il s'agit de vérifier la maîtrise de ces connaissances dans divers contextes.

Les modèles par recouvrement (overlay model). Cette approche consiste à évaluer la connaissance de l'étudiant par rapport à un modèle idéal de cette connaissance organisée en réseau (Goldstein, 1982). Chaque utilisation efficace d'une connaissance augmente la probabilité que celle-ci soit connue. L'évaluation de l'apprentissage de l'étudiant est déterminée par une fonction plus ou moins complexe dont le résultat servira au choix du prochain exercice à effectuer ou de la matière à consulter. Le modèle de recouvrement offre peu d'information sur le type d'erreur et permet une intervention spécifique au contenu mais pas à l'erreur commise.

Les modèles par fausses-règles (mal-rule, buggy model, buggy steps). La fausse-règle modélise les règles erronées que l'étudiant peut posséder (Brown, 1978 ; Anderson, 1990 ; Kuzmycz, 1992). Le comportement de l'élève est analysé en faisant correspondre les conséquences observées à celles générées par l'application d'une fausse-règle. L'intervention du tutoriel est liée à la fausse-règle diagnostiquée et permet de concentrer l'aide apportée sur une difficulté particulière. L'utilisation de fausses-règles soulève plusieurs réserves (Sack, 1988 ; Guin, 1990) : chaque fausse-règle est utilisée avec une importance égale, les fausses-règles sont idiosyncratiques et ne peuvent représenter une même difficulté qui s'exprime de plusieurs façons. De plus, leur représentation est spécifique au type d'application. Enfin, un modèle utilisant les fausses-règles n'offre pas d'interventions si celles-ci ne peuvent reproduire la réponse donnée par l'étudiant. Ainsi, face à des données numériques, des difficultés surviennent notamment pour identifier les erreurs de calcul et pour s'assurer que le chiffre obtenu provient bien de l'erreur suspectée.

Les modèles par reconnaissance de plan. Cette approche cherche à reconnaître l'intention de l'étudiant en déterminant le plan de résolution mis en œuvre par celui-ci à partir de la démarche observée (Genesereth, 1982 ; Py, 1991). Il s'agit alors de reconnaître les plans infructueux de façon à conseiller l'étudiant dans sa démarche.

Les modeles par scenarios de taches. Cette approche integre des ensembles de scenarios permettant de reconnaitre et de solutionner une tache complexe en la decomposant en une succession d'actions ou de taches plus simples (Van Marcke, 1992). Les regles d'intervention sont fonction de l'endroit ou l'erreur s'est produite dans cette decomposition.

4. UNE APPROCHE PAR CATEGORIES D'ERREURS

Face aux besoins constatés à l'université dans le cadre des séances d'exercices, les recherches de notre équipe se sont portées sur l'élaboration d'un STI capable d'aider l'étudiant dans la résolution de problèmes et de lui proposer les ressources adéquates. Cette aide ressemble à celle apportée par un professeur ou un assistant lorsque l'étudiant se présente avec une solution plus ou moins complète. A partir de cette ébauche de solution, le professeur détecte et utilise les erreurs commises par l'étudiant pour choisir une intervention adéquate. En ingénierie, la plupart des domaines enseignés présentent une caractéristique commune : ils sont mathématiquement formalisables, c'est-à-dire que ces domaines s'appuient sur la manipulation d'un ensemble fini de relations (ou formules) liant des états, des objets mathématiques et des variables. Ainsi, l'information disponible pour détecter des erreurs est constituée des valeurs numériques de l'étudiant, de la notation et des unités utilisées, des constructions élaborées, des expressions employées et des hypothèses formulées.

L'observation d'un didacticien dans l'enseignement du domaine montre que celui-ci ne possède pas une connaissance explicite de toutes les formes d'erreurs qu'un étudiant peut commettre. Il possède cependant une idée des formes d'incompréhension des étudiants et des stratégies à adopter en fonction de ces formes. C'est en ce sens que nous avons orienté notre recherche. En effet, l'enseignant possède une connaissance des types d'interventions nécessaires pour corriger des catégories d'erreurs qu'il reconnaît à partir des éléments de la solution de l'étudiant. Une même intervention peut être efficace pour plusieurs formes d'erreurs qui appartiennent à une même catégorie. Le professeur n'a pas à connaître de façon exhaustive les formes que prennent les erreurs.

Une telle approche se démarque bien de celle des fausses-règles par l'orientation donnée au diagnostic de l'erreur, en fonction de l'intervention de l'enseignant plutôt qu'en fonction de la forme d'erreur de l'étudiant et la modélisation exhaustive des différentes erreurs. Notre approche ne cherche pas à reproduire l'erreur commise par l'étudiant. A partir des éléments présents, absents ou erronés de la solution de l'étudiant, elle tente plutôt de détecter des points communs de l'erreur commise avec une catégorie particulière d'erreurs.

Descripteur	Catégorie	Définition
TRANS	Erreur de transcription	Erreur commise en recopiant des données en cours de résolution
LECT	Lecture erronée	Oubli d'une donnée ou d'une hypothèse lors de la lecture du problème
INAT	Inattention	Étourderie due à l'inattention, sans être une erreur de transcription ou de lecture
CALC	Calcul erroné	Erreur en effectuant un calcul
COINC	Concept inconnu	Erreur due à l'ignorance d'un concept
REINC	Règle inconnue	Erreur due à l'ignorance d'une définition, d'une règle, d'une formule ou d'un théoème
DOINC	Domaine inconnu	Erreur due à l'ignorance d'un domaine de connaissances
COMAM	Concept mal maîtrisé	Erreur due à un concept connu, mais mal maîtrisé
REMAP	Règle mal appliquée	Erreur due à une définition, une règle, une formule ou un théorème connus, mais mal appliqués
DOMAM	Domaine mal maîtrisé	Erreur due à un domaine de connaissances connu, mais mal maîtrisé
CANR	Conditions d'applications non remplies	Erreur due à l'utilisation d'une règle, d'une formule ou d'un théorème dont les conditions d'application ne sont pas remplies
MU	Mauvaises unités de mesure	Erreur due à l'absence ou à de mauvaises unités de mesure
AH	Ajout d'hypothèses	Erreur due à l'ajout d'hypothèses ou de données non contenues dans l'énoncé
STRANP	Stratégie non permise	Erreur due à l'utilisation d'une stratégie ou d'un outil non permis par le contexte
STRANE	Stratégie non efficace	Utilisation d'une stratégie valide, mais non efficace pour la résolution du problème
STRANC	Stratégie non complétée	Utilisation d'une stratégie efficace pour la résolution du problème, mais non conduite à terme
MIP	Mauvaise interprétation du problème	Erreur due à une mauvaise interprétation de l'énoncé du problème (mots, données, symboles, sens, etc.)
REFAU	Règle fausse	Erreur due à l'utilisation d'une règle, d'une formule ou d'un théorème déformés ou inventés
ARROND	Arrondi	Erreur due à un arrondissement excessif en cours de résolution ou dans la réponse
EVOL	Erreur volontaire	Réponse intermédiaire ou finale volontairement modifiée pour obtenir un résultat plausible
ABS	Réponse absurde	Réponse intermédiaire ou finale, manifestement fausse par le contexte

Tableau 1 : Les catégories d'erreurs

Notre approche est basée sur une classification des erreurs par catégories et sur un ensemble de stratégies de diagnostic permettant de faire correspondre une erreur particulière à une catégorie. Pour construire les catégories d'erreurs, nous avons utilisé une approche pragmatique basée sur une expérimentation et des observations auprès d'étudiants de niveau secondaire professionnel et de niveau universitaire. Deux domaines d'application ont été choisis : la trigonométrie pour le secteur secondaire professionnel et la thermodynamique pour le secteur universitaire. Ces deux domaines nous ont permis de confirmer la généralité de notre démarche.

Ainsi, des tests ont été distribués et l'analyse des réponses a permis d'identifier et de regrouper les erreurs. En tout, une vingtaine de catégories d'erreurs ont été implantées. Ces catégories sont présentées dans le tableau 1. Parmi celles-ci, deux catégories sont reliées au contexte du problème : les erreurs d'unité et les erreurs d'ordre de grandeur. Cette classification contient aussi des erreurs relatives à l'utilisation d'expressions mathématiques : erreur de calcul, conditions d'application inconnues ou non remplies, concept mal maîtrisé, concept inconnu (ignorance de l'existence de cette expression), etc. D'autres erreurs font référence à la démarche même de l'étudiant : erreur de lecture (donnée oubliée ou mal comprise présente dans le texte du problème), stratégie non permise (utilisation d'un rapporteur d'angle), stratégie incomplète (l'étudiant est en situation de blocage) et stratégie inefficace (étapes qui ne mènent pas à la solution), etc.

Le travail d'analyse des erreurs fut effectué en considérant les points suivants : regroupement des erreurs identiques ; description d'erreurs de même type ; cause commune probable de l'erreur ; exploration d'interventions correctives ; fréquence d'un même type d'erreur. De plus, les catégories d'erreurs ont été établies de façon à y associer des stratégies de diagnostic programmables. Ce critère est intimement lié à la présence d'informations utilisables et associées à la catégorie d'erreurs. Les stratégies de diagnostic associent une erreur à une catégorie d'erreurs en utilisant les informations fournies par l'étudiant lors de la résolution du problème.

5. UNE DÉMARCHE DE DIAGNOSTIC

Nous voulions, dans notre recherche, simuler l'approche de l'enseignant qui aide l'étudiant dans la résolution d'un problème. C'est pourquoi nous avons systématisé une démarche de diagnostic d'erreur de façon à simuler cette approche. Elle se fait habituellement de la façon suivante : le professeur regarde d'abord la solution de l'étudiant et constate les erreurs évidentes relatives à la réponse proposée (unité, ordre de grandeur, etc.). Puis il localise l'endroit où les valeurs intermédiaires de la solution de l'élève dévient de la bonne réponse ou d'une réponse acceptable. A partir d'un élément inexact, il

note ensuite les objets mathématiques ou les formules qui sont inexacts ou mal utilisés et qui ont conduit à une valeur erronée. Il vérifie ensuite les causes possibles de cette divergence : mauvaises hypothèses, mauvaise règle, ajout d'hypothèse, etc. Enfin, il vérifie les calculs effectués par l'étudiant.

Cette démarche procède à partir des éléments de solution de l'étudiant. Elle converge rapidement vers l'erreur parce qu'elle n'utilise d'abord que les valeurs intermédiaires représentatives d'une étape pour identifier la valeur à partir de laquelle on a observé une déviation. A partir de cette valeur, des informations supplémentaires sont recueillies de façon à déterminer l'origine exacte de l'erreur et à l'associer à une catégorie. L'implantation de cette démarche pour un STI est décrite en détail dans (Veillette, 1991).

Le choix d'une intervention est fonction de l'erreur détectée. Dans ses interventions, l'enseignant essaie de minimiser les informations qu'il donne à l'étudiant de façon à lui faire prendre une part active à la modification de ses schèmes de connaissances. Pour une même erreur, il peut offrir de l'information graduellement, selon plusieurs niveaux, jusqu'à ce que l'étudiant puisse corriger et compléter son problème. Nous avons identifié sept niveaux d'interventions :

- 1 - l'indication qu'une étape est franchie avec succès,
- 2 - l'indication localisée d'une erreur sans indice,
- 3 - l'indication localisée d'une erreur annotée d'une aide appropriée,
- 4 - l'indication d'un indice en se basant sur l'information contenue dans le modèle étudiant, dans le modèle étudiant idéal et à l'aide des éléments du solutionneur, lorsque l'étudiant est en situation de blocage,
- 5 - l'indication localisée d'une erreur et le renvoi à un contenu externe,
- 6 - le renvoi à un problème d'un niveau plus facile,
- 7 - l'affichage de la solution de l'étape ou du problème.

6. DES PRINCIPES D'ÉLABORATION

L'analyse de l'approche d'un enseignant nous a conduits à utiliser les principes de développement suivants qui se retrouvent dans les STI que nous avons réalisés.

Autonomie de l'élève. Il est important de laisser place à la créativité de l'élève dans l'élaboration d'une solution. Dans des domaines comme la thermodynamique, plusieurs chemins de solution sont possibles pour arriver au résultat. Il est non seulement important de considérer l'ensemble de ces chemins mais aussi de laisser à l'élève la possibilité de dévier d'un chemin exact et de lui expliquer pourquoi ce chemin est erroné. Nous avons résolu cet

aspect dans nos STI en utilisant un principe de décomposition par tableaux utilisé conjointement à un solutionneur. Le solutionneur peut à la fois résoudre un problème à partir des données de l'énoncé, vérifier si un chemin de solution proposé par l'étudiant est valable et déterminer à quel endroit de ce chemin de solution s'est produite une erreur.

Économie d'intervention. Ce principe est basé sur l'expertise du professeur qui, dans sa démarche, commence par regarder la réponse de l'étudiant et les unités utilisées pour la réponse. Le professeur ne cherche pas à connaître, dès le début, tous les détails de la solution avant d'intervenir. Il regarde d'abord les étapes utilisées avant de vérifier les hypothèses posées et les calculs effectués.

Intervention minimale et graduée. A chaque catégorie d'erreurs est relié un ensemble de gabarits d'interventions possibles. En conservant les interventions antérieures dans le modèle étudiant, l'aide est donnée graduellement de façon à s'assurer que l'étudiant prenne une part active à la correction de l'erreur. Par exemple, en ne signalant d'abord que le lieu de l'erreur, l'étudiant vérifie sa démarche en concentrant son attention à cet endroit et apporte très souvent la correction nécessaire.

Intervention adaptée au niveau de l'erreur. Il est important d'adopter une intervention qui soit conséquente avec l'importance de l'erreur. Par exemple, une erreur de calcul ne nécessite pas l'exposé de toute la solution. Par contre, une erreur fréquente concernant les conditions d'utilisation d'une formule nécessite le renvoi à un contenu théorique ou à une activité susceptible de favoriser l'acquisition des concepts manquants.

Construction des connaissances. L'étudiant doit prendre une part active à l'élaboration de ses connaissances et le tutoriel doit favoriser la modification des schèmes mentaux inefficaces. Par exemple, la mauvaise utilisation d'une règle amène le logiciel à indiquer le type d'erreur commis et la forme que cette erreur a prise dans la solution de l'étudiant, de façon à permettre la modification de sa connaissance et la réactualisation des règles qu'il possède.

Principe du tableau. Le principe du tableau a été élaboré pour recueillir la solution de l'étudiant et pour définir une démarche de résolution automatique d'un problème. Selon ce principe, chaque élément fondamental du domaine est représenté comme une case d'information dont l'aspect est fonction du type d'élément et de son contexte d'utilisation. Chacune de ces cases (ou éléments) peut être décomposée en éléments plus simples. Par exemple, une formule est décomposée en un ensemble d'éléments qui représentent les étapes d'utilisation de celle-ci. Ces éléments sont les conditions d'application de cette formule et les variables qui la composent. Les variables sont présentées dans un tableau que l'étudiant remplit et où il peut indiquer récursivement comment chaque valeur est déterminée, par l'utilisation d'une autre formule par exemple.

Le tableau est un outil fondamental de notre approche. Il permet de généraliser nos stratégies de diagnostic d'erreur. En effet, d'un domaine à l'autre, la représentation des éléments, leur regroupement et leur manipulation peuvent varier au niveau de l'interface avec l'utilisateur ; mais leur aspect fondamental en termes de type d'élément et de représentation interne demeure similaire. Les stratégies de diagnostic sont appliquées à cette représentation interne et peuvent ainsi être transférées à d'autres domaines. Par exemple, pour chaque élément d'un tableau, la stratégie de diagnostic analyse l'exactitude de la valeur contenue dans cet élément, la possibilité d'utiliser cet élément dans le contexte du problème, la pertinence de son utilisation et le fait de l'avoir ou de ne pas l'avoir utilisé. Le diagnostic est posé en plaçant les éléments de la solution de l'étudiant dans le contexte du problème.

Chaque case d'un tableau constitue une étape intermédiaire possible dans la résolution d'un problème. La détermination de la valeur d'une case doit se faire en une étape de résolution, par l'utilisation d'une expression mathématique du domaine qui établit une relation entre cette case et les autres éléments du problème. Chaque élément est indépendant des calculs qui ont généré sa valeur, facilitant ainsi l'analyse de tous les moyens permettant de le trouver. Le tableau permet enfin de formaliser la démarche de l'étudiant en transmettant une méthodologie qui lui offre des moyens de se vérifier.

7. EXEMPLE DE FONCTIONNEMENT DE *THERMEX*

Le STI *Thermex* a été développé pour aider les étudiants lorsqu'ils tentent de résoudre des exercices de thermodynamique. Il a été construit à partir des principes exposés dans les sections précédentes. Pour illustrer son fonctionnement, voici un court exemple d'une session d'utilisation de *Thermex*. *Thermex* commence une session de travail en présentant la liste des chapitres pour lesquels il existe une série d'exercices. L'étudiant choisit un exercice et le logiciel affiche alors le texte, un schéma si nécessaire et les questions. Voici le texte de l'exercice 5.27 (figure 1) :

De l'air contenu dans un cylindre muni d'un piston est comprimé au cours d'une évolution quasi statique. Pendant la compression, la relation entre la pression et le volume est donnée par $P V^{1.25} = \text{Cte}$. La masse d'air dans le cylindre est de 0,1 Kg. La pression initiale est de 100 Kpa alors que la température initiale est égale à 20 °C. Le volume final est égal à 1/8 du volume initial. Calculer le travail fait durant la compression.

Si l'étudiant est arrivé à une solution, il entre la valeur numérique correspondant au travail ; *Thermex* vérifie cette valeur et si cette dernière est exacte, *Thermex* félicite l'étudiant et le renvoie au menu principal. Si la valeur numérique n'est pas correcte, *Thermex* recherche l'origine, c'est-à-dire la classe de l'erreur qui a conduit à cette valeur numérique incorrecte. Pour cela,

Réponds aux questions et appuie sur F10 lorsque tu as terminé.

De l'air contenu dans un cylindre muni d'un piston est comprimé au cours d'une évolution quasi statique. Pendant la compression, la relation entre la pression et le volume est donnée par $P V^{1,25} = \text{cte}$. La masse d'air dans le cylindre est de 0,1 kg. La pression initiale est de 100 kPa alors que la température initiale est égale à 20°C. Le volume final V_f est égal à 1/8 du volume initial V_i .

○ Calculer le travail : $W = ?$ kJ
 ○ Calculer le transfert de chaleur : $Q = ?$ kJ

(1)		(2)
<p>$M = 0,1 \text{ Kg}$ $P = 100 \text{ kPa}$ $T = 20 \text{ °C}$</p>	$PV^{1,25} = \text{cte}$ \Rightarrow	<p>$V_f = 1/8 V_i$</p>

F1: aide F3: unité Espace: menu Esc: annuler

Figure 1 : Présentation de l'énoncé d'un problème

Thermex vérifie des informations relatives à la préparation de l'exercice : le système thermodynamique retenu doit être le cylindre, le système est fermé (ni ouvert à écoulement uniforme, ni ouvert à régime permanent), le constituant est de l'air et les états thermodynamiques sont : début de compression et fin de compression. Une fois ces informations vérifiées, *Thermex* demande à l'étudiant d'entrer les valeurs qu'il connaît directement de l'énoncé (données) et les valeurs qu'il a calculées (figure 2, page suivante). Ces valeurs sont des grandeurs numériques ou symboliques. Le logiciel vérifie d'abord les données puis analyse les valeurs calculées. Dans le problème 5.27, la pression à l'état initial est donnée et une erreur liée à cette valeur est une erreur de lecture ou une erreur d'unité ; la classe étant identifiée, *Thermex* lui associe l'intervention adéquate qui se résume à pointer l'erreur et à renvoyer l'étudiant au texte. Si la valeur erronée est une valeur calculée, *Thermex* demande quelle expression a été utilisée pour calculer cette valeur. Si l'étudiant indique qu'il a calculé le travail pour l'exercice 5.27 à l'aide de l'expression 5.23, *Thermex* demande quelles sont les conditions d'application de cette expression. L'étudiant répond "transformation polytropique" (c'est-à-dire transformation pour laquelle la pression P et le volume V suivent la relation $P V^n = \text{Cte}$), alors que l'expression n'est valable que pour des transformations isothermes. *Thermex* identifie ainsi une erreur appartenant à la classe "mauvaise condition d'application" et propose comme intervention le rappel des conditions d'application de cette expression. Puis *Thermex* efface la valeur erronée et renvoie l'étudiant au problème.

Écris seulement les éléments du tableau que tu connais.
Appuie sur F10 lorsque tu as terminé.

<p>État 1 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> M 0,1 kg ok <input type="radio"/> P 100 kPa ok <input type="radio"/> V 0,0841 m³ ok <input type="radio"/> T 20 °C ok <input type="radio"/> v m³/kg 	<p>État 2 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> M 0,1 kg ok <input type="radio"/> P 1344 kPa ok <input type="radio"/> V 0,01 m³ ok <input type="radio"/> T °C <input type="radio"/> v m³/kg
<p>Question n° 1 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Composé Air <input type="radio"/> Système Cylindre <input type="radio"/> Nature Fermé <input type="radio"/> État État 1 - état 2 <input type="radio"/> Éq. états Gaz parfait 	<p>État 1 - état 2 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Isobare [] <input type="radio"/> Isochore [] <input type="radio"/> Isotherme [] <input type="radio"/> Isentrope [] <input type="radio"/> Réversible [oui] ok <input type="radio"/> Adiabatique [] <input type="radio"/> M = cte [] <input type="radio"/> PV = cte [] <input type="radio"/> PVⁿ = cte [oui] ok <input type="radio"/> n 1,25 ok <input type="radio"/> W ? kJ <input type="radio"/> Q ? kJ

F1: aide F3: unité F4: équilibre F5: texte Tab: tableau Espace: menu

Figure 2 : Tableaux représentant une transformation

Thermex peut donner de l'aide lorsque l'étudiant est en situation de blocage. L'aide est progressive et dépend des valeurs que l'étudiant a déjà données ou calculées. Dans l'exercice 5.27, si l'étudiant a bien recueilli les données et calculé correctement le volume final et initial, *Thermex* lui indique qu'il peut calculer le travail. Si cette aide n'est pas suffisante, *Thermex* lui rappelle que l'on a une transformation polytropicque, réversible et que l'état initial et final sont déterminés. Si ce n'est pas suffisant, il lui suggère d'employer la relation 5.25 qui s'applique pour les transformations polytropicques et réversibles. Ces aides sont ainsi graduées pour forcer l'étudiant à compléter le plus possible par lui-même l'exercice. Durant les expérimentations, les aides et interventions ont été suffisantes pour permettre à l'étudiant de résoudre l'exercice.

8. DISCUSSION ET CONCLUSION

Nous avons présenté une approche originale pour l'élaboration d'un tutoriel intelligent capable de diagnostiquer les erreurs de l'étudiant dans la résolution de problèmes et d'apporter des interventions appropriées et graduées. Cette approche s'appuie sur un ensemble de catégories d'erreurs développées expérimentalement et sur des stratégies de diagnostic reliant ces catégories d'erreurs à la solution plus ou moins complète de l'étudiant. Les interventions

sont choisies en fonction de la catégorie d'erreurs diagnostiquée, des interventions passées et de la gravité de l'erreur. Un solveur manipulant les éléments du domaine est incorporé à notre architecture, afin d'analyser les différents chemins de solution proposés par l'étudiant et de fournir des informations qui lui permettront de compléter sa démarche avec succès.

Un prototype fonctionnel nommé *Thermex* a été réalisé selon cette approche. *Thermex* contient une quarantaine d'exercices, une centaine de relations thermodynamiques et les tables thermodynamiques pour l'eau, l'air, le fréon et l'ammoniac. Il est écrit en Prolog et en C et fonctionne sur des ordinateurs compatibles DOS et équipés d'un moniteur VGA. *Thermex* offre de plus un ensemble d'outils permettant aux professeurs d'entrer eux-mêmes les données des problèmes soumis aux étudiants. *Thermex* a été expérimenté à trois reprises par des groupes différents d'étudiants. Bien qu'il y ait peu d'évaluations quantitatives, les étudiants des groupes témoins ont obtenu de bons résultats en n'utilisant que *Thermex* lors de leur séance d'exercices.

Notre approche offre plusieurs avantages. Elle permet de traiter le chemin de solution de l'étudiant et d'intervenir lorsque l'étudiant requiert une aide. Notre approche rassemble aussi les erreurs qui ont une même origine mais dont les effets sont différents. C'est une qualité intéressante lorsque le domaine traité contient des valeurs numériques. Les stratégies de diagnostic minimisent l'information à demander à l'étudiant puisqu'on localise une erreur pour ensuite cerner de plus en plus son origine. Ces stratégies détectent d'abord une valeur suspecte puis complètent l'information relative aux manipulations qui l'ont générée. Une telle architecture est ouverte à l'intégration des techniques existantes lorsque l'on désire raffiner la précision des interventions, inférer les contenus connus ou analyser la démarche globale de l'étudiant. Par exemple, un modèle par recouvrement peut ajouter une analyse des contenus maîtrisés à partir des éléments conservés dans le modèle étudiant.

Les catégories d'erreurs ont été utilisées avec succès pour le domaine de la thermodynamique et celui de la trigonométrie. Elles sont suffisamment générales pour s'appliquer à d'autres domaines. La plupart des domaines formalisables mathématiquement sont accessibles à une approche par catégories d'erreurs.

Nous poursuivons nos travaux de recherche, consistant à étendre les catégories d'erreurs à d'autres aspects de la résolution de problèmes. Les catégories énoncées portent principalement sur la résolution proprement dite du problème. Plusieurs erreurs se produisent au niveau de la préparation même du problème et de la représentation qualitative que l'étudiant se fait du problème. C'est un aspect primordial en thermodynamique. D'autres catégories d'erreurs peuvent être établies au niveau de la démarche et de la stratégie de l'étudiant. A ce niveau, les travaux relatifs à la génération de plan apportent un éclairage intéressant.

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON J.R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, Harvard University Press.

ANDERSON J.R., BOYLE C.F., CORBETT A.T. & LEWIS M.W. (1990). Cognitive modeling and intelligent tutoring. *Artificial Intelligence*, 42, pp. 7-49.

BROWN J.S. & BURTON R.R. (1978). Diagnosis models for procedural bugs in basic mathematical skills. *Cognitive Science*, 2, pp. 155-192.

GENESERETH M.R. (1982). The role of plans in Intelligent Teaching Systems. In Sleeman and Brown (Eds), *Intelligent Tutoring Systems*. New-York, Academic Press.

GOLDSTEIN I.P. (1982). The genetic graph : a representation for the evolution of procedural knowledge. In Sleeman and Brown (Eds), *Intelligent Tutoring Systems*. New-York, Academic Press.

GUIN D. (1990). Modélisation des connaissances pour un système d'aide à la démonstration géométrique. In *Proceedings, Congrès Applica 90, 2^e Congrès Européen. Multimédia - Intelligence Artificielle et Formation*. Lille, France.

JONES B.F., PALINCSAR A.S., OGLE D.S. & CARR E.G. Eds (1987). *Strategic teaching and learning : cognitive instruction in the content areas*. Alexandria, VA, Association for Supervision and Curriculum Development.

KUZMYCZ M. & WEBB G.I. (1992). Evaluation of feature based modelling in subtraction. In *Proceeding of Second International Conference ITS 92*, pp. 269-276.

PAQUETTE G. (1991). L'intégration de métaconnaissances dans un atelier de conception d'environnements d'apprentissage. In Henri-Aime & al. (Eds), *Knowledge modeling and expertise transfert*. Amsterdam, IOS Press.

PY D. (1991). Reconnaissance de plan pour la modélisation de l'apprenant. In Henri-Aime & al. (Eds), *Knowledge modeling and expertise transfert*. Amsterdam, IOS Press.

RIGHTER R. (1987). Training for teaching assistants. *Engineering Education*, 78, 2, pp. 135-136.

SACK W. (1988). Finding errors by overlooking them. In *Proceedings ITS-88*. Montréal, Québec.

TARDIF J. (1992). *Pour un enseignement stratégique, l'apport de la psychologie cognitive*. Montréal, Editions Logiques.

VAN MARCKE K. (1992). Instructional expertise. In *Proceedings of Second International Conference ITS 92*.

VEILLETTE M., MARCOS B., THÉRIEN L., BOURGET F. & LAPOINTE J. (1991). Modélisation du diagnostic et des stratégies d'intervention dans un tutoriel intelligent. In Henri-Aime & al. (Eds), *Knowledge modeling and expertise transfert*. Amsterdam, IOS Press.