

Utilisation d'un système expert pour l'apprentissage de concepts de nature heuristique en sciences humaines au primaire

Nicole Lebrun et Serge Berthelot

Volume 19, numéro 3, 1993

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/031642ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/031642ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Revue des sciences de l'éducation

ISSN

0318-479X (imprimé)

1705-0065 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Lebrun, N. & Berthelot, S. (1993). Utilisation d'un système expert pour l'apprentissage de concepts de nature heuristique en sciences humaines au primaire. *Revue des sciences de l'éducation*, 19(3), 463–482.
<https://doi.org/10.7202/031642ar>

Résumé de l'article

Cette étude veut vérifier l'efficacité de l'utilisation d'un système expert pour l'apprentissage de concepts de nature heuristique en sciences humaines au primaire. Un schéma expérimental comportant trois groupes, le premier recevant un enseignement traditionnel, le second utilisant le système expert développé et le troisième servant de groupe de contrôle, a été utilisé. Les résultats montrent que, pour les deux concepts concernés, les élèves ayant utilisé le système expert obtiennent des résultats significativement plus élevés au test critérié que ceux du groupe ayant été soumis à un enseignement traditionnel et ceux du groupe de contrôle.

Utilisation d'un système expert pour l'apprentissage de concepts de nature heuristique en sciences humaines au primaire

Nicole Lebrun
Professeure

Serge Berthelot
Professeur

Université du Québec à Montréal

Résumé – Cette étude veut vérifier l'efficacité de l'utilisation d'un système expert pour l'apprentissage de concepts de nature heuristique en sciences humaines au primaire. Un schéma expérimental comportant trois groupes, le premier recevant un enseignement traditionnel, le second utilisant le système expert développé et le troisième servant de groupe de contrôle, a été utilisé. Les résultats montrent que, pour les deux concepts concernés, les élèves ayant utilisé le système expert obtiennent des résultats significativement plus élevés au test critérié que ceux du groupe ayant été soumis à un enseignement traditionnel et ceux du groupe de contrôle.

L'importance accordée à la compréhension des concepts est indéniable. Les nombreuses recherches effectuées dans le domaine sont là pour le démontrer: les concepts constituent un apprentissage important dans toutes les matières académiques, et cela à tous les niveaux d'enseignement. En effet, l'acquisition des concepts semble un préalable à toute démarche éducative qui viserait l'apprentissage d'habiletés supérieures. De plus, avec l'augmentation rapide des connaissances, il serait illusoire de centrer l'enseignement sur la seule transmission des connaissances factuelles alors que ces dernières sont appelées à changer, à augmenter et à évoluer rapidement.

Dans le domaine de la recherche en éducation, l'intérêt porté depuis longtemps au concept est indéniable, si l'on en juge par la multiplicité des travaux réalisés. En effet, Clark (1971) rapportait quelque 250 études ayant traité de l'apprentissage ou de la mesure du concept entre 1940 et 1971. Dans une recension plus récente des écrits, Tennyson et Park (1980) se réfèrent à leur tour à une centaine de travaux exclusivement reliés à l'enseignement des concepts. Cependant, un grand nombre de ces recherches se sont limitées, selon Jeeves et Greer (1983), à l'enseignement/apprentissage de concepts «concrets/réels», laissant de côté les concepts présentant une structure plus complexe et abstraite. Cette limitation a eu les répercussions suivantes:

- 1) un concept peut être défini seulement par quelques propriétés ou par certaines combinaisons logiques simples, communes à toutes les instances positives;

- 2) l'enseignement/apprentissage des concepts se limite souvent à la mémorisation de la définition du concept ou, encore, à dire simplement si un objet est un exemple ou non du concept.

Difficultés d'apprentissage des concepts en sciences humaines

Ainsi, jusqu'à maintenant, dans une vision plus traditionnelle des concepts, l'idée à la base de cette théorie était que tous les exemples ont une ou plusieurs propriétés définies en commun. La présence des propriétés définies était à la fois nécessaire et suffisante pour qu'un exemple soit inclus dans un concept donné. De plus, le sujet était capable d'utiliser les propriétés critiques pour reconnaître également les exemples non familiers du concept.

Cependant, les analyses de Wittgenstein (1970) ont démontré que cette vision traditionnelle de la structure conceptuelle est insuffisante. Certains concepts ont des propriétés bien définies, d'autres pas; le concept «games», par exemple, présente ce que cet auteur appelle des tendances à posséder certaines qualités, telles que la compétition et un mélange d'habiletés et de chance, plutôt que des propriétés clairement définies. Il est facile de montrer, par exemple, qu'un rouge-gorge est un meilleur exemple du concept «oiseau» qu'une autruche ou qu'un pingouin (Rosch, 1973). L'explication vient du fait que certaines propriétés à l'intérieur d'une même catégorie conceptuelle sont probables (l'oiseau peut voler) plutôt qu'obligatoires. Ces observations sont également confirmées par Klausmeier, Ghatala et Frayer (1974) lorsqu'ils distinguent des concepts à validité limitée, tels que «justice» ou «vérité», et des concepts à grande validité, tels que «chien» et «eau». Se référant au premier type de concepts, il est beaucoup plus difficile de trouver un accord sur les attributs de définition, comparativement au second type de concepts. Ces résultats s'expliquent, selon Armstrong, Gleitman et Gleitman (1983) et Landau (1982), par le fait que certaines caractéristiques sont typiques ou représentatives du concept et sont facilement identifiées alors que d'autres sont de type probabiliste et sont plus difficilement reconnues.

Complexité conceptuelle

Ainsi envisagés, le genre, le nombre ainsi que la règle qui relie les attributs critiques d'un concept caractérisent non seulement la nature du concept lui-même, mais ils sont également sous-jacents à la difficulté conceptuelle. En effet, certains concepts présentent une nature structurelle abstraite, complexe et incertaine. Ces types de concepts que l'on retrouve dans la discipline des sciences humaines sont les plus difficiles de tous (Gagné, 1970; Markle et Tiemann, 1969; Fancett (1968). Plusieurs concepts dans le domaine des sciences humaines, tels que «démocratie», «liberté» ou «justice», doivent tenir compte des notions de probabilité dans la détermination de leurs propriétés et de leur règle conceptuelle. Ces derniers ne possèdent pas d'attributs sûrs et certains, mais plutôt des attributs probables, des tendances à posséder telle caractéristique plutôt que telle autre. En effet, parmi les normes qui permettent d'apprécier si un système politique est démocratique ou non, par exemple, il faut reconnaître non seulement la présence ou l'absence des critères

qui le définissent mais le degré de certitude de chacun d'eux. Une élection démocratique est-elle le reflet du pourcentage des participants qui ont exercé leur droit de vote ou bien l'assurance de la confidentialité des votes lors de la journée du scrutin?

L'extension du suffrage est sans doute la preuve directe d'un des grands résultats positifs de la démocratie. Toutefois, on ne peut jamais exprimer de façon précise à quel point une élection est démocratique. Le nombre de partis, le mode de scrutin (représentation proportionnelle, scrutin majoritaire à deux tours, scrutin majoritaire à un seul tour, etc.), la fréquence des élections, le pourcentage de participation du peuple, etc., sont autant d'éléments de quantification dans l'échelle d'une élection dite «démocratique». Les critères pour définir un tel concept sont de deux sortes:

- 1) certains critères peuvent faire l'objet d'une appréciation objective: il est possible de savoir, par exemple, combien de personnes sont inscrites sur les listes électorales, quelle est la fréquence des élections, combien il y a de partis politiques, etc.;
- 2) d'autres critères, par contre, sont incertains, utopiques et sont déterminés par des aspirations idéales: une élection qui comporterait la mise en candidature de quatre partis politiques, par exemple, est-elle plus démocratique que celle comportant trois partis? etc.

Les différences entre telle et telle démocratie sont des distinctions de degré. Évidemment, à un certain point de l'échelle, les différences quantitatives s'additionnent pour produire un changement qualitatif qui peut être évalué en tant que tel. Toutefois, entre les deux pôles extrêmes de l'échelle se situent de grands écarts de variation. Ainsi, aucun pays ne peut prétendre être l'exemple parfait ou le reflet exact d'une «démocratie» à 100 %. C'est ce qui amène la psychologie cognitive à parler de famille de ressemblance ou de théorie probabiliste, cette dernière mettant l'accent, de préférence, sur la probabilité des caractéristiques et les frontières floues des concepts.

Enfin, qu'ils soient d'ordre géographique, social, économique ou historique, les concepts ayant un haut niveau d'abstraction et d'incertitude, un sens large et ambigu, différentes interprétations possibles et plus difficiles à définir par une règle conceptuelle simple, sont nombreux en sciences humaines. Il devient donc relativement facile d'imaginer la complexité de la tâche d'apprentissage lorsque se présente, par exemple, la combinaison suivante: l'existence de propriétés abstraites et de plusieurs propriétés et d'une règle conceptuelle non conjonctive (Martorella, 1972; Carroll, 1964) ou, encore, lorsque l'élève doit définir un concept dont le degré de certitude des propriétés varie.

Incertitude conceptuelle

Une situation d'incertitude survient lorsqu'un phénomène a plusieurs résultats probables sans qu'il soit possible de savoir avec certitude celui qui interviendra. Bien entendu, un phénomène quelconque est d'autant plus indéterminé qu'il possède un nombre élevé de résultats possibles. Les chances, par conséquent, de prédire le résultat qui surviendra sont

moindres. Ainsi, pour un certain nombre de concepts, l'incertitude est levée par des connaissances émanant d'experts; l'on dira qu'un concept est valide dans la mesure où les experts s'entendent sur sa définition, donc sur les propriétés critiques d'un concept. Cependant, le désaccord entre experts est fréquent et les concepts qui ont un niveau relativement peu élevé de validité sont nombreux.

Le problème demeure entier et, pour les fins de cette recherche, la situation se présente comme suit: de façon générale, pour inférer un concept, le sujet choisit les attributs qui lui semblent les plus plausibles à l'aide d'exemples et de non-exemples. Si toutes les propriétés sont spécifiques ou certaines à 100 % et l'information disponible suffisante (exemples et non-exemples), le raisonnement utilisé sera celui de la logique bivalente (Piaget, 1949), c'est-à-dire que toute proposition est affectée de l'une des deux seules valeurs possibles: le vrai et le faux. La démarche qu'utilisera alors l'apprenant sera de type «algorithmique» telle que «a est composé de b, c et d».

Par contre, un problème de résolution s'ajoute lorsqu'une ou plusieurs propriétés critiques sont incertaines. Ces informations manquantes ou incertaines ne bloquent pas le processus de pensée; la pensée humaine fonctionne malgré ce type d'incertitude. Il revient alors à l'apprenant de lever l'incertitude par sa capacité de jugement et de décision. Le raisonnement que l'apprenant devra effectuer sera un raisonnement basé sur l'incertitude, généralement appelé «non monotone» (Bonnet, 1984) ou logique polyvalente caractérisée par le probable (Piaget, 1949); c'est le «domaine de l'heuristique».

Démarche heuristique

L'apprentissage des concepts comme ceux qu'il est possible de retrouver dans les mathématiques peut être, dans l'ensemble, facilement réalisé à l'aide d'une démarche de type algorithmique; cette dernière, définie comme une liste d'instructions ou d'opérations, amène l'apprenant étape par étape à la solution du problème (Lebrun et Berthelot, 1988). Cependant, la situation est tout autre pour l'apprentissage d'un grand nombre de concepts en sciences humaines; si les propriétés du concept sont incertaines, l'apprenant devra être en mesure de juger de la meilleure alternative possible. Dans ce cas, l'identification des propriétés du concept et de la règle conceptuelle ne peut être réalisée que par l'utilisation d'une démarche heuristique. Cette dernière, se définissant comme des «règles de décision» qui tiennent compte des notions de probabilité et de probabilité conditionnelle, permet d'évaluer parmi les cheminements possibles celui qui conduit à la solution «la plus probable» du problème; par exemple: si a et b sont observés, alors b est une hypothèse plausible à 0,8 tandis que l'hypothèse d l'est seulement à 0,1.

Actuellement, selon Laurière (1986) les problèmes formels que l'individu sait résoudre de façon algorithmique représentent une toute petite famille. Tous les autres sont difficiles et ils relèvent du domaine de l'intelligence artificielle. C'est ainsi que plusieurs champs d'activités humaines ont développé des processus heuristiques sur la base de leurs expériences, c'est-à-dire des règles de décision (Rapport, 1967).

Algorithme et heuristique

La question que l'on peut se poser à ce stade-ci est la suivante: Quelles sont les principales différences entre les notions d'algorithme et d'heuristique? La plupart des chercheurs dans le domaine, dont Feigenbaum et Feldman (1963) et Miller, Galanter et Pribram (1960), considèrent que la distinction entre les deux procédés réside dans le fait que les algorithmes garantissent une solution au problème, contrairement aux procédés heuristiques. Pour Landa (1976), les procédés heuristiques représentent davantage un processus de pensée créative supposant de la part de l'apprenant une démarche individualisée de recherche/découverte; dans cette perspective, ces procédés constituent plutôt des règles spécifiques d'instruction qui gouvernent les actions, puisqu'ils ne sont pas les actions elles-mêmes.

Ainsi, la principale différence entre les procédés algorithmiques et les procédés heuristiques réside plus précisément dans le degré de «résultivité», c'est-à-dire dans l'absence de garantie d'arriver à une solution. Dans toute démarche de résolution de problèmes, il s'agit d'établir une relation entre un objet initial (l'information donnée) et un objet final (ce qui doit être prouvé). Cette relation est établie en appliquant à l'objet initial des définitions, des axiomes, des théorèmes, etc., qui sont appelés règles (par exemple, «si a alors b», «si b alors c», etc.) et qui permettent de transformer l'état des données initiales jusqu'à l'obtention d'un certain résultat.

Une fois le système complété, il s'agit de tester toutes les voies possibles qui permettent de résoudre le problème. Mais, parfois, les voies de solution sont si nombreuses (dans le jeu d'échecs par exemple, le nombre de possibilités est estimé à 10^{120}) qu'il est impossible de les vérifier complètement et d'établir l'algorithme. Il devient alors nécessaire d'utiliser des règles heuristiques afin d'établir le nombre de voies de solution possibles. La démarche heuristique devient la démarche appropriée parce qu'elle se base ainsi sur l'évaluation de certaines règles ou de certains cheminements au lieu de les vérifier tous.

Heuristique et apprentissage de concepts

Dans le cadre de cette recherche, qui porte sur l'apprentissage de concepts abstraits, complexes et incertains en sciences humaines, le nombre de possibilités à évaluer est relativement peu élevé. Toutefois, la question demeure la même. Dans l'apprentissage de ce type de concepts, l'apprenant est appelé à déterminer la probabilité des propriétés spécifiques de quelque objet ou de classes d'objets jusqu'à maintenant inconnus. Ainsi, la démarche qui décrit la stratégie de recherche apte à résoudre ce type de problème est heuristique, telle que définie plus haut. Elle tient compte, entre autres:

- 1) de la difficulté de chacune des propositions (temps moyen de vérification);
- 2) du nombre de ces propositions;
- 3) de la distribution de la probabilité de ces propositions (Landa, 1976).

Par exemple, pour un concept dont les temps de vérification des caractères sont identiques mais dont les probabilités de ces caractères ne le sont pas, l'apprenant est appelé à évaluer la meilleure stratégie de vérification possible de la façon suivante (Landa, 1976):

$$(p(a) < p(b) < p(c)) \text{ et } t(a) = t(b) = t(c) \rightarrow T(c) > T(b) > T(a)$$

Cette notation se lit ainsi: si la probabilité du caractère $a <$ la probabilité du caractère $b <$ la probabilité du caractère c et si le temps de vérification du caractère $a =$ le temps de vérification de $b =$ le temps de vérification de c , alors la meilleure stratégie consiste à identifier le caractère c , puis le caractère b , et finalement le caractère a .

Il est donc possible de voir que l'évaluation de la meilleure voie qui conduit vers la solution de ce type de problème est présentée comme une fonction de la difficulté (temps) de chaque proposition, de leur probabilité et de leur qualité.

Cependant, on ne saurait demander à un apprenant de niveau primaire de formuler ces procédés heuristiques sous forme de règles dont la base, rappelons-le, repose sur la quantification et le calcul de probabilités. Comme le rapporte Piaget (1950), dès l'âge de sept ans, les enfants sont en mesure d'énoncer des jugements de probabilité par une anticipation intuitive de l'ensemble, une anticipation basée sur les expériences passées. La quantification des probabilités ou des rapports impliqués dans l'évaluation d'un phénomène consiste principalement dans les aspects suivants:

- 1) une schématisation appropriée du phénomène à l'étude;
- 2) une analyse des possibilités avec construction de l'ensemble des possibilités et construction des possibilités en jeu;
- 3) une pondération de cet ensemble de possibilités (Borel, 1952).

Elle implique en plus, dans le cadre de cette recherche, des calculs mathématiques de probabilités afin de formuler adéquatement les règles de décision. Évidemment, ces calculs mathématiques mettent en jeu des opérations qui dépassent les compétences de l'élève.

Malgré le fait qu'on ne puisse demander à l'élève de construire une heuristique qui soit la plus efficace et la plus rationnelle possible (avec les calculs mathématiques impliqués), il est cependant possible d'aider ce dernier à découvrir les caractères des phénomènes, à déterminer leur structure logique et à prendre une décision la plus étayée possible, non plus simplement de façon aléatoire, par la voie d'approximations successives, mais issue de possibilités empiriques dont chacune a fait préalablement l'objet d'une pondération et de calculs mathématiques par des experts. De cette façon, il est permis d'espérer non seulement l'atteinte d'une meilleure qualité dans les connaissances chez l'apprenant mais également le développement d'aptitudes à analyser les faits et à formuler des systèmes d'actions opérationnels et des prises de décisions rationnelles.

C'est dans cette perspective que nous croyons que la modélisation des procédés heuristiques à l'aide d'un programme informatique (système expert) peut représenter une approche particulièrement intéressante pour l'illustration et la compréhension à la fois de la structure logique et des différentes interactions des phénomènes en cause.

Système expert: modélisation des procédés heuristiques

Le développement des systèmes experts correspond à une des premières applications opérationnelles du domaine de l'intelligence artificielle. Ce champ de l'intelligence artificielle se concentre particulièrement sur la construction de programmes dans des domaines professionnels spécialisés. L'objectif de ces programmes n'est plus de prouver, ou de trouver une solution absolue à un problème, mais plutôt d'y apporter la meilleure réponse possible dans l'état des connaissances sur le domaine considéré, celle à laquelle aboutiraient les experts (Cordier, *in* Vandeginste, 1987). Il s'agit alors d'introduire l'expérience et le mode de raisonnement des spécialistes dans ces systèmes experts afin de fournir à des utilisateurs moins compétents une aide à la prise de décision. Comme le souligne Landa (1976), les systèmes experts s'avèrent ainsi d'excellents outils de modélisation d'une démarche heuristique.

Composantes d'un système expert

L'une des caractéristiques essentielles des systèmes experts est constituée par la séparation entre la représentation des connaissances mises en œuvre et les procédures de résolution qui les utilisent. Les connaissances sont ainsi considérées comme des données interchangeables, susceptibles d'être corrigées ou mises à jour, ou encore exploitées par des programmes qui simulent les mécanismes de raisonnement et assurent l'interface avec les utilisateurs (Cordier, *in* Vandeginste, 1987). Ces deux parties indépendantes dans le système expert sont appelées respectivement une base de connaissances et un moteur d'inférence.

La base de connaissances est la clé d'un système expert et est propre au domaine traité. Elle regroupe toutes les connaissances qu'utilise un expert du domaine considéré: description des objets, inventaire des cas particuliers, différentes stratégies de résolution de problèmes, etc. Les connaissances qu'utilisent les experts dans leur spécialité sont transmises généralement au système expert sous la forme de règles de production. L'utilisation d'opérateurs logiques tels que «ou», «non», ou encore l'utilisation de variables et de quantificateurs peut être également exprimée dans les règles de production, reflétant en cela les routines des experts du domaine considéré. De plus, comme les règles de production reflètent l'expérience de l'expert, elles doivent traduire obligatoirement dans certains cas la plus ou moins grande certitude face à certaines connaissances. L'utilisation de pondération ou de coefficient de vraisemblance permet de traduire ce type de connaissances. Ainsi, dans l'exemple suivant, l'affirmation «il est probable à 60 % ...», est traduite par la pondération 0,6:

Si le site de la culture est le sang et si l'organisme est gram négatif, et si l'organisme est de ferme bâtonnet, et si le patient est un hôte à risque, alors il est probable (0,6) que l'organisme est le *pseudomonas aeruginosa* [extrait de MYCIN (système expert): in Waterman, 1986].

Le moteur d'inférence est le cœur du système expert. Alimenté par la base de connaissances, il construit la solution en décidant des règles à déclencher et de l'ordre dans lequel elles doivent être appliquées. Le fonctionnement de base dans le moteur d'inférence comporte trois étapes principales:

- 1) le processus de détection qui consiste à déterminer les règles applicables;
- 2) le processus de décision qui consiste à choisir une règle;
- 3) le processus d'application qui consiste à exécuter la partie action et à mettre à jour la base de faits.

La définition et la qualité des règles affectent de façon déterminante les plus ou moins bonnes performances du système. C'est pour cette raison que plusieurs systèmes experts intègrent l'utilisation de métarègles qui, transmises par l'expert, expriment des stratégies de choix entre les diverses règles.

Certains auteurs dont Waterman (1986) et Brachman, Amarel, Engelman, Engel More, Feigenbaum et Wilkins (1983) semblent s'entendre sur les caractéristiques de base que devrait posséder un système expert. Elles sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1
Caractéristiques d'un système expert (adaptation de Waterman, 1986)

Propriétés	Description	Applications
Expertise	<ul style="list-style-type: none"> • Présenter la performance d'un expert. • Posséder un haut niveau d'habiletés. • Être d'une efficacité adéquate. 	<ul style="list-style-type: none"> • Haute performance dans l'incertitude et la complexité. • Résolution des problèmes auquel il est destiné. • Identification de solutions efficaces.
Manipulation symbolique	<ul style="list-style-type: none"> • Représenter la connaissance de façon symbolique. • Reformuler la connaissance de façon symbolique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Raisonnement symbolique. • Inférence de nouveaux faits.
Complexité et difficulté	<ul style="list-style-type: none"> • Manipuler des domaines de problèmes difficiles. • Utiliser des règles complexes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alternatives nombreuses. • Méthode de recherche heuristique. • Complexité des règles à cause de leur nature ou de leur nombre.
Raisonnement	<ul style="list-style-type: none"> • Examiner son propre raisonnement. • Expliquer ses opérations. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inclusion parfois de métarègles. • Plausibilité, exactitude et logique des conclusions.

Démarche réflexive et efficacité des systèmes experts

La démarche proposée dans l'enseignement des sciences humaines est de nature inductive et réflexive (Gouvernement du Québec, 1983). Elle vise à développer la conceptualisation chez l'enfant et implique une observation successive et dynamique de la connaissance en vue de juger d'une situation et de prendre une décision éclairée et étayée. L'observation, l'interrogation, la réflexion, etc., constituent des étapes importantes dans le cheminement de la démarche. Ainsi, tout moyen, tout médium ou toute stratégie pédagogique qui permettraient une démarche réflexive de la part de l'apprenant représentent des éléments importants. Le système expert peut être envisagé de cette façon, c'est-à-dire comme un médium pouvant contribuer à la démarche réflexive de l'apprenant.

En effet, non seulement le système expert permet l'utilisation d'une base de connaissances sur le domaine enseigné, correspondant exactement à l'expertise que l'on cherche à transmettre, mais il favorise également l'apprentissage de modes de raisonnement ou de méthodes de résolution de problèmes. Les systèmes experts sont des systèmes interactifs qui permettent, entre autres, de décider dans quelle probabilité la réponse fournie par l'apprenant est juste ou fautive, d'évaluer les différentes réponses données par l'apprenant, de détecter les erreurs et, finalement, d'expliquer son propre raisonnement en justifiant ses choix, comme le ferait une personne compétente. On peut donc penser que l'apprenant, en utilisant le système expert comme outil d'aide à la décision, pourrait acquérir le mode de raisonnement de ce dernier. De plus, il est important de noter que l'immédiateté de la réponse donnée aux élèves sur un concept de nature heuristique ne pourrait être réalisée de façon efficace dans un contexte d'enseignement de type traditionnel, à cause, notamment, des nombreuses possibilités de réponses et de calculs probabilistes qui en découlent.

Ainsi, en raison des difficultés que représente l'apprentissage d'un certain nombre de concepts en sciences humaines, cette recherche veut vérifier si l'établissement et la modélisation, à l'aide d'un système expert, de procédés heuristiques basés sur l'analyse de la structure logique objective de la matière à enseigner, et des propriétés informatives, constitue une alternative pertinente quant à l'apprentissage/enseignement de concepts. En effet, cette démarche a une signification non seulement pour la construction adéquate de l'enseignement, mais aussi pour l'analyse des mécanismes réels de la pensée des élèves au cours de l'apprentissage. Bien que très peu de systèmes experts aient été spécifiquement développés à des fins éducatives, l'enseignement assisté par système expert nous amène à relever les nombreux avantages qu'il comporte comparativement à l'enseignement de type traditionnel. C'est ce que nous allons vérifier.

L'hypothèse de cette recherche est formulée de la façon suivante: l'utilisation d'un système expert comme outil d'aide à la décision est plus efficace pour l'apprentissage des concepts de nature heuristique en sciences humaines chez les élèves de troisième primaire (groupe d'âge 8-9 ans) et de quatrième primaire (groupe d'âge 9-10 ans) que l'apprentissage des mêmes concepts par un enseignement traditionnel. Rappelons que le vocable enseignement traditionnel est utilisé dans le cadre de cette recherche pour désigner la démarche préconisée dans l'enseignement des sciences humaines par le ministère de l'Éducation.

Démarche expérimentale

Le schéma expérimental utilisé fait appel à trois groupes parallèles, soit deux groupes avec traitement (utilisation d'un système expert et enseignement traditionnel) et un groupe de contrôle. La comparaison statistique entre les résultats obtenus aux tests critériés par les élèves des groupes expérimentaux va permettre de vérifier l'hypothèse de cette recherche. Quatre groupes de 30 élèves chacun (8-9 ans et 9-10 ans) et deux contenus différents ont été retenus afin de contrôler l'effet spécifique à la fois d'un contenu et de l'âge sur la vérification de l'hypothèse.

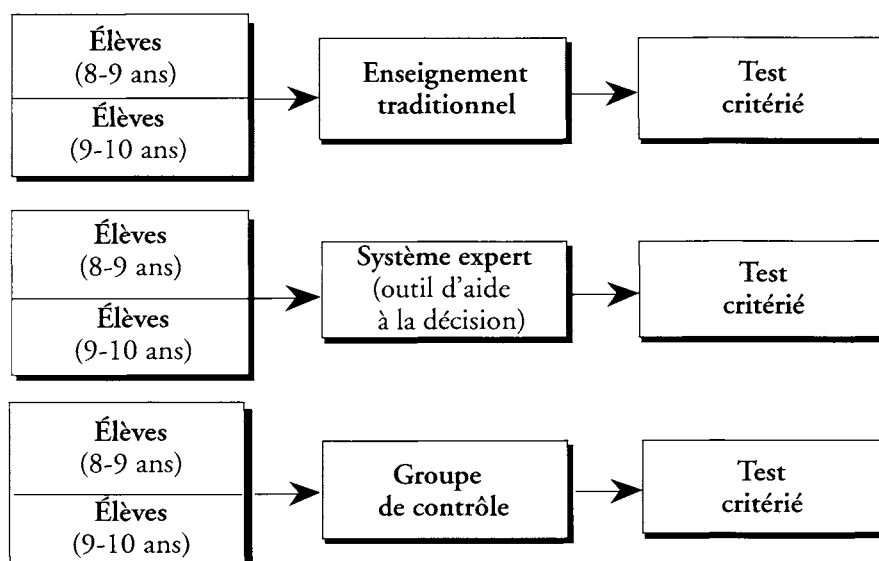


Figure 1 – Schéma expérimental

Analyse du contenu d'enseignement

Les concepts retenus dans le cadre de la présente étude sont le concept de «culture» pour le groupe d'élèves de 8-9 ans et le concept de «démocratie» pour le groupe d'élèves de 9-10 ans. Une analyse précise et valide des concepts sélectionnés s'avère d'une grande importance à la fois pour la construction du système expert et pour leur enseignement et leur évaluation. L'analyse des concepts a donc suivi les étapes suivantes:

- 1) analyse documentaire afin de relever les différentes considérations des auteurs dans le domaine;

- 2) analyse effectuée auprès d'un groupe d'experts à l'aide d'une technique structurée de groupe, appelée *Delphi*, afin de déterminer les propriétés des concepts;
- 3) validation de l'analyse des concepts auprès d'un groupe d'enseignants de niveau primaire.

Le tableau 2 résume les caractéristiques des deux concepts et présente la pondération ou le coefficient de vraisemblance (V) établi par un groupe d'experts suite aux différentes étapes d'analyse du contenu d'enseignement.

Tableau 2
Caractéristiques des concepts «démocratie» et «culture»

<u>Démocratie</u>		<u>Culture</u>	
Propriétés	V	Propriétés	V
• Représentants élus par le peuple	9,9	• Langue	8,3
• Respect des droits et des libertés	9,8	• Habitudes de vie familiale	7,6
• Honnêteté lors du décompte des votes	9,4	• Art/Artisanat	7,6
• Droit de vote à chaque personne	9,3	• Religion/Croyances	7,6
• Libre circulation de l'information	8,8	• Habitation	7,2
• Possibilités de plusieurs candidats	8,3	• Nourriture	7,1
• Majorité au suffrage (50 + 1)	8,2	• Fêtes/Folklore	6,9
• Sécurité des gens assurée lors du vote	7,9	• Jeux/Sports/Loisirs	6,1
• Droit au vote secret	7,7	• Habillement/Vêtements	5,3

Construction du système expert

Le système expert a été élaboré en respectant les objectifs du programme de sciences humaines, les étapes du processus d'apprentissage de concepts (Markle et Tiemann, 1969; Mechner, 1967; Klausmeier *et al.*, 1974, 1979); les *designs* de production de matériel didactique (Romiszowski, 1974; Anderson, 1976) ainsi que les étapes de construction d'un système expert (Hayes-Roth, Waterman et Lenat, 1983; Mishkoff et Feigenbaum, 1986; Waterman, 1986). L'ensemble du matériel didactique, dont le système expert, a été soumis par la suite à une évaluation formative auprès d'un groupe d'élèves.

Tout en comprenant les principales composantes propres à ce type de médias, le système expert visant l'apprentissage des concepts «culture» et «démocratie» respecte en plus dans cette recherche un certain nombre de spécificités (qualité graphique, vitesse d'exécution, questionnement et niveau décisionnel simplifiés, etc.) puisqu'il sera utilisé par des élèves du niveau primaire.

L'interface entre l'utilisateur et le système expert est un aspect important et sert à la communication entre le système expert et l'utilisateur; elle inclut nécessairement un questionnement et attend les réponses afin de prendre une décision adéquate. Dans le cadre de cette recherche, les questions ne sont pas les mêmes pour les deux concepts. De plus, comme ces questions s'adressent à des utilisateurs du niveau primaire, elles doivent comporter des phrases simples et être d'un niveau décisionnel relativement facile, telles que «Utilisent-ils

la même langue que toi?», «Leurs vêtements ressemblent-ils aux tiens?», etc., pour le concept de «culture», et «Tous les candidats à l'élection sont-ils élus par les élèves de la classe?», «Le vote est-il secret?», pour le concept de «démocratie».

Les règles de production dans cette recherche consistent non seulement à identifier et à représenter le concept et ses caractéristiques sous forme de règles, mais elles doivent tenir compte également de l'incertitude des informations en associant une pondération ou un facteur de certitude à chacune des propriétés du concept. Rappelons que cette étape a été réalisée précédemment par des experts dans le domaine. Voici un exemple de règle pour le concept de «culture»: si (langue 8,3) et (vêtements 5,3) et (nourriture 7,1) et (sports/jeux 6,1) et (maisons 7,2) et (religion 7,6) et (fêtes 6,9) et (habitudes de vie familiale 7,6) et (art/artisanat 7,6) sont identiques, alors la culture est identique à la vôtre.

La prise de décision par le système expert implique entre autres la vérification de chaque composante de la règle en posant à l'utilisateur les questions appropriées, la recherche dans la base de connaissances des faits connus et la déduction d'une conclusion en calculant les probabilités à partir des informations données par l'utilisateur. Ainsi, à chaque fois que l'utilisateur apporte une information supplémentaire, le système expert est plus en mesure d'actualiser sa décision. Les décisions que le système expert est en mesure de rendre en fonction du concept de «culture» par exemple sont de ce type: «Vous avez sûrement un exemple de votre culture.» «Probablement, vous avez un exemple de culture différente de la vôtre», etc. L'apprenant est alors en mesure de comparer sa décision à celle de l'expert placé dans pareille situation.

Utilisation du système expert

Le système expert peut être utilisé de deux façons différentes: par l'élève comme outil d'aide à la décision et par l'enseignant ou tout autre utilisateur pour la création d'une nouvelle banque de connaissances du système expert. La première utilisation qui fait l'objet de cette recherche est décrite plus particulièrement. Elle est constituée des étapes suivantes.

- 1) Identification de l'élève: Cette étape permet l'identification de l'élève et la présentation d'informations nécessaires à l'utilisation du système expert. Cette étape d'identification est utile car elle permet le repérage des réponses et des résultats d'un élève en particulier.
- 2) Choix du fichier de travail: Cette étape permet à l'élève de choisir le fichier sur lequel il désire travailler. Ces fichiers sont regroupés en fonction des concepts à l'étude, c'est-à-dire ceux de «culture» et de «démocratie».
- 3) Interrogation de l'élève par le système expert: Cette étape, à l'aide d'images et de situations illustrant les exemples et les non-exemples de «culture» et de «démocratie», permet à l'élève de s'interroger et de porter un jugement sur l'énoncé de chacune des caractéristiques essentielles des concepts présentés par le système expert. Rappelons que ces énoncés formulés sous la forme de questions et décrits antérieurement prennent la forme suivante: «Utilisent-ils la même langue que toi?» «Leurs vêtements ressemblent-

ils aux tiens?», etc. À la question posée, l'élève peut répondre par oui, par non et par un point d'interrogation, s'il n'a aucune idée de la réponse. Ultérieurement, les réponses de l'élève, mémorisées par le système expert, aideront ce dernier à émettre une décision.

- 4) Révision des réponses par l'élève: Lorsque toutes les questions ont été posées par le système expert, l'élève a le choix de revoir ses réponses pour y apporter, selon le cas, les modifications nécessaires ou de passer à l'étape suivante.
- 5) Prise de décision par le système expert: cette étape permet à l'élève de visualiser la décision prise par le système expert en fonction des informations qui lui ont été données. Rappelons que cette décision est formulée de la façon suivante: «Vous avez sûrement un exemple de votre culture», «Vous avez sûrement un exemple de culture différente de la vôtre», etc.
- 6) Fin ou non de la séance de travail: cette étape permet à l'élève de réutiliser le système expert pour prendre une autre décision ou mettre fin à sa séance de travail.

Élaboration des tests critériés

Les tests critériés pour vérifier les performances des apprenants ont été construits de la façon suivante: premièrement, les items ont été formulés de façon à vérifier chacun des objectifs portant sur l'apprentissage des concepts à l'étude du programme des sciences humaines; deuxièmement, une validation des items auprès d'experts ainsi qu'une vérification de la lisibilité des tests (niveau de langue, longueur des phrases, etc.) ont été réalisées et, troisièmement, une évaluation formative a été conduite auprès d'un certain nombre d'élèves non engagés dans la processus de l'expérimentation.

Résultats

Dans cette partie, nous présentons l'essentiel des résultats qui ont permis la vérification de l'hypothèse de cette recherche en suivant les étapes indiqués ci-après:

- 1) indépendamment des concepts;
- 2) en fonction du concept de culture;
- 3) en fonction du concept de démocratie;
- 4) comparaison des moyennes obtenues par les différents groupes expérimentaux de cette recherche.

Vérification de l'hypothèse de recherche

Rappelons que cette recherche servait à vérifier l'efficacité de l'utilisation d'un système expert comme outil d'aide à la décision pour l'apprentissage de concepts en sciences humaines. Cette hypothèse ne spécifie pas le contenu d'apprentissage, ni les modalités d'application des différentes démarches. La vérification de cette hypothèse implique donc la comparaison statistique entre les cotes obtenues au test critérié par les élèves qui ont

utilisé un système expert comme outil d'aide à la décision pour l'apprentissage des concepts et ceux qui ont utilisé une démarche traditionnelle. Finalement, à ces groupes expérimentaux s'ajoute un groupe de contrôle. Ce dernier groupe, qui n'a reçu aucune formation, permet de vérifier l'efficacité de chacun des traitements pour l'apprentissage des concepts. Les tableaux 3 et 4 rapportent ces calculs statistiques.

Tableau 3
Analyse de la variance pour la vérification de l'hypothèse de recherche indépendamment du concept

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrés	Estimation de la variation	F
Intergroupe	2	23 120,3	11 560,2	53,4
Intragroupe	93	20 119,5	216,3	
Total	95	43 239,8		

Probabilité = 0,999999

Tableau 4
Comparaison statistique des groupes pris deux à deux pour la vérification de l'hypothèse de recherche indépendamment du concept

Groupe	Moyenne	Groupe	Moyenne	Test <i>t</i>	Degré de liberté	Probabilité
Expert	82,3	Traditionnel	62,4	5	62	0,999998
Expert	82,3	Contrôle	44,3	10,3	62	0,999999
Traditionnel	62,4	Contrôle	44,3	5,1	62	0,999998

Comme les tableaux précédents le montrent, la démarche préconisant l'utilisation d'un système expert s'avère statistiquement plus efficace que la démarche traditionnelle pour l'apprentissage de concepts, lorsque mesurée par un test critérié. De plus, qu'il s'agisse de la démarche utilisant un système expert ou de la démarche traditionnelle, toutes les deux permettent une acquisition des concepts supérieure à celle par groupe de contrôle, les sujets expérimentaux de ce dernier groupe n'ayant reçu aucune formation relative au contenu expérimental. Par conséquent, l'hypothèse de cette recherche, à l'effet que l'utilisation du système expert est plus efficace pour l'apprentissage des concepts de nature heuristique en sciences humaines que l'apprentissage des mêmes concepts par un enseignement traditionnel est confirmée. Regardons en détail maintenant la vérification de l'hypothèse de cette recherche en fonction de chacun des deux concepts.

Vérification de l'hypothèse en fonction du concept de culture

Il serait intéressant de vérifier si une démarche utilisant un système expert pour l'apprentissage du concept de culture permet l'atteinte de résultats statistiquement plus élevés qu'une démarche traditionnelle lorsque mesurés par un test critérié. Le tableau 5 présente une analyse de la variance comparant les trois groupes expérimentaux. Par la suite, au tableau 6, les résultats d'une comparaison deux à deux des groupes sont rapportés; la comparaison est établie à l'aide d'un test *t*.

Tableau 5
Analyse de la variance pour la vérification de l'hypothèse de recherche
en fonction du concept de culture

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrés	Estimation de la variation	F
Intergroupe	2	13 883,2	6 941,6	49,9
Intragroupe	45	6 262,8	139,2	
Total	47	20 145,9		

Probabilité = 0,999999

Tableau 6
Comparaison statistique des groupes pris deux à deux pour la vérification
de l'hypothèse de recherche en fonction du concept de «culture»

Groupe	Moyenne	Groupe	Moyenne	Test <i>t</i>	Degré de liberté	Probabilité
Expert	89,5	Traditionnel	67,3	5,4	30	0,999997
Expert	89,5	Contrôle	47,9	11	30	0,9999999
Traditionnel	67,3	Contrôle	47,9	3,92	30	0,999762

Comme les tableaux précédents le montrent, la démarche utilisant un système expert s'avère statistiquement plus efficace pour l'apprentissage du concept de culture, au seuil $P \leq 0,01$, telle que mesurée par un test critérié, que la démarche traditionnelle. De plus, les scores obtenus par les élèves du groupe expert s'avèrent également statistiquement supérieurs, au seuil $P \leq 0,01$, à ceux obtenus par les élèves du groupe de contrôle. Il en est de même pour les élèves du groupe traditionnel par rapport aux élèves du groupe de contrôle.

Vérification de l'hypothèse en fonction du concept de démocratie

De la même façon que pour le concept de culture, il peut être également intéressant de vérifier si une démarche utilisant un système expert pour l'apprentissage du concept de démocratie permet l'atteinte de résultats statistiquement plus élevés, tels que mesurés par un test critérié, qu'une démarche traditionnelle.

Les tableaux 7 et 8 illustrent que la démarche utilisant un système expert s'avère statistiquement plus efficace pour l'apprentissage du concept de démocratie, au seuil $P \leq 0,01$, telle que mesurée par un test critérié, que la démarche traditionnelle. De plus, les scores obtenus par les élèves du groupe expert s'avèrent également statistiquement supérieurs, au seuil $P \leq 0,01$, à ceux obtenus par les élèves du groupe de contrôle. Il en est de même pour les élèves du groupe traditionnel par rapport au élèves du groupe de contrôle.

Tableau 7

**Analyse de la variance pour la vérification de l'hypothèse de recherche
en fonction du concept de démocratie**

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrés	Estimation de la variation	F
Intergroupe	2	9 454,2	4 727,1	19,4
Intragroupe	45	10 993	244,3	
Total	47	20 447,9		

Probabilité = 0,999999

Tableau 8

**Comparaison statistique des groupes pris deux à deux pour la vérification
de l'hypothèse de recherche en fonction du concept de démocratie**

Groupe	Moyenne	Groupe	Moyenne	Test <i>t</i>	Degré de liberté	Probabilité
Expert	75	Traditionnel	57,5	2,8	30	0,99538
Expert	75	Contrôle	40,6	5,9	30	0,999999
Traditionnel	57,5	Contrôle	40,6	3,5	30	0,999149

Comparaison des moyennes des groupes expérimentaux

Dans le cadre de cette recherche, les résultats au test critérié sur le concept de culture sont relativement supérieurs aux résultats du test critérié sur le concept de démocratie, les moyennes étant respectivement de 89,5, 67,5 et 47,9 pour le test sur le concept de culture et de 75, 57,5 et 40,6 pour le test sur le concept de démocratie. Afin de pousser plus loin cette analyse sur ce dernier point, il est possible de réaliser une comparaison entre les différents groupes expérimentaux en fonction d'un concept donné. Ainsi, lorsqu'on regroupe les moyennes des groupes expérimentaux pour le concept de culture et les moyennes des groupes expérimentaux pour le concept de démocratie, nous obtenons les résultats qui apparaissent dans la figure suivante.

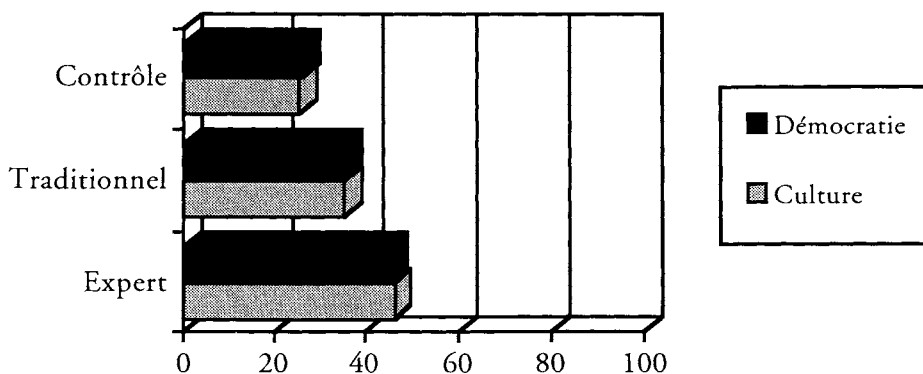


Figure 2 – Comparaison des moyennes des groupes expérimentaux aux deux tests critériés

La figure 2 montre, indépendamment du concept, des tests et de l'âge des sujets, que les groupes expérimentaux d'un ensemble comparés aux groupes expérimentaux de l'autre ensemble conservent proportionnellement les mêmes résultats. Par conséquent, dans le cadre de cette recherche, il est permis de penser que le choix des concepts n'influence aucunement la difficulté relative aux traitements expérimentaux qui sont respectivement le groupe expert, le groupe traditionnel et le groupe de contrôle.

Interprétation

Cette étude vient confirmer l'efficacité d'une démarche qui utilise un système expert comme outil d'aide à la décision pour l'apprentissage des concepts de nature heuristique en sciences humaines. Notons quelques observations qui peuvent justifier l'utilisation d'une telle démarche ainsi que son efficacité.

Le système expert indique à l'élève les opérations cognitives impliquées dans le procédé d'acquisition des concepts. Rappelons à ce sujet que l'identification des attributs essentiels de la classe conceptuelle, ainsi que l'utilisation conjointe d'exemples et de non-exemples, assurent une acquisition plus efficace que l'un ou l'autre de ces éléments seuls (Feldmann, 1972; Frayer, 1970) en favorisant respectivement les procédés de généralisation et de discrimination (Tennyson, Woolley et Merrill, 1972; Markle et Teimann, 1973).

Le système expert détermine lui-même l'ordre des procédures pour la prise de décision sur les concepts présentés à l'élève. L'apprentissage des concepts est facilité par la proposition de règles de décision. Ces dernières augmentent la performance de l'apprenant en permettant à celui-ci d'atteindre les critères exigés dans un temps minimum. Elles demeurent particulièrement importantes pour la maîtrise des concepts au niveau formel (Martorella, 1972; Frayer et Klausmeier, 1971).

Le système expert assure un *feed-back* immédiat. Notons que l'immédiateté et la fréquence du *feed-back* sont des critères très importants. En effet, le *feed-back* a d'autant plus d'impact qu'il suit immédiatement l'étude d'une situation concrète. Il permet à l'apprenant de vérifier sa compréhension et d'en tirer un meilleur profit que s'il était temporellement éloigné. Le système expert, en raison de l'analyse des réponses données par l'élève et du calcul des probabilités de ces dernières, se donne comme objectif de donner une réponse immédiatement après le questionnement.

Le système expert dirige les actions des élèves tout au long du processus d'apprentissage des concepts par des instructions et un questionnement appropriés. Le système expert, en raison de son questionnement intrinsèque, amène l'élève à se poser des questions justes et appropriées afin de découvrir les caractéristiques du concept.

Le système expert permet à l'élève de comparer sa décision à celle d'un expert dans le domaine. Son utilisation comme outil d'aide à la décision donne, en effet, la possibilité à l'apprenant de comparer son propre jugement à celui formulé par le système expert. De plus, il permet d'attirer l'attention de l'élève sur l'importance à juger de la plausibilité des différentes alternatives émises.

En résumé, parce qu'il englobe à la fois les principes essentiels du processus d'apprentissage (microgradation, *feed-back*, etc.) et les caractéristiques d'un enseignement conceptuel de qualité, le système expert contribue à l'amélioration de l'apprentissage des concepts. Toutefois, soulignons que ces principes ne sont pas l'apanage exclusif du système expert et tout moyen didactique qui les inclurait aurait probablement des incidences sur l'amélioration de l'apprentissage.

Conclusion

L'efficacité d'un système expert pour l'apprentissage des concepts en sciences humaines corrobore les quelques études (Landa, 1976) réalisées dans ce domaine. Il est possible de croire que l'utilisation d'un système expert permet une meilleure opérationnalisation pour l'apprentissage de concepts en indiquant, entre autres, les opérations cognitives impliquées dans le processus de découverte des propriétés des concepts, en déterminant l'ordre des procédures à suivre pour identifier les concepts et en suggérant les règles de décision pour inférer correctement le concept. De plus, il permet à l'apprenant de comparer son raisonnement et d'évaluer ses propres décisions avec celles du système expert au même titre qu'un spécialiste dans le domaine.

Par conséquent, il serait souhaitable que d'autres études soient entreprises afin de vérifier l'utilisation d'un système expert dans d'autres disciplines, avec des groupes d'élèves et des contenus différents de ceux utilisés dans cette recherche. À cet effet, la vérification de la rétention des apprentissages pour des périodes plus ou moins longues de temps ainsi que l'utilisation d'un système expert comme outil d'aide à la structuration de la pensée pourraient constituer des aspects intéressants de recherche afin de pouvoir conclure véritablement de la supériorité d'une démarche pédagogique sur l'autre.

Abstract – This research examines the efficiency of using an expert system for learning heuristic concepts in the human sciences at the primary level. The experimental design included three groups: the first was involved in traditional teaching; the second used the expert system developed; the third was a control group. The results show that, for the two concepts examined, the students who used the expert system obtained significantly higher results on a criteria designed test than those in the traditional teaching or in the control groups.

Resumen – Este estudio pone en relieve la eficacia de la utilización de un sistema experto para el aprendizaje de conceptos de tipo heurístico en ciencias humanas en la escuela primaria. Se elaboró un esquema experimental que comprende tres grupos: el primero, recibe una enseñanza tradicional; el segundo, utiliza el sistema experto desarrollado; el tercero, sirve de grupo control. Los resultados muestran que para los conceptos aludidos, los alumnos que recurren al sistema experto obtienen resultados significativamente más elevados en el test criteriado que aquellos del grupo sometido a la enseñanza tradicional y a los del grupo control.

Zusammenfassung – Diese Untersuchung studiert den Nutzen einer «Expertenmethode» beim Erlernen von Begriffen heuristischer Natur in humanistischen Fächern an der Volksschule. Es wurde ein Experimentierschema für drei Gruppen ausgearbeitet: die erste erhält einen traditionellen Unterricht; die zweite benützt die erarbeitete «Expertenmethode»; die dritte dient als Kontrollgruppe. Bezüglich der beiden verwendeten Methoden zeigen die Ergebnisse, dass die Schüler, die sich der «Expertenmethode» bedienen, bei objektiven Tests bedeutend bessere Ergebnisse erzielen als die beiden anderen.

RÉFÉRENCES

- Anderson, R. H. (1976). *Selecting and developing media for instruction*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Armstrong, S. L., Gleitman, L. R., Gleitman, H. (1983). What some concepts might not be. *Cognition*, 13, 263-308.
- Bonnet, A. (1984). *L'intelligence artificielle. Promesses et Réalités*. Paris: InterÉditions.
- Borel, E. (1952). *Valeur pratique et philosophie des probabilités*. Paris: Gauthier Villars.
- Brachman, R. J., Amarel, S., Engelman, C., Engel More, R. S., Feigenbaum, E. A. et Wilkins, D. E. (1983). What are expert systems? In F. Hayes-Roth, D. A. Waterman et D. B. Lenat (dir.), *Building expert systems* (p. 31-57). Londres: Addison-Wesley.
- Carroll, J. B. (1964). Words, meanings, and concepts. *Harvard Educational Review*, 34, 178-202.
- Clark, D. C. (1971). Teaching concepts in the classroom: A set of teaching prescriptions from experimental research. *Journal of Educational Psychology*, 62, 253-278.
- Cordier, M. O. (1987). Les systèmes experts. In P. Vandeginste (dir.), *La recherche en intelligence artificielle*. Paris: Seuil.
- Fancett, V. S. (1968). *Social science concepts and the classroom*. New York: Syracuse University. (ERIC Document Reproduction Service N° ED 033 142).
- Feigenbaum, E. A. et Feldman, J. (1963). *Computers and thought*. New York: McGraw-Hill.
- Feldman, K. V. (1972). *The effects of number of positive and negative instances, concept definition, and emphasis of relevant attributes on the attainment of mathematical concepts* [Techical Report N° 243]. Madison, WI: Wisconsin Research and Development Center for Cognitive Learning.
- Frayer, D. A. (1970). *Effects of number of instances and emphasis of relevant attribute values on mastery geometric concept by fourth and sixth grade children* [Technical Report N° 116]. Madison, WI: Wisconsin Research and Development Center for Cognitive Learning.
- Frayer, D. A. et Klausmeier, H. J. (1971). *Variables in concept learning: Task variables* [Theoretical Paper N° 28]. Madison, WI: Wisconsin Research and Development Center for Cognitive Learning.
- Gagné, R. M. (1970). *The conditions of learning*. New York: Holt Rinehart and Winston.
- Gouvernement du Québec (1983). *Guide pédagogique. Primaire. Sciences humaines. Histoire, géographie, vie économique et culturelle*. Québec: Ministère de l'Éducation.

- Hayes-Roth, F., Waterman, D. A. et Lenat, D. B. (1983). An overview of expert systems. In F. Hayes-Roth, D. A. Waterman et D. B. Lenat (dir.), *Building expert systems* (p. 3-31). Londres: Addison-Wesley.
- Jeeves, M. A. et Greer, G. B. (1983). *Analysis of structural learning*. Londres: Academic Press.
- Klausmeier, H. J. (1979). *Cognitive learning and development: Information processing and piagetian perspectives*. Cambridge, MA: Ballinger Publishing.
- Klausmeier, H. J., Ghatala, E. S. et Frayer, D. A. (1974). *Conceptual learning and development. A cognitive view*. New York: Academic Press.
- Landa, L. N. (1976). *Instructional regulation and control*. Englewood Cliffs, NJ: Educational Technology Publications.
- Landau, B. (1982). Will the real grandmother please stand up? The psychological reality of dual meaning representations. *Journal of Psycholinguistic Research*, 11, 47-62.
- Laurière, J. L. (1986). *Intelligence artificielle. Résolution de problèmes par l'homme et la machine*. Paris: Eyrolles.
- Lebrun, N. et Berthelot, S. (1988). Utilisation d'une démarche algorithmique pour la résolution de problèmes d'orthographe grammaticale. *Revue des sciences de l'éducation*, XV(1), 37-55.
- Markle, S. M. et Tiemann, P. W. (1969). *Really understanding concepts: Or in frumious pursuit of the jabberwock*. Champaign, IL: Stipes.
- Markle, S. M. et Tiemann, P. W. (1973). Remodeling a model: An elaborated hierarchy of types of learning. *Educational Psychologist*, 10(3), 147-158.
- Martorella, P. H. (1972). *Concept learning. Designs for instruction*. Scranton, PA: Intext Educational Publishers.
- Mechner, F. (1967). Behavioral analysis and instructional sequencing. In P. C. Lange (dir.), *Programmed instruction. The Sixty-sixth Yearbook of the National Society for the Study of Education*, (Part II, p. 81-103). Chicago, IL: National Society for the Study of Education.
- Miller, G. A., Galanter, E. et Pribram, K. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt.
- Mishkoff, H. C. et Feigenbaum, E. A. (1986). *Understanding artificial intelligence*. Dallas, TX: Texas Instruments Information Publishing Center.
- Piaget, J. (1949). *Traité de logique*. Paris: Armand Colin.
- Piaget, J. (1950). *Introduction à l'épistémologie génétique*. Paris: Presses universitaires de France.
- Rapoport, A. (1967). *Combats, débats et jeux*. Paris: Dunod.
- Romiszowski, A. J. (1974). *The selection and use of instructional media: A systems approach*. Londres: Kogan Page.
- Rosch, E. (1973). On the internal structure of perceptual and semantic categories. In T. E. Moore (dir.), *Cognitive development and the acquisition of language* (p. 111-140). New York: Academic Press.
- Tennyson, R. D. et Park, O. C. (1980). The teaching of concepts: A review of instructional design research literature. *Review of Educational Research*, 50(1), 55-70.
- Tennyson, R. D., Woolley, F. D. et Merrill, M. D. (1972). Exemplar and non-exemplar variables which produce correct concept classification behavior and specified classification errors. *Journal of Educational Psychology*, 63(2), 144-152.
- Waterman, D. A. (1986). *A guide to expert systems*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Wittgenstein, L. (1970). *Philosophical investigations*. New York: Macmillan.