

L A CONSTRUCTION DYNAMIQUE DES COGNITIONS DANS UNE ARCHITECTURE INFORMATISÉE DE L'APPRENTISSAGE

André Mayers

Professeur - Département de mathématiques: Cégep de Jonquière

Bernard Lefebvre

Professeur - Département d'informatique: Université du Québec à Montréal

1. INTRODUCTION

L'importance pour un tuteur humain de comprendre la construction, l'organisation et l'utilisation du savoir chez un étudiant pour concevoir une stratégie pédagogique efficace a été soulignée par plusieurs auteurs [16, 17, 18, 19, 33].

Une présentation inadéquate du contenu d'un cours peut engendrer l'échec de l'élève, or, selon Blouin [10,12] l'expérience de la réussite est cruciale pour augmenter la motivation et la confiance en soi. L'inverse est probablement aussi vrai puisque selon Blouin [11] le manque de confiance en soi est probablement la variable psychologique de l'étudiant la plus importante pour expliquer les difficultés en sciences. Une préparation inappropriée des exercices, des exemples d'une activité pédagogique peut donc entraîner les élèves dans le cercle vicieux des échecs, perte de confiance en soi, échecs, ...

En se basant sur les théories de la psychologie cognitive, plusieurs auteurs dont Gagné [16], Gagné [17], Giard [18,19] et Tardif [33], parlent de la nécessité pour les enseignants de connaître les mécanismes d'acquisition des connaissances et de leur organisation. Selon cette approche, l'élève construit ses règles et ses conceptions sur le domaine de connaissance lors d'activités pédagogiques. Tardif [33] précise que «Puisque l'élève construit ses règles et ses conceptions en partant des situations que l'enseignant offre à son attention, celui-ci doit contrôler d'une façon systématique les exemples, les contre-exemples et les exercices qu'il apporte à la classe ainsi que leur ordre de présentation» [33].

De nombreuses recherches en psychologie cognitive ont permis de mieux comprendre les principes d'organisation et d'acquisition de la connaissance. Il est cependant difficile de partir de ces recherches pour planifier les activités pédagogiques associées à un cours. Une première difficulté réside dans l'interprétation nécessaire des résultats de ces recherches pour en tirer des conclusions utiles dans un contexte d'enseignement. Gagné [17], Gagné [16] et Tardif [33] ont écrit des textes pour aider l'enseignant à surmonter cette difficulté. Deux autres difficultés ont trait à la création et à la manipulation d'une représentation cognitivement fidèle de l'organisation des connaissances (le savoir et le savoir-faire) de l'étudiant.

Pour qu'une représentation de l'organisation des connaissances de l'élève puisse être utilisée pour dissiper ces difficultés, elle doit contenir les définitions, les exemples, les exercices faits par l'élève et dont il peut se souvenir, les règles et les conceptions (vraies et fausses) que l'élève a construites et finalement les diverses relations entre ces éléments. La difficulté que rencontre un être humain pour intégrer ces aspects ne réside pas tant dans la connaissance des théories d'acquisition et d'organisation des connaissances que dans le nombre de détails à considérer. L'ordinateur peut accomplir cette tâche puisqu'il possède une mémoire phénoménale et une capacité d'exécution rapide et fiable des procédures répétitives. Ces compétences peuvent être utilisées dans le domaine des applications pédagogiques pour construire un prototype capable de modéliser l'acquisition et l'organisation des connaissances. Il sera ainsi possible:

1. de voir les conséquences d'une activité avant de l'appliquer à un étudiant réel,
2. de mieux comprendre les processus et leur interaction (il est possible d'observer le contenu de la mémoire du prototype mais pas celui d'un élève) et
3. d'expérimenter une stratégie pédagogique sans conséquence négative pour l'élève.

Les exemples suivants concrétisent la valeur de ces possibilités:

1. Un enseignant X de mathématiques a deux classes qui ont eu des cours identiques (mêmes définitions, exemples et exercices). Cependant la moyenne de la classe A est de 15% supérieure à celle de la classe B alors que les tests étaient supposément équivalents- X aurait aimé avoir un instrument pour juger objectivement la difficulté cognitive des tests et ce, avant de donner le test.
2. Un enseignant X remarque que plusieurs étudiants ont répondu incorrectement et de la même façon à une question. Il se demande pourquoi. X aurait aimé avoir un pseudo-étudiant (un programme informatique qui simule l'activité cognitive d'un étudiant) dont il aurait pu observer l'activité cognitive pendant la simulation de la résolution de ce problème.

3. Un enseignant X décide de changer l'ordre de présentation de quelques notions d'un cours parce qu'il croit que ce nouvel ordre apparaîtra plus naturel aux étudiants. X a cependant des doutes et aimerait avoir un pseudo-étudiant pour tester si la modification dans l'ordre des chapitres peut avoir des effets négatifs imprévus sur l'apprentissage.

Cet article s'intéresse à un aspect de la tâche de l'enseignant: celui de créer du matériel pédagogique qui soit basé sur l'organisation des connaissances déjà acquises (le savoir et le savoir-faire) et qui tienne compte des processus d'apprentissage des élèves. Dans ce contexte, cet article étudie la possibilité de créer un outil informatisé dans le but d'aider l'enseignant à concevoir un ensemble structuré de définitions, d'exemples et d'exercices qui permettent d'optimiser le temps et la qualité de l'apprentissage dans des domaines comme les mathématiques, la physique et l'informatique.

Cette recherche est originale car même si les théories existantes en psychologie cognitives tentent d'expliquer une, deux ou trois familles de phénomènes comme la reconnaissance et le rappel, la mémoire à long terme et la mémoire à court terme, mais aucune, à notre connaissance sauf ACT* et son successeur ACT-R n'intègre un ensemble de variables suffisant pour expliquer l'apprentissage de tâches complexes comme la programmation ou la construction d'une preuve en mathématique. Les théories pédagogiques sont donc souvent construites sur une juxtaposition de ces théories sans être intégrées formellement dans une structure cohérente.

En outre, les théories psychologiques de l'apprentissage doivent être modifiées pour l'étude des stratégies pédagogiques. En effet, contrairement à l'apprentissage où il est possible de faire abstraction des interactions de l'étudiant avec le tuteur, l'étude des stratégies pédagogiques exige qu'on les mette en relief. Cependant les théories psychologiques comme ACT* et ACT-R n'ont pas été conçues dans ce but, et il n'est pas possible de modéliser ces interactions parce que les relations entre l'étudiant et l'environnement ne sont pas spécifiées clairement. Il apparaît donc nécessaire de créer un modèle qui intègre l'environnement dans lequel interagissent le tuteur et l'étudiant. L'ajout de l'environnement d'apprentissage permet aussi de tenir compte plus objectivement des limites des ressources cognitives de l'étudiant.

Il arrive que des théories non compatibles recouvrent un des ensembles de faits expérimentaux non-dis-

joint. En fonction des objectifs de notre architecture, les différences entre les diverses théories n'ont de l'importance que dans la mesure où les résultats expérimentaux qu'elles expliquent interviennent dans l'apprentissage.

L'atteinte des objectifs de cette recherche nécessite une modélisation 1) du tuteur qui prépare et manipule l'information, 2) de l'environnement dans lequel se fait l'apprentissage et où ont lieu les interactions entre le tuteur et l'étudiant et 3) de l'étudiant. L'architecture cognitive contient les spécifications du système d'apprentissage. Ces spécifications définissent les composantes cognitives de l'apprentissage.

L'article comporte trois parties: la première constitue une brève présentation de l'environnement, la seconde partie expose les fondements psychologiques du modèle et la troisième présente une mise en oeuvre partielle des composantes du modèle et de leur interaction.

2. L'ENVIRONNEMENT

Une des originalités du modèle est qu'il intègre la vision que se fait l'étudiant de l'environnement ainsi que l'environnement lui-même. Cela permet au tuteur de se représenter l'apprentissage de la façon la plus réaliste possible en ne faisant pas abstraction des informations que l'étudiant a à l'écran ou dans un livre.

L'environnement du modèle de l'étudiant est constitué des fenêtres que le modèle a ouvert à l'écran et d'un micromonde du domaine. Ces fenêtres servent de moyens de communication et d'espace de travail. Grâce à ces moyens MIACE¹ peut acquérir de nouvelles connaissances en lisant les définitions que le tuteur a écrit dans ces fenêtres ou prendre conscience d'une question qui lui est posée. Dans cet espace de travail il peut manipuler les objets du domaine à l'aide des outils offerts par le micromonde ou vérifier la validité d'une conception qu'il se fait du domaine.

Dans le cadre de cette application, les outils qu'offre le micromonde permettent de représenter les objets mathématiques comme les nombres, les ensembles et les expressions arithmétiques et algébriques. Le micromonde met à la disposition du modèle des outils semblables à ceux des traitements de texte pour faciliter l'écriture et la lecture comme la recopie d'expressions complexes et l'identification des paires de parenthèses. Il peut aussi offrir des opérateurs spécialisés comme ceux qui permettent de commuter les opérandes d'un opérateur ou d'évaluer une expression arithmétique ou booléenne.

1. MIACE est à l'origine un acronyme pour Modélisation Informatique de l'Acquisition des Connaissances pour un Étudiant et il désigne aussi bien le programme que la théorie.

Les outils permanents correspondent aux connaissances minimales que l'on peut supposer connues et bien maîtrisées de tous les étudiants. Ce sont les opérateurs +, -, et x sur les entiers, la relation d'ordre sur les entiers positifs et les opérateurs booléens à appliquer aux propositions simples.

L'intégration de cet environnement à la modélisation cognitive est un aspect original qui distingue MIACE d'autres réalisations comme ACT*[2], ACT-R [6] ou SOAR [23,27] dans lesquels cet aspect n'est pas pris en considération. Elle permet de tenir compte, de manière plus fidèle des contraintes du support ou des limites qu'offre le milieu de travail. Ces limites concernent principalement l'accessibilité de certains contenus et le nombre d'unités de connaissances qui peuvent être manipulées simultanément lors de la résolution de problèmes. L'intégration de l'environnement d'apprentissage permet aussi de modéliser l'acquisition des connaissances déclaratives et de simuler le comportement de l'étudiant de façon plus réaliste. Dans ACT-R, la représentation de l'environnement est estompée et les connaissances déclaratives doivent être codées directement dans la mémoire. Il en résulte que les difficultés d'interprétations des stimuli de l'environnement que les novices rencontrent ne peuvent être modélisées naturellement. Par exemple, plusieurs enseignants ont noté des simplifications erronées de fractions comme $(\sin x / \cos x) = (\sin / \cos)$ par des étudiants qui n'ont pas interprété sin et cos comme des noms de fonctions mais comme des produits de variables. Le processus de reconnaissance de MIACE permet d'utiliser le contenu des fenêtres où l'information est codée dans un mini-langage et de simuler un tel comportement.

3. LES FONDEMENTS PSYCHOLOGIQUES DU MODÈLE

MIACE est une architecture cognitive développée dans le cadre du paradigme psychologique qui voit l'esprit comme un processeur d'information. L'approche pour déterminer les composantes de MIACE est essentiellement fonction du but: modéliser l'apprentissage. Les construits choisis pour cette fin permettent d'expliquer certaines régularités dans les phénomènes observés lors d'expériences en psychologie cognitive et en neuropsychologie. La pertinence de ces composantes pour l'apprentissage provient aussi de l'importance que certains psychologues [16,17,33] leur accordent pour l'enseignement. L'architecture que nous présentons, parce qu'elle fait abstraction des émotions, de la motivation, des organes de perception et d'action, peut être vue comme l'architecture de la mémoire avec ses mécanismes pour acquérir, organiser et utiliser les connaissances.

La mémoire est subdivisée en deux points de vue: les caractéristiques temporelles associées aux éléments de son contenu et les caractéristiques liées à l'utilisation

de ces contenus dans l'apprentissage. Selon le premier point de vue nous avons adopté les sous-systèmes de mémoire à long terme, de mémoire de travail présentés par les manuels récents de psychologie cognitive [5,8,15]. La difficulté de simuler efficacement le raisonnement à l'intérieur de ces sous-systèmes nous a amené à considérer un troisième sous-système nommé la mémoire conceptuelle à très court terme comme le suggère le modèle de Potter [28].

MIACE ne tient pas compte du sous-système de la mémoire sensorielle qui permet de maintenir pendant une période très brève (0,2 seconde pour les images) les stimulations qui atteignent nos sens. L'information déposée dans cette mémoire est non-analysée et est très proche de la dimension physique des stimuli. Comme dans l'environnement informatisé de MIACE, les stimuli sont construits à partir d'un nombre fini d'objets dont l'identification ne peut porter à confusion ni pour le modèle informatisé de l'étudiant, ni pour l'étudiant réel il s'avère non nécessaire de modéliser le contenu de cette mémoire sous cet aspect. La durée de son contenu a aussi peu d'impact sur l'architecture puisque l'information visuelle est habituellement disponible ou non disponible pour la durée de la résolution d'un problème.

La division selon le second point de vue nous permet de distinguer des types de connaissances. Dans MIACE, les connaissances sont des entités psychiques qui se caractérisent par les mécanismes mis en jeu pour les acquérir et les manipuler et elles ne sont pas à confondre avec les informations car ces dernières appartiennent à une discipline comme les mathématiques ou l'électronique.

Selon Anderson [6], il faut distinguer les connaissances procédurales qui concernent le comment faire et les connaissances déclaratives qui font référence à l'information que nous possédons sur les objets (abstraites et concrètes) et sur la façon de les manipuler. La distinction entre connaissances déclaratives et procédurales s'appuie sur les mêmes faits que ceux présentés dans ACT-R. Cependant à la différence d'ACT-R, les connaissances sémantiques qui sont les informations nécessaires au langage et à la représentation cognitive du monde et les connaissances épisodiques qui, selon la définition de Tulving [38], sont reliées au souvenir d'événements et d'expériences personnelles sont considérées comme distinctes dans MIACE. Dans MIACE, la connaissance épisodique est utilisée cependant dans un sens différent et permet d'encoder sous forme brute l'activité cognitive de MIACE. La notion de connaissance épisodique s'avère nécessaire pour distinguer le particulier du général, par exemple pour distinguer l'occurrence du nombre 234 dans l'addition de $234 + 956$ fait à un moment particulier du concept général associé à ce nombre. Par la suite, le terme de connaissances déclaratives sera utilisé spécifiquement

pour les connaissances génériques nécessaires à la représentation du monde. Ces connaissances interviennent dans le mécanisme de résolution de problème. En effet, celle-ci se fait souvent à partir de la trace d'une résolution d'un problème similaire (connaissance épisodique), elle exige de connaître explicitement le sens des termes utilisés et les relations entre ces termes (connaissances déclaratives) et elle nécessite un certain savoir-faire (connaissances procédurales).

Les termes de mémoire sémantique, procédurale et épisodique réfèrent respectivement aux ensembles des connaissances sémantiques, procédurales et épisodiques munis de leurs propriétés. Le terme de mémoire à long terme permet de référer à l'ensemble des connaissances acquises.

Cette section est divisée en trois parties:

1. La première partie présente la mémoire à long terme dont la capacité est immense et le temps de rétention très grand. Elle contient une description plus détaillée des types de connaissances mentionnés plus haut ainsi qu'une description des mécanismes responsables de leur acquisition.
2. La seconde décrit la mémoire à court terme qui retient les informations sous formes verbales ou visuelles pour une période d'environ deux secondes. Les mécanismes de l'attention et de la gestion du comportement sont aussi présentés dans cette section puisque selon le modèle de Baddeley un des modules de sous-système serait responsable de ces mécanismes.
3. La troisième partie présente la mémoire conceptuelle à très court terme qui retient l'information sous forme conceptuelle.

3.1 La mémoire à long terme

La mémoire à long terme contient le savoir de l'étudiant. Le savoir d'un domaine est ici l'ensemble organisé des connaissances que l'apprenant doit manipuler pour exhiber ses qualifications dans ce domaine. Cette mémoire est elle-même divisée en deux parties: la mémoire générique qui contient l'information générale (connaissance déclarative et procédurale) et la mémoire épisodique qui s'appuie sur cette dernière pour enregistrer les événements vécus.

LES CONNAISSANCES DÉCLARATIVES

Les connaissances déclaratives sont de nature statique et descriptive, elles permettent de donner un sens aux mots d'une phrase ou aux formes reconnues d'une image. Elles correspondent aussi aux étapes intermédiaires dont nous prenons conscience lors d'activités complexes comme intégrer une fonction ou rechercher les causes d'une panne. Les connaissances déclaratives [2] se distinguent des connaissances procédurales par le fait que nous pouvons les encoder

rapidement et indépendamment de la façon dont elles seront employées.

L'unité de connaissances déclaratives [6] ne se définit pas en fonction d'unités syntaxiques comme des lettres ou des chiffres mais plutôt en fonction d'une structure de données semblables aux «chunks» que Miller [26] a décrit comme l'unité pour mesurer la mémoire à court terme.

Les caractéristiques du «chunk» dans MIACE sont similaires à celles d'ACT-R. Le chunk est de dimensions finies et il contient un maximum de trois composantes. La position des composantes dans le «chunk» est significative et, en conséquence, interchanger deux composantes d'un «chunk» modifie sa signification originale. Les «chunks» ont une structure hiérarchique, c'est à dire qu'une composante d'un «chunk» peut être un autre «chunk».

L'apprentissage est le résultat de l'encodage des connaissances et il se manifeste par le rappel de ces connaissances aux moments appropriés. L'apprentissage des connaissances déclaratives est le résultat de deux processus complémentaires: l'élaboration et l'organisation.

L'élaboration permet de relier l'item traité avec la mémoire à long terme et le contexte d'apprentissage. Elle consiste à sélectionner un schéma pertinent en fonction du contexte, à l'instancier et à l'adapter. Plus l'élaboration est le résultat d'une analyse sémantique profonde, plus son encodage est distinctif et plus elle permet de différencier cette connaissance déclarative des autres [13].

L'organisation est le processus complémentaire à l'élaboration. Son but est de créer une trace mnésique spécifique aux faits ou événements alors que celui de l'organisation est de créer des liens entre des connaissances isolées en fonction de certaines relations qui existent entre elles. Ces relations permettent un regroupement basé sur diverses propriétés perceptives, fonctionnelles ou conceptuelles.

LES CONNAISSANCES PROCÉDURALES

Le but des connaissances procédurales est d'automatiser le processus pour résoudre un problème particulier en cours en diminuant le temps de recherche et la quantité d'informations à manipuler. Une connaissance procédurale est le «comment atteindre un but sans utiliser les ressources de l'attention». La reconnaissance des mots dans un texte est un exemple de l'automatisation qui s'est faite depuis que l'on a appris à lire. Il est impossible de ne pas comprendre le mot psychologie lorsqu'on voit la chaîne de caractères qui lui est associée.

Contrairement aux connaissances déclaratives qui peuvent être exprimées, les connaissances procédu-

rales ne se manifestent que par une action ou une suite d'actions accomplies machinalement dans un but suite à la perception d'un ensemble de stimuli. Ce sont elles qui nous permettent d'additionner mécaniquement et sans réfléchir «22 + 10». L'utilisation des connaissances procédurales permet de réduire la complexité cognitive nécessaire à la résolution de problèmes en automatisant la réalisation des sous-buts à l'aide de connaissances procédurales spécifiques. En leur absence, il faut chercher et interpréter à l'aide de connaissances procédurales plus générales des connaissances déclaratives pertinentes pour déterminer les actions réelles ou cognitives nécessaires pour atteindre ces sous-buts. L'interprétation des connaissances déclaratives est une tâche cognitive ardue et une des causes d'erreurs les plus fréquentes chez les étudiants lors de la résolution de problèmes.

Une connaissance procédurale peut être transformée en connaissance déclarative par le biais d'une «réification». Par exemple, l'enseignant qui explicite verbalement la suite des actions pour produire une solution réifie la connaissance procédurale correspondante.

Il est important de remarquer que le type de connaissance est indépendant de l'information qu'elle contient. Par exemple, un sujet peut encoder l'information «position du caractère A sur un clavier» sous forme de connaissance procédurale et sera capable de taper ce caractère sans devoir réfléchir à sa position sur le clavier. S'il n'a pas la connaissance déclarative correspondante, il sera incapable de dire où il se trouve sur le clavier (sauf en s'imaginant l'action qu'il ferait pour taper ce caractère). Cette information peut être encodée sous forme déclarative et le sujet sera capable de situer verbalement la position du caractère sur le clavier mais sera incapable de taper machinalement.

Le modèle d'acquisition des connaissances procédurales est similaire à celui de ACT* [2] où l'unité de connaissance procédurale est représentée par une production.

Une production peut être vue comme une paire condition-réponse. Cette paire est similaire à la paire stimulus-réponse qui forme l'unité de base du comportement selon les théories behaviorales. Cependant dans le contexte de la psychologie cognitive, les conditions sont une combinaison de cognitions résultant de l'analyse des mémoires sensorielles ou d'une autre activité mentale tandis que la réponse peut être une combinaison d'actions réelles ou cognitives. De plus les stimuli comme les réponses contrairement à leur utilisation dans les expériences de psychologie peuvent être paramétrisés. Les productions sont donc à cet égard des connaissances abstraites qui doivent être instanciées pour donner lieu à une action. Les systèmes de production fonctionnent selon un cycle de deux étapes. Dans la première étape, un mécanisme d'appariement de formes crée des instances d'une ou

de plusieurs productions à partir des cognitions actives (celles-ci sont dites dans la mémoire de travail). Lors de la seconde étape, un mécanisme de résolution de conflit permet de choisir l'instance qui sera exécutée. Des tâches complexes peuvent être exécutées en utilisant des séquences de productions. Le système de production utilisé dans ACT* permet par exemple de simuler des habiletés complexes avec une performance similaire sur plusieurs points à celle des êtres humains.

ACT* assume l'existence chez l'étudiant d'un certain nombre de connaissances procédurales primitives lui permettant d'acquérir des connaissances déclaratives à la suite de lectures ou de l'assistance à des cours ainsi que l'existence de méthodes de résolution générales qui s'appliquent à différents domaines [3, 4]. Dans MIACE, les connaissances procédurales primitives sont considérées comme non-décomposables et elles forment les unités de base à partir desquelles toutes les autres connaissances procédurales sont construites.

Dans ce modèle, la compilation est le processus d'acquisition des connaissances procédurales et se divise en deux parties: la procéduralisation et la composition.

La procéduralisation est la création d'une nouvelle production plus spécialisée et plus efficace par l'élimination de l'utilisation de la connaissance déclarative et de son interprétation. Ce processus se déroule en deux étapes:

1. à l'aide des productions déjà existantes et des connaissances déclaratives l'étudiant se représente la séquence des actions sous une forme déclarative,
2. la représentation procédurale de la séquence des actions se développe à partir de la répétition de l'étape 1.

Cette nouvelle production plus spécialisée est plus efficace parce qu'elle n'exige, ni recherche du schéma approprié dans l'ensemble des connaissances déclaratives, ni la mise en correspondance des conditions d'exécution de la production originale avec les éléments du schéma de la connaissance déclarative.

La compilation d'un algorithme par la procéduralisation entraîne la création de plusieurs règles de production. Certaines de ces règles ont pour but de permettre la prise de conscience de connaissances déclaratives qui sont des conditions de déclenchement d'autres productions. Il est théoriquement possible de créer une seule règle de production beaucoup plus efficace que cet ensemble. Cependant, cette production unique ne peut être créée immédiatement et en une seule étape à cause de la capacité de la mémoire de travail. Il est, d'une part, souvent impossible de maintenir dans la mémoire les conditions d'exécution de toutes

les règles et, d'autre part, certaines règles ont des conditions dont la vérification résulte de l'exécution des règles qui précèdent. Le sous-processus de la compilation qui permet d'intégrer plusieurs règles en une seule est la composition. Il s'effectue par étapes prenant deux à deux les règles qui s'exécutent successivement dans un même but pour en créer une troisième qui les remplace.

LES CONNAISSANCES ÉPISODIQUES

La notion de mémoire épisodique, introduite par Tulving en 1972 [38], permet de distinguer les tâches qui demandent au sujet de se rappeler du moment de l'encodage de l'information versus celles qui ne demandent pas un tel souvenir. Ses arguments [34] dérivent des dissociations entre les performances de tâches qui nécessitent la manipulation d'informations acquises à une occasion particulière et les performances de tâches qui ne nécessitent que des connaissances générales. Elles dérivent aussi d'études de cas de patients amnésiques qui ont conservé leurs connaissances sémantiques mais perdu leurs connaissances épisodiques. Ces derniers arguments ont reçu un appui mitigé [30,31,36].

Pour Anderson [2], il existe des types de représentations spécifiques pour les suites temporelles, les images et les propositions abstraites mais ce sont les mêmes processus de la mémoire déclarative qui les manipulent et elles partagent donc les mêmes caractéristiques d'apprentissage (acquisition (storage) et rappel (retrieval)) en tant que connaissances déclaratives. Par contre, les processus d'encodage, de mise en correspondance et d'exécution (action des processus sur eux) sont distincts. La notion d'épisodes de Tulving est distincte de celle de suites temporelles d'Anderson: il est possible d'encoder un événement historique avec une suite temporelle mais cet encodage ne sera pas un épisode puisque le rappel de cet événement historique n'implique évidemment pas l'impression subjective d'avoir vécu celui-ci.

Plusieurs chercheurs selon Richards et Goldfarb [31] admettent l'utilité de ce construit. Cependant [Rich86], les différentes définitions de ce terme soulèvent des controverses sur la relation entre mémoire sémantique et mémoire épisodique: pour Tulving, la mémoire épisodique est imbriquée dans la mémoire sémantique, pour Seamon (voir dans [31]) et Wolters (voir dans [31]), l'imbrication est en sens inverse et pour Lachman & Naus (voir dans [31]), ces deux concepts représentent les extrémités d'un continuum.

Tulving associe des niveaux de conscience (awareness) aux différents sous-systèmes de la mémoire. Le plus bas niveau, celui de conscience anoétique, réfère aux connaissances procédurales, c'est à dire à la capacité d'un organisme de percevoir et de réagir mécaniquement à des stimuli internes ou externes; le second,

celui de conscience noétique, l'objet de cette conscience est la connaissance sémantique, c'est à dire la représentation symbolique que se fait l'organisme des objets et des relations du monde; et le troisième niveau, celui de conscience auto-noétique permet au sujet de prendre conscience de son identité et de son existence dans un espace temporel subjectif qui englobe le passé, le présent et le futur, son objet est la connaissance épisodique [35,37]. Pour d'autres chercheurs (Kihlstrom (voir dans [31]), Lachman & Naus (voir dans [31]), Morton & Beckerian (voir dans [31]), et Olton (voir dans [31])) la notion de conscience n'intervient pas dans la définition de mémoire épisodique. Ils réfèrent à celle-ci comme étant une séquence de sensations vécues lors de l'événement et dont l'encodage et l'accès ultérieur sont automatisés.

Dans un contexte d'apprentissage de matériel scolaire, la mémoire subjective d'avoir réalisé un problème similaire à celui qui est posé est d'une importance secondaire comparée à l'accès à l'encodage des opérations que l'on a effectuées pour réaliser le problème; et dans MIACE la notion de mémoire est utilisée dans ce but. Cependant à la différence de Kihlstrom (voir dans [31]), Lachman & Naus (voir dans [31]), Morton & Beckerian (voir dans [31]), et Olton (voir dans [31]), les sensations ne peuvent être encodées dans la mémoire épisodique puisque MIACE fait abstraction de ces dernières. La mémoire épisodique de MIACE est une liste d'événements vécus ou plus opérationnellement une liste des processus exécutés avec leurs opérands et qui sont des connaissances déclaratives. Le mécanisme de base de cette mémoire permet d'accéder aux épisodes qui sont des sous-listes significatives de celle-ci. Un épisode commence par le dépôt dans la mémoire épisodique d'un but et se termine lorsque ce but est atteint ou lorsqu'un but de même niveau est déposé dans la mémoire épisodique, et dans ce cas, le but précédent est dit abandonné. La définition d'épisode est aussi distincte des suites temporelles d'Anderson puisque contrairement aux suites temporelles, les épisodes ne sont pas constitués uniquement de connaissances déclaratives mais de connaissances procédurales avec leurs opérands et leurs résultats.

Les connaissances sémantiques et procédurales sont le résultat d'abstractions sur des épisodes similaires. MIACE intègre et étend aux connaissances procédurales l'hypothèse principale de Richards et Goldfarb [31] selon laquelle la forme élémentaire de représentation des concepts est l'épisode mnésique et que la mémoire sémantique est le résultat des actions des processus cognitifs sur les épisodes mnésiques.

Chaque épisode crée une connaissance procédurale spécifique ou augmente le potentiel d'activation de la connaissance procédurale si celle-ci existe. Une connaissance procédurale est une structure qui lie la suite des connaissances procédurales exécutées pour

atteindre un but et par conséquent dans sa forme la plus élémentaire un épisode et une connaissance procédurale ont une structure similaire. Cependant la répétition crée des épisodes distincts mais non des connaissances procédurales distinctes.

Les connaissances sémantiques résultent de l'abstraction des étapes intermédiaires de la trace d'un ou plusieurs épisodes similaires. Un exemple simple est la prise de conscience que le résultat de l'addition de 25 et 32 créent la connaissance sémantique contenant l'information «25+32=57».

3.2 La mémoire à court terme

La mémoire de travail est le lieu de l'activité mentale consciente. Depuis les travaux de Baddeley [7] et de Hitch [21] elle est perçue, par la majorité des cognitivistes, comme un ensemble de processus ou de modules en interaction. Selon Baddeley [9], elle serait formée de trois modules.

1. La boucle articulatoire est une mémoire active qui peut être vue comme une bande magnétique qui recircule constamment les items qui y sont enregistrés. C'est à l'aide de cette boucle que l'on peut mémoriser sans se tromper une série d'environ sept syllabes sans signification. Ce module dans le modèle de Potter correspond à la mémoire verbale à court terme qui supporte la compréhension du langage et conserve intégralement l'information pendant deux secondes et la perd graduellement dans les 30 secondes qui suivent. L'information déposée dans cette mémoire correspond à la voix intérieure que l'on entend par exemple lorsqu'on écrit, lit ou que l'on compose un numéro de téléphone.
2. La tablette visuo-spatiale est l'équivalent de la boucle articulatoire pour les images mentales de stimuli visuels ou auditifs. Elle contiendrait 3 emplacements.
3. L'unité de gestion centrale est l'unité de traitement qui permet de superviser les opérations des modules précédents et de coordonner l'exécution de tâches indépendantes.

MIACE réduit la boucle articulatoire et la tablette visuo-spatiale à un seul module qui permet de manipuler un petit nombre d'unités de connaissances déclaratives appelé le centre d'attention de MIACE. Au fur et à mesure que l'exécution d'une connaissance procédurale déplace le centre d'attention, MIACE perd graduellement accès aux contenus des unités des connaissances déclaratives qui étaient dans son centre d'attention quelques instants auparavant. L'information de ce module est accessible sous forme verbatim et elle se distingue dans ce sens de l'information codée dans la mémoire à très court terme. Cet accès à l'information sous forme verbatim doit, pour se manifester, être le résultat du processus de reconnaissance ou

accessible de la mémoire à long terme (ce qui n'est pas toujours le cas). Par exemple, un étudiant à qui on demande verbalement d'additionner 568 et 745, peut se rappeler de ces nombres tant qu'il les maintient dans son centre d'attention, mais au cours du processus d'addition son attention se déplace successivement sur l'addition des unités, des dizaines et des centaines et fréquemment il n'arrive plus à se rappeler de ces nombres.

Le troisième module parce qu'il est responsable de la gestion du comportement constitue le mécanisme de plus haut niveau de MIACE. Comme les recherches de Baddeley ont peu porté sur ce module, MIACE a adapté le modèle de Norman et Shallice (voir [32]) pour spécifier le comportement de MIACE.

Selon ce modèle, deux mécanismes sont suggérés pour choisir et gérer les processus qui déterminent le comportement. Un premier mécanisme permet de simuler l'exécution d'habiletés complexes acquises dans des situations routinières. Ce mécanisme est semblable aux systèmes de production.

Le second est le système de supervision qui gère les situations non routinières. Selon Norman et Shallice, ce mécanisme survient dans les 6 types de situations suivantes: 1) les situations qui impliquent de la planification ou des choix non automatisés, 2) les situations où des erreurs doivent être corrigées, 3) les situations où les causes d'un fonctionnement inadéquat d'un appareil doivent être identifiées, 4) les situations dangereuses ou techniquement difficiles et 6) les situations qui requièrent la modification des habitudes bien acquises [32]. Ce second système intervient en activant ou en inhibant certaines instances de production.

3.3 La mémoire conceptuelle à très court terme

La mémoire conceptuelle à très court terme [28,29] permet de comprendre rapidement des scènes (entre 100 ms et 200 ms) ou des mots (débit d'un mot par 100 ms). Les informations déposées dans cette mémoire disparaissent presque au fur et à mesure (moins d'une seconde) que de nouvelles informations surviennent. Les mots d'une phrase peuvent cependant être retenus plus longtemps car ils peuvent être intégrés dans des structures syntaxiques et sémantiques de la mémoire à long terme.

Contrairement à la mémoire à court terme, la mémoire conceptuelle à très court terme [32] joue un rôle central dans les processus cognitifs. La reconnaissance de stimuli significatifs comme les mots et les objets activent rapidement l'information correspondante et amorcent le rappel de l'information associée à ces éléments. De nouveaux liens entre les concepts activés sont formés à l'aide des mécanismes de l'analyse syntaxique du langage, de l'analyse de scènes ou par des structures de connaissances de haut-niveau. Si ces nouveaux liens résultent d'un schéma déclaratif bien

formé, alors ce schéma déclaratif peut être ajouté à la mémoire à long terme sinon ils disparaissent sans laisser de trace.

Dans la majorité des modèles récents de la mémoire à court terme, la mémoire associée aux processus de manipulation des représentations conceptuelles éphémères est présenté sous le nom de «semantic priming» ou de persistance de l'activation [32]. La mémoire à court terme pour l'information conceptuelle ne peut être simplement l'activation de concepts et de liens déjà présents dans la mémoire à long terme parce que la simple réactivation du contenu existant ne permet pas la création de nouveaux schémas déclaratifs [32].

MIACE utilise le contenu de cette mémoire pour résoudre des problèmes pour lequel il n'a pas de connaissances procédurales bien articulés. L'exemple suivant a pour but d'aider à mieux comprendre la relation entre les contenus de la mémoire à court terme et la mémoire conceptuelle à très court terme pour la résolution de problème.

MIACE doit résoudre $x + 4 = 7$ et il a résolu récemment une équation $x - 5 = 1$. Parce que l'énoncé est court et accessible dans l'environnement, le centre d'attention contient initialement l'énoncé du problème et ses composantes. Faute de connaissances procédurales bien articulées pour le problème MIACE considère les informations accessibles à partir de son centre d'attention, cet ensemble d'informations est déterminé par les schémas formant le centre d'attention et récursivement par les composantes de ces schémas. Les éléments de cet ensemble forment le contenu de la mémoire conceptuelle à très court terme et ils sont ordonnés par leur degré d'activation.

Le degré d'activation d'un schéma est une mesure qui se veut proportionnelle au temps nécessaire pour le reconnaître suite à l'exposition d'un stimulus et s'appuie sur des résultats expérimentaux de recherche sur l'activation sémantique. Ces recherches montrent par exemple qu'il prend moins de temps pour reconnaître le mot ordinateur suite à la présentation d'un mot qui lui est fortement associé comme informatique qu'un autre mot quelconque. Dans MIACE, ce calcul est fonction 1) du nombre de fois que ce schéma est une composante (ou composante d'une composante) d'un schéma qui fait partie du centre d'attention 2) de la distance entre ce schéma et un schéma du centre d'attention et 3) du nombre de fois que ce schéma a été utilisé dans le passé. De plus ce calcul ne s'applique pas uniquement pour les connaissances déclaratives mais aussi pour les connaissances procédurales et épisodiques. Dans le contexte de l'exemple, les connaissances procédurales, les épisodes de résolution de problèmes et les exemples portant sur les équations sont vraisemblablement les connaissances qui ont le plus haut degré d'activation. Les informations concernant l'égalité, l'addition, le nombre 4, le nombre 7 et

les inconnues ont un degré d'activation probablement moindre mais non nul.

Comme le problème ne peut être résolu par des connaissances procédurales spécifiques, c'est le mécanisme de supervision de l'unité de gestion qui gère le comportement de MIACE. Ce mécanisme possède un certain nombre de stratégies comme demander de l'aide, adapter une connaissance procédurale construite dans un même but (résoudre une équation) ou construire une nouvelle connaissance procédurale à partir d'un exemple. Ce module considère plusieurs combinaisons d'éléments de la mémoire de la mémoire conceptuelle à très court terme et de stratégies et il est hautement probable que, dans ce contexte, il considère l'épisode concernant la résolution de l'équation $x - 5 = 1$, la connaissance procédurale très spécifique à ce problème et décide de l'adapter à ce problème spécifique. La description de la résolution du problème et l'adaptation de la connaissance procédurale est trop longue pour être exposée dans cet article. Il est à noter que les détails de l'épisode ne sont pas accessibles en tant qu'éléments de la mémoire conceptuelle à très court terme que pour y accéder MIACE doit amener cet épisode dans le centre de son attention et très probablement retrouver dans l'environnement la trace de la résolution de ce problème.

4. LA MISE EN OEUVRE DU MODÈLE

Cette section présente l'élaboration et l'organisation d'un savoir d'un domaine en s'appuyant sur les résultats de la mise en oeuvre en cours. Il montre aussi, à l'aide d'une simulation, comment MIACE transforme un stimulus de l'environnement dans une structure conceptuelle dont la signification dépend de mécanismes innés et des acquisitions antérieures.

Sur le plan informatique MIACE est une coquille qui peut se comparer à un générateur de système expert. Il dispose d'outils d'acquisition de connaissances et de moyens qui lui permettent de simuler la résolution de problèmes dans un domaine particulier. Ces outils et moyens sont réalisés de façon à respecter le plus fidèlement possible, dans le cadre restreint d'un domaine d'application, les contraintes psychologiques propres aux individus.

MIACE est une coquille car il intègre des éléments indépendants du domaine d'application (l'architecture de la modélisation cognitive) à des éléments spécifiques (le micromonde et les connaissances initiales sur le domaine). La réalisation globale du projet qui s'étend sur trois ans, couvrira à terme de multiples domaines. Le premier de ceux-ci est celui de l'algèbre élémentaire parce que le micromonde est facile à créer et que la littérature décrivant les stratégies cognitives utilisées dans ce domaine est abondante.

L'apprentissage se fait via l'environnement et par l'intermédiaire des définitions, des questions et des exemples qu'un tuteur place dans une fenêtre de travail. Le processus de reconnaissance permet à MIACE d'interpréter cognitivement le contenu de cette fenêtre. Il permet ainsi à MIACE d'accroître sa base de connaissances par la construction de nouveaux schémas déclaratifs.

Lors d'une simulation d'apprentissage d'un domaine quelconque, la structure de la mémoire générique de MIACE est en constante évolution. La structure initiale pour l'apprentissage de l'algèbre contient un certain nombre de classes permettant de simuler les connaissances générales nécessaires pour identifier les principales catégories de concepts. Elle comprend la classe des questions, des exemples et des définitions ainsi qu'un ensemble de processus pour communiquer avec l'environnement ou pour adopter un comportement (memoriser, comprendre, résoudre,...) correspondant aux stimuli de l'environnement. La structure initiale contient aussi un certain nombre de connaissances sur le domaine qui correspondent à celles de l'étudiant réel que l'on veut simuler.

Cette section présente premièrement la structure de représentation des connaissances déclaratives et ensuite le mécanisme d'interprétation cognitive de l'environnement. Ce mécanisme s'appuie sur la théorie psychologique du «chunking» qui envisage le contenu de la mémoire de travail comme un sous-ensemble de la mémoire à long terme. Cette hypothèse est confirmée par plusieurs auteurs [22,25] qui ont travaillé sur l'identification des processus de récupération de l'information dans la mémoire de travail.

4.1 La classe générale des schémas déclaratifs

Il existe une divergence parmi les psychologues sur le mode de représentation des connaissances déclaratives: réseau sémantique ou schémas (frame). Alba et Hasher [1] discutent du support expérimental dont bénéficie chacun de ces modes pour représenter la mémoire humaine. Le principal désavantage des schémas est de ne pouvoir tenir compte que des attributs prévus alors que la mémoire humaine s'avère beaucoup plus riche. Cependant dans un domaine restreint ce désavantage est moins perceptible puisque les attributs significatifs pour ce domaine sont relativement stables. MIACE représente donc les connaissances déclaratives à l'aide de schémas sous forme de classes CLOS et met en oeuvre des mécanismes pour modifier

les attributs d'une classe et tenir compte des instances exceptionnelles.

Le concept le plus abstrait de MIACE est représenté par la classe des schémas déclaratifs qui définit les propriétés² possédées par la majorité des concepts³ d'un domaine d'apprentissage quelconque. Le tableau 1 permet de donner une idée globale de cette classe en décrivant sommairement ses propriétés. Celles-ci seront davantage définies lorsqu'il sera question de décrire les processus où elles interviennent. Il est intéressant de noter immédiatement que les cinq premières décrivent des attributs généraux du concept tandis que les cinq dernières permettent de caractériser les instances. Les propriétés prédéfinies par le langage comme celle de super-classe et de sous-classe ne sont pas mentionnées dans le tableau 1 mais interviennent dans la conception de l'architecture de MIACE.

LES DIFFÉRENTES FORMES DE REPRÉSENTATION

Plusieurs auteurs parlent de deux niveaux de compréhension d'un concept, un de ces niveaux est dit superficiel parce qu'il réfère à l'apparence et l'autre est dit profond parce qu'il réfère à ses traits significatifs. La représentation superficielle permet de reconnaître la forme associée au concept dans l'environnement. La représentation structurée définit la sémantique de ce concept. Elle est notamment utilisée lors de la résolution d'un problème. L'exemple suivant rapporté par plusieurs enseignants met en évidence cette distinction. Un étudiant en algèbre qui essaie de mettre en facteur les expressions «ab + ac» et «ab + a» et qui utilise des chaînes de caractères comme représentation mentale de ces termes a une compréhension mécanique de la mise en facteur. Cette connaissance est réduite à une manipulation de caractères dont le processus consiste à:

1. déterminer les caractères communs aux opérands (ici «a»),
2. écrire:
 - i) ces caractères communs
 - ii) l'expression originale entre parenthèses mais en supprimant ces caractères communs.

L'application de ce processus donne «a (b + c)» comme première réponse et pour la seconde «a(b +)» ou «impossible» si des connaissances sur la syntaxe des expressions algébriques interviennent. Par contre, l'étudiant qui dispose en plus d'une représentation

2. Ces propriétés sont définies à l'aide de facettes ou de méthodes.

3. Les mots concept et classe ont une signification presque similaire dans le texte. Le mot concept met l'accent sur l'aspect cognitif tandis que le mot classe met l'accent sur l'aspect informatique.

conceptuelle donnée comme réponse «a (b + c)» et «a (b + 1)». MIACE tient compte de cette distinction entre la représentation superficielle et la représentation profonde avec les propriétés «r-concept» et «r-visuelle».

La propriété r-objet permet à MIACE d'utiliser une représentation compatible avec le micromonde. S'il y a une calculatrice mise en oeuvre en LISP dans le micromonde alors cette représentation pour un nombre décimal sera un objet LISP de type floating-point. Des méthodes de conversion des représentations permettent à MIACE de détecter les contradictions entre les manipulations cognitives et les manipulations équivalentes faites dans le micromonde. Ces contradictions sont l'occasion d'une interaction pédagogique entre un tuteur réel et MIACE.

Dans MIACE elles sont représentées par des schémas. Ceux-ci sont implantés sous forme de classes si ces connaissances sont génériques (types de schémas) ou sous forme d'instances si au contraire elles sont spécifiques (schémas). Cette organisation tire profit de la propriété d'héritage, elle est ainsi plus compacte et facile à gérer que celle utilisée dans ACT-R où le type de schéma n'est qu'un attribut du schéma.

4.2 Mise en oeuvre du chunking

La théorie psychologique du «chunking» [39] veut que le système parcourt rapidement le stimulus et le recouvre de structures hiérarchiques «chunks» les plus grandes possibles parmi celles qu'il possède déjà. Un expert en Intelligence Artificielle perçoit par exemple «IA» comme un mot qui peut être représenté sous la forme d'un arbre dont la racine est le «chunk» «IA» et dont les deux descendants sont les «chunks» qui correspondent aux lettres alors que le non-expert ne perçoit que les deux «chunks» qui correspondent aux lettres «I» et «A». Le chunking s'applique, bien que sous des formes différentes, aussi bien aux connaissances procédurales qu'aux connaissances déclaratives [39].

La psychologie expérimentale présente des évidences supportant deux approches possibles «top-down» et «bottom-up» pour la mise en oeuvre du chunking. L'architecture de MIACE supporte une approche principalement «bottom-up» par la construction du concept à partir des stimuli. L'analyse de l'application du processus d'interprétation cognitive au stimulus «effectuer 456+789» permet de se donner une bonne idée de la représentation des connaissances génériques dans MIACE.

Le chunking commence par la création d'une représentation conceptuelle [*effectuer*], [*suite-de-chiffres*: «456»], [*symb+*], [*suite-de-chiffres*: «789»] dont la forme correspond aux stimuli de l'environnement. Ce sont des processus primitifs qui font l'analyse lexicale de cette partie de l'environnement et qui réalisent cette création de façon automatique sans faire intervenir

Tableau 1. Propriétés des schémas déclaratifs

NOM	SIGNIFICATION ET CONTENU DES PROPRIÉTÉS
syntaxes	formes et contraintes discriminantes permettant de reconnaître ou créer une instanciation
processus	listes des processus où les instanciations peuvent intervenir comme arguments
relations	liste de toutes les relations dont le domaine contient ce concept
instances	liste des instanciations de ce concept
partie-possible	liste des classes où ce concept peut intervenir en tant que composante de premier niveau
r-concept	représentation structurée de l'objet en termes de la signification de ses parties
r-visuelle	représentation superficielle de l'objet
r-objet	représentation fonctionnelle et manipulable par les outils du micro-monde
partie	objet dont l'instanciation du concept est une partie
lieu	localisation dans l'environnement de l'instanciation du concept

d'aspects psychologiques. Initialement seuls les classes et les processus sont présents ainsi que les concepts primitifs reconnus. La figure 1 montre cet état initial. MIACE a créé cette représentation conceptuelle au moyen d'instances des classes «effectuer», «suite-de-chiffres» et «symboles». Chacune de ces instances est caractérisée par les facettes présentées dans le tableau 1. Seules certaines d'entre elles comme «lieu» ou «r-visuelle» sont mentionnées dans la figure 1. Cette figure montre aussi la hiérarchie des classes qui représentent les schémas déclaratifs correspondants. La classe «symb+» est sous classe de «opérateurs» et de «constantes» et hérite des propriétés de ces classes. La figure 1 montre également les éléments de la mémoire générique qui seront utilisés lors des phases ultérieures. Parmi ceux-ci figure le processus «addition de naturels» qui fait référence aux schémas «addition», «nombres naturels» et «question.xx». la suite de cette phase de représentation conceptuelle, le processus répète un cycle composé de deux étapes.

Lors de la première étape MIACE crée, à l'aide de l'heuristique «classes-possibles», une liste ordonnée des classes ou concepts accessibles qui peuvent recouvrir le stimulus ou une partie de celui-ci. Les éléments de cette liste sont ceux que l'on retrouve dans la facette «partie-possible» des classes auxquelles sont actuellement rattachés les composants du stimulus. Dans le cas du stimulus «effectuer 456+789» ces éléments sont présentés dans le tableau 2.

La liste est ordonnée en fonction du pouvoir discriminant d'une instance. Ainsi est considéré avant <suite-de-chiffres: «789»> puisque ce premier élément

conduit à deux hypothèses de premier niveau: «addition» ou «entier-positif» alors que le second amène à considérer cinq possibilités. Certaines possibilités peuvent être rejetées comme étant non conformes, à cette étape, aux exigences définies dans la facette «syntaxe» d'un schéma déclaratif. Dans l'exemple précédent, l'heuristique exclut question.xx de la liste parce que la syntaxe de l'expression reconnue ou d'une de ses parties devrait être de la forme #((effectuer, opération)). Ceci n'est pas obtenu à ce stade-ci du «chunking» puisqu'aucun élément ne peut être actuellement reconnu comme étant «partie-possible» de «opération». Pour des raisons semblables l'heuristique rejette également «addition», «entier-négatif», «nombre-décimal» et «fraction» pour ne garder que «entier positif» et «naturel». Ces classes forment des concepts plus élaborés que les concepts primitifs initiaux.

Lors de la seconde étape MIACE se forme une nouvelle représentation conceptuelle du stimulus en remplaçant dans l'ancienne un ou plusieurs concepts du cycle précédent par un concept plus élaboré à partir de la liste «classes-possibles». Cette nouvelle représentation peut être pertinente ou non. Un exemple de représentation conceptuelle non pertinente est [*effectuer*, *suite-de-chiffres*:«456»], *entier-positif*: [*(symb+)*, *suite-de-chiffres*:«789»>] parce que cette représentation évolue vers la représentation [*effectuer*, *naturel*: [*suite-de-chiffres*:«456»], *entier-positif*: [*(symb+)*, *suite-de-chiffres*:«789»>] ou [*effectuer*, *entier-positif*: [*(symb+)*,

Tableau 2
Les classes initiales du chunking de «effectuer 456+789»

CLASSE	LA PROPRIÉTÉ «PARTIE-POSSIBLE»
effectuer	question.xx
suite-de-chiffres	naturel, entier-positif, entier-négatif, nombre-décimal, fraction
symbole +	addition, entier positif
suite-de-chiffres	naturel, entier-positif, entier-négatif, nombre-décimal, fraction

<*suite-de-chiffres*:«789»>]] qui ne correspondent à aucun concept connu de MIACE.

Au terme du deuxième cycle, MIACE a émis l'hypothèse qui amène à considérer les suite-de-chiffres comme étant des «naturels». La représentation conceptuelle résultante est [*effectuer*, *naturel*: [*suite-de-chiffres*:«456»], *symb+*, *naturel*: [*suite-de-chiffres*:«789»>]]. La figure 2 montre le résultat de cette conceptualisation. MIACE a créé deux instances de la classe des «nombres naturels». Ces instances sont liées par une référence aux instances de «suite-de-chiffres» correspondant à «456» et «789». Les trois derniers éléments de cette représentation correspondent à une instantiation de la classe «addition» qui ne sera conceptualisée que lors du 4^e cycle. Après le quatrième cycle MIACE reconnaît une question et le processus de

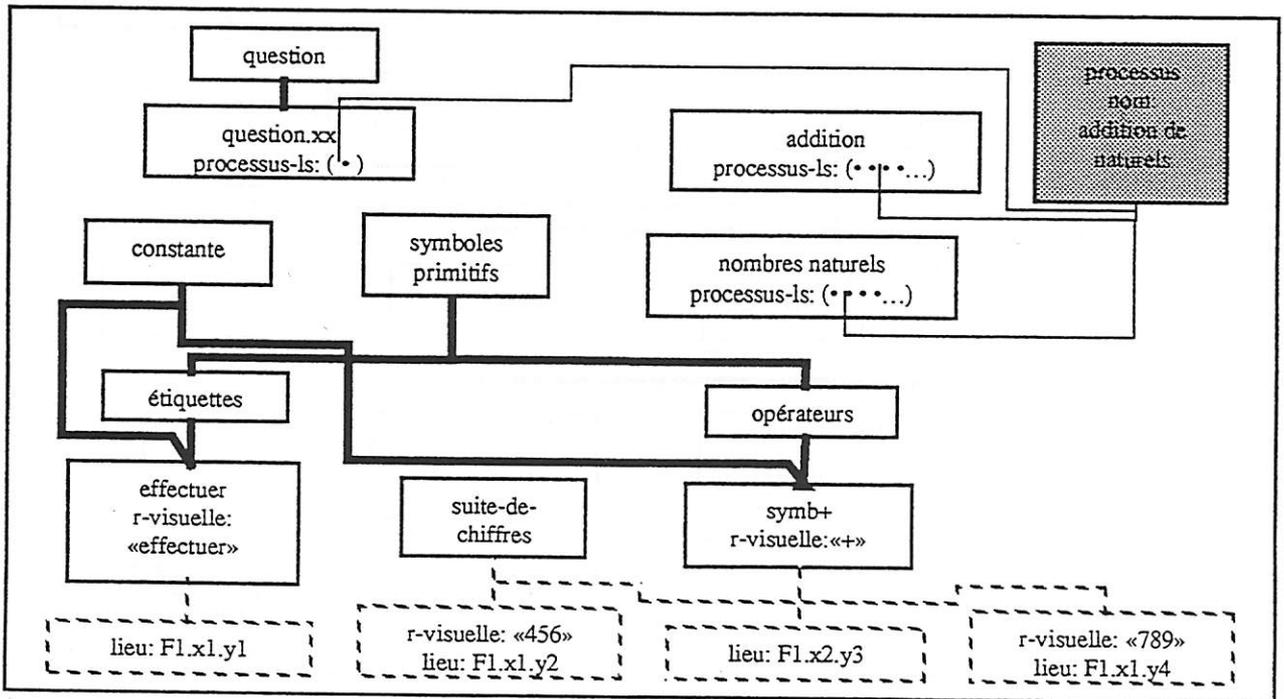


Figure 1
L'état initial du processus de chunking à partir du stimulus «effectuer 456+789»

reconnaissance est terminée. C'est cette situation que présente la figure 3.

Lorsque MIACE reconnaît une question, il tente d'y répondre en exécutant le processus de résolution de problème. Dans l'exemple présenté, ce processus de résolution se retrouve devant la situation la plus simple puisqu'il a accès à la connaissance procédurale «addition de naturels» pour effectuer l'opération demandée.

5. CONCLUSION

MIACE, dans son état actuel, permet déjà des réflexions sur certaines activités pédagogiques. Par exemple, la simulation présentée correspond à une situation où les concepts de nombre naturel, d'entier positif et négatif sont acquis simultanément. Dans ce contexte, MIACE (comme un élève réel sans doute) n'arrive pas à identifier immédiatement le stimulus adéquatement et se forme des représentations conceptuelles intermédiaires non-pertinentes. Cependant la répétition de la simulation avec des données similaires permet, grâce à une table de mémorisation, d'identifier immédiatement des stimuli similaires.

MIACE est un outil de représentation des connaissances dont la valeur cognitive réside dans l'intégration dans une seule architecture des recherches sur des domaines distincts: mémoire de travail, mémoire épisodique, mémoire générique, connaissances déclaratives, connaissances procédurales et connaissances épisodiques. Elle repose aussi sur le respect de certains détails qui par exemple permettent une représentation superficielle ou plus approfondie des concepts.

Sur le plan pédagogique, cet outil s'avère intéressant parce que les connaissances déclaratives et procédurales du domaine ainsi que la trace de l'exécution de ces dernières ont une forme inspectable. Un enseignant pourra utiliser MIACE pour mieux comprendre les multiples interactions cognitives nécessaires pour la réalisation d'une tâche.

Dans le contexte des systèmes tutoriels intelligents (STI), MIACE se distingue par sa capacité d'expliquer les transformations du savoir d'un étudiant. Hennessy [20], Laurillard [24] et Wenger [40] ont souligné l'importance et l'absence de cette qualité dans les modules «modèle de l'étudiant» des STI. Cette qualité permet à un module tuteur d'un STI d'utiliser MIACE pour

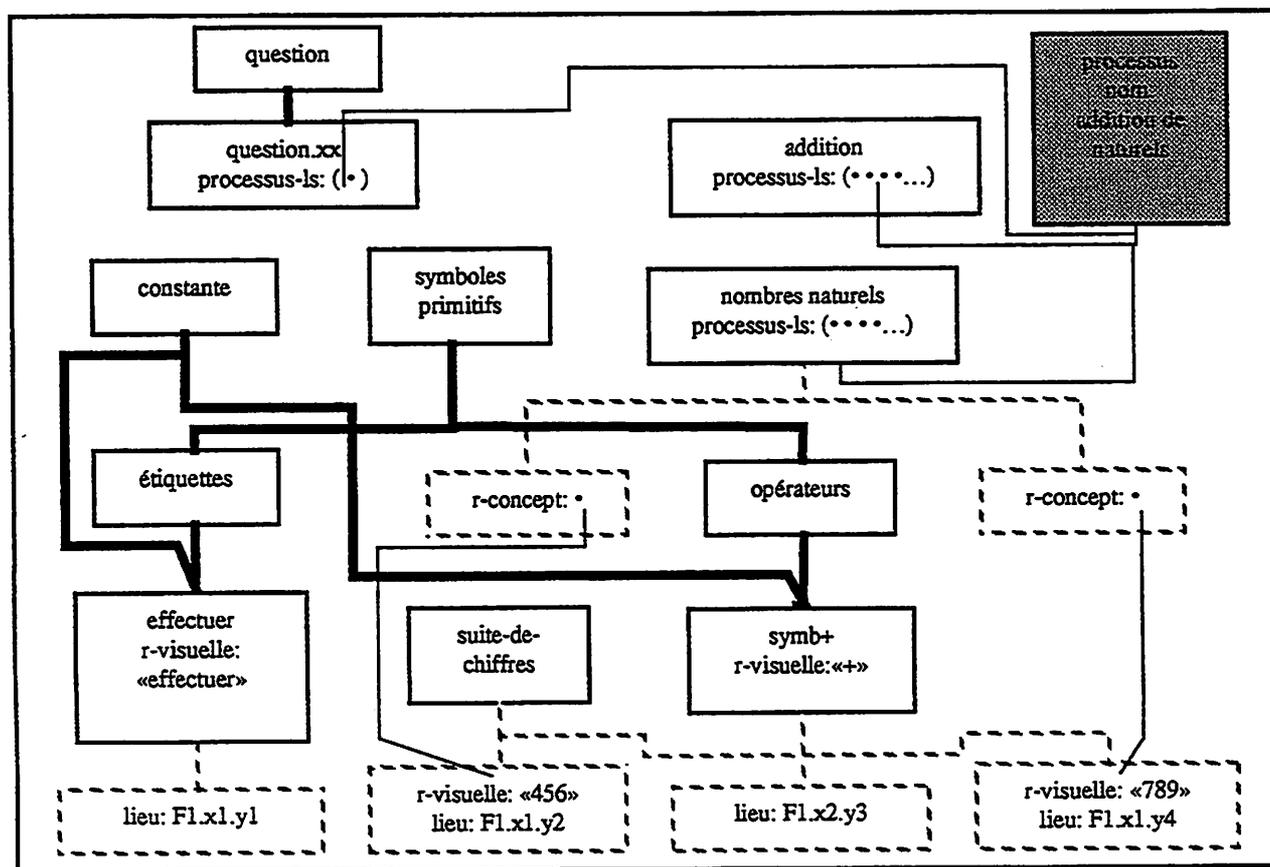


Figure 2
Le résultat du processus de chunking à partir du stimulus «effectuer 456+789» après le 2^e cycle

tester des stratégies pédagogiques avant de les appliquer à un étudiant réel.

Deux principaux points distinguent notre approche de ACT*. Le premier est l'intégration explicite de l'environnement d'apprentissage dans le modèle. Cette intégration permet 1) la modélisation de l'un des mécanismes d'acquisition des connaissances déclaratives, 2) une simulation de la résolution de problème qui tient davantage compte des limites des ressources cognitives de l'étudiant et un lieu naturel pour percevoir non seulement les actions de MIACE mais aussi les interactions entre ce dernier et un tuteur. Le second point est la modélisation des connaissances épisodiques qui sont absentes dans ACT*. L'ajout des connaissances épisodiques permet de créer une structure intermédiaire utilisée dans la formation des connaissances procédurales. MIACE propose aussi une méthode naturelle pour créer de nouvelles connaissances déclaratives, particulièrement celles qui ne sont pas acquises via des définitions formelles mais à la suite de la présentation de plusieurs instances de la nouvelle catégorie proposée.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Alba J. W., Hasher L. (1983). Is memory schematic. *Psychological Bulletin*, Vol. 93, pp. 203-231.

[2] Anderson J. R. (1983). *The Architecture of Cognition*. Harvard University Press.

[3] Anderson J. R. (1987). Skill acquisition : compilation of weak method problem solutions. *Psychological Review*, Vol. 94, No. 2, pp. 192-210.

[4] Anderson J. R. (1989). A theory of the origins of Human Knowledge. *Artificial Intelligence*. Vol. 40, No.3, pp. 313-351.

[5] Anderson J. R. (1990). *Cognitive Psychology & its Implications*. (3rd ed.) W. H. Freeman & compagny.

[6] Anderson J. R. (1993). *Rules of the mind*. Lawrence Erlbaum Associates.

[7] Baddeley A. D. (1981). The concept of working memory: a view of its current state and probable future development. *Cognition*, Vol. 10, pp. 17-23.

[8] Baddeley A. (1990). *Human Memory: Theory and Practice*.

[9] Baddeley A (1992). Working memory. *Science*. 1992 Jan., Vol 255(5044), pp. 556-559

[10] Blouin Y. (1985). *La réussite en mathématiques au collégial: le talent n'explique pas tout*. Québec, Province de Québec: Cégep François-Xavier-Garneau, Service de Psychologie et Orientation.

[11] Blouin Y. (1986). *Réussir en sciences*. Québec, Province de Québec: Cégep François-Xavier-Garneau, Service de Psychologie et Orientation.

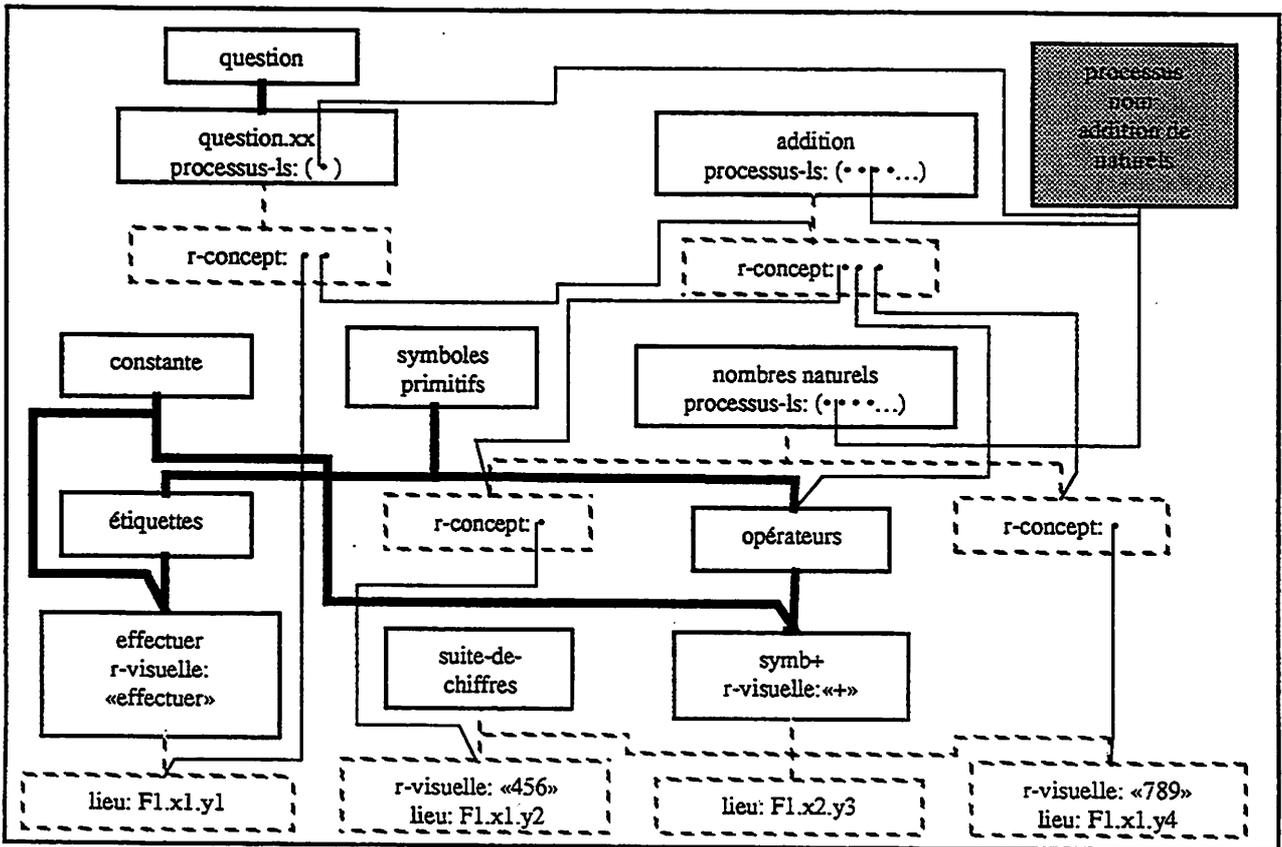


Figure 3
Le résultat final du processus de chunking à partir du stimulus «effectuer 456+789»

- [12] Blouin Y. (1987). *Éduquer à la réussite en mathématiques*. Québec, Province de Québec: Cégep François-Xavier-Garneau, Service de Psychologie et Orientation.
- [13] Craik F. I. M., Lockhart R. S. (1972). Level of processing: a framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, Vol. 11, pp. 671-684.
- [14] Fortin C., Rousseau R. (1989). *Psychologie cognitive : Une approche traitement de l'information*. Sainte-Foy, Province de Québec: Presse de l'Université du Québec.
- [15] Fortin C., Rousseau R. (1989). *Psychologie cognitive : Une approche traitement de l'information*. Sainte-Foy, Province de Québec: Presses de l'Université du Québec.
- [16] Gagné E. D. (1985). *The Cognitive Psychology of School Learning*. Toronto, Canada: Little, Brown and Company.
- [17] Gagné R. M. (1985). *The Condition of Learning*. Fourth ed. New-York: Holt, Rinehart and Winston.
- [18] GIARD J. (1986). *Style d'apprentissage, orientation et apprentissage des mathématiques chez les étudiants du collégial*. Rapport de recherche. Sherbrooke: Collège de Sherbrooke.
- [19] Giard J. (1990). *La didactique des mathématiques dans les collèges: Les ressources du milieu*. Rapport de recherche présenté à la partie collégiale du comité mixte de Performa. Sherbrooke: Collège de Sherbrooke, Service de la recherche et du développement.
- [20] Hennessy S. (1990). Why bugs are not enough. Dans Elsom-Cook M. T. (Ed.) *Guided discovery tutoring: A Framework for ICAI*. London: Paul Chapman Publishing.
- [21] Hitch G. J. (1980). Developing the concept of working memory. Dans Claxton G. (Ed.). *Cognitive Psychology: New Direction*. Routledge: Kagan Paul.
- [22] Kintsch W. (1993). Learning from texts. Conférence donnée le 8 avril 1993 dans le cadre de «McGill Cognitive Science Center: in Honor of Guy Groen», Université McGill, Montréal.
- [23] Laird J. E., Newell A., Rosenbloom P. S. (1987). SOAR: An architecture for general intelligence. *Artificial Intelligence*, Vol 33, No. 1, pp. 1-64.
- [24] Laurillard D. (1990). The pedagogical limitations of generative students models. Dans Elsom-Cook M. T. (Ed.) *Guided discovery tutoring: A Framework for ICAI Research*. London: Paul Chapman Publishing.
- [25] Mandler G. (1985). *Cognitive Psychology: An Essay in Cognitive Science.*, Hillsdale, N. J.:Lawrence Erlbaum Ass.
- [26] Miller G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, Vol. 63, pp. 81-97.
- [27] Newell A. (1990). *Unified Theories of Cognition*. Harvard University Press
- [28] Potter M. C. (1990). Remembering. Dans Osherson D. N., Smith E. E. (Eds.) *An Invitation to Cognitive Science*. (Vol 3: Thinking), pp. 3-32. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- [29] Potter M. C. (1993). Very short-term conceptual memory. *Memory & Cognition*, 1993, 21 (2), pp. 156-161
- [30] Ratcliff R., McKoon G. (1986). More on the Distinction Between Episodic and Semantic Memories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition?*, 12 (2), 312-313.
- [31] Richards D.-D Goldfarb J (1986). The episodic memory model of conceptual development: An integrative viewpoint. *Cognitive Development*. 1986 Jul, Vol 1(3), 183-219.
- [32] Shallice T., Burgess P. (1993) Supervisory control of action and thought selection. In A. D. Baddeley & L. Weiskrantz (Eds.) *Attention: Selection, Awareness, and Control (A tribute to Donald Broadbent)*. Clarendon Press : Oxford, pp. 171-187.
- [33] Tardif J. (1992). *Pour un enseignement stratégique: L'apport de la psychologie cognitive*. Montréal: Les éditions LOGIQUES.
- [34] Tulving E (1983). *Element of Episodic Memory*. Clarendon Press: Oxford.
- [35] Tulving E (1985). How Many Memory Systems Are There? *American Psychologist*, 40 (4), pp. 385-398.
- [36] Tulving E (1986). Episodic and Semantic Memory: Where Should We Go From Here? *Behavioral and Brain Sciences*. 1986 Sep, 9 (3), pp. 573-577
- [37] Tulving E (1993). Varieties of consciousness and levels of awareness in memory. In A. D. Baddeley & L. Weiskrantz (Eds.) *Attention: Selection, Awareness, and Control (A tribute to Donald Broadbent)* Clarendon Press : Oxford, pp. 53-71
- [38] Tulving E. (1972). Episodic and semantic memory. Dans Tulving E., Donaldson W. (Eds.) *Organisation and Memory*. New York: Academic Press.
- [39] VanLehn K. (1989). Problem solving and cognitive skill acquisition. Dans Posner M. I. (Ed.) *Foundation of cognitive science*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press. pp.527-579.
- [40] Wenger E. (1987). *Artificial Intelligence and Tutoring Systems*. Los Altos, Ca.:Morgan Kaufmann Publishers, Inc. ❖