



Quels apprentissages sont-ils possibles avec des exercices multimédia en classe ? Réflexions théoriques et compte rendu d'une expérience

Céline Lemercier*, André Tricot**, Isabelle Chênerie***, Didier Marty Dessus****, Frédéric Morancho***** et Jérôme Sokoloff***

* Laboratoire Travail et Cognition, UMR CNRS et Université de Toulouse 2

** CERFI, IUFM de Midi Pyrénées & Laboratoire Travail et Cognition, UMR CNRS et Université de Toulouse 2

*** Laboratoire Antennes, Dispositifs et Matériaux Micro-ondes, Université de Toulouse 3

**** Laboratoire de Génie Electrique, Université de Toulouse 3

***** Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, CNRS et Université de Toulouse 3

Introduction

Depuis le début des années 1960, les façons de concevoir les environnements d'enseignement par l'intermédiaire d'un ordinateur ont été fortement influencées par deux disciplines : la psychologie, en particulier la psychologie des apprentissages, et l'informatique, en particulier l'intelligence artificielle. Ces façons de concevoir ont suivi les modes de ces deux disciplines (voir la synthèse de Bruillard, 1997). L'enseignement programmé du début des années 60 était très béhavioriste. Les tuteurs intelligents des années 70-80 étaient des systèmes experts. Le langage LOGO était une tentative d'application de l'approche constructiviste de Piaget. Depuis la fin des années 80, les environnements informatisés d'apprentissage sont souvent des hypermédias, c'est-à-dire des documents interactifs et multimodaux, que l'on retrouve principalement sur des cédéroms ou sur le Web.

Parallèlement à cela, ceux qui réfléchissaient à la conception d'outils informatiques pour l'apprentissage, ou à leur utilisation, étaient généralement associés à ceux qui réfléchissaient à l'innovation pédagogique. Ce n'était pas tant qu'il fut nécessaire de s'intéresser à l'ordinateur pour tenter de réaliser des innovations pédagogiques, mais tout se passait comme si ceux qui s'intéressaient à l'ordinateur en pédagogie devaient nécessairement s'intéresser à l'innovation pédagogique. Par exemple, parmi les pionniers des hypermédias pédagogiques, Spiro et Jehng (1990) ont proposé une approche où le scénario pédagogique consistait en un « paysage conceptuel entrecroisé » : les apprenants pouvaient revisiter le même contenu selon des perspectives conceptuelles différentes en empruntant des itinéraires différents. Ces auteurs assuraient qu'un tel environnement d'apprentissage informatisé permettrait le développement de liens associatifs non linéaires entre des contenus qui rendaient cette approche d'entrecroisement explicite (Swan, 1994). Jacobson et Spiro (1995) ont montré

que cette approche améliorerait le transfert de connaissances plutôt que l'acquisition de connaissances nouvelles. Ils ont proposé un second scénario pédagogique du même type où ils montraient explicitement des relations entre les composantes abstraites et les composantes particulières de la connaissance à transmettre, dans divers contextes. Pour eux, ce type de scénario contribuait à préparer des apprenants à utiliser la connaissance de manière nouvelle dans de nouvelles situations. Bref, ces auteurs, comme beaucoup d'autres, cherchaient à concevoir des scénarios pédagogiques innovants pour des technologies nouvelles. De nos jours encore, cette conception est très répandue.

Des années 60 aux années 80 pourtant, on ne peut pas dire que cette utilisation de l'ordinateur à des fins d'apprentissage ait connu un grand succès, en dehors des revues ou des ouvrages dans lesquels les chercheurs publiaient leurs travaux. Si théoriquement ces travaux étaient passionnants, dans la pratique, peu d'élèves dans peu de classes utilisaient vraiment l'ordinateur pour apprendre. Ce décalage est sans doute lié à un problème d'équipement, mais aussi à un problème de conception. Au début des années 90, quelques auteurs ont commencé à aborder la conception de ces systèmes selon une approche d'ingénierie cognitive (voir notamment la série d'ouvrages issus des ateliers de Technologies Éducatives Avancées de l'OTAN : Jonassen & Mandl, 1990 ; Giardina, 1992 ; Oliveira, 1992). En bref, on semble progressivement renoncer depuis une dizaine d'années aux approches « descendantes » (*i.e.* concevoir c'est appliquer une théorie pour réaliser un artefact) au profit d'approches d'ingénierie (*i.e.* concevoir est un procédé méthodique de prise en compte d'un ensemble de contraintes et de connaissances au service de buts à atteindre, pour réaliser un artefact).

Dans ce rapport, nous voudrions montrer qu'il y a un intérêt à concevoir des environnements d'apprentissage informatisés à partir de tâches scolaires. Nous utilisons pour cela un exemple de tâche scolaire (les exercices) dans un domaine de contenu (l'électricité) et avec certains apprenants (étudiants en 1^{ère} année de DUT). Nous montrons, à partir d'une évaluation de différentes versions d'un exerciceur en travaux pratiques d'électricité, l'apport de technologies rudimentaires aux apprentissages réalisés et aux conditions de réalisation de ces apprentissages. Selon nous, une application éducative n'a pas à être obligatoirement innovante au niveau de son scénario pédagogique. Elle doit plutôt être :

- utile : faire réellement apprendre ce que l'on veut faire apprendre ;
- utilisable : facile à utiliser, ne posant pas de problèmes de prise en main, ne faisant pas perdre de temps, ne produisant pas des erreurs ou des *bugs* ;
- acceptable : compatible avec les pratiques, les contraintes, les objectifs de la situation d'enseignement de référence.

Nous voudrions maintenant montrer en quoi notre approche se distingue d'autres. Nous insisterons en particulier sur le statut des théories de l'apprentissage dans le domaine des environnements informatisés d'apprentissage et sur le statut que nous leur donnons.

Théories de l'apprentissage, artefacts et situations d'enseignement

L'importance des théories de l'apprentissage dans le domaine des environnements informatisés d'apprentissage est réelle. D'après Erica de Vries (sous presse), on peut catégoriser les principaux types de « logiciels éducatifs » relativement à leur fonction pédagogique, à la théorie à laquelle ils se réfèrent, aux tâches qu'ils proposent aux élèves et aux connaissances qu'ils sont censés permettre de construire.

Fonction pédagogique	Type de logiciel	Théorie	Tâche	Connaissances
Présenter de l'information	Tutoriel	cognitiviste	Lire	présentation ordonnée
Dispenser des exercices	Exercices répétés	béhavioriste	Faire des exercices	association
Véritablement enseigner	Tuteur intelligent	cognitiviste	Dialoguer entre autres	représentation
Captiver l'attention et la motivation de l'élève	Jeu éducatif		Jouer	
Fournir un espace d'exploration	Hypermédia	cognitiviste constructiviste	Explorer	présentation en accès libre
Fournir un environnement pour la découverte de lois naturelles	Simulation	constructiviste	Manipuler, observer	modélisation
Fournir un environnement pour la découverte de domaines abstraits	Micro-monde	constructiviste	Construire	Matérialisation
Fournir un espace d'échange entre élèves	Apprentissage collaboratif	cognition située	Discuter	construction de l'élève

Tableau 1. Les huit fonctions pédagogiques et leurs caractéristiques, selon De Vries

Les situations scolaires ou périscolaires où les élèves font des exercices correspondent à un type de logiciel. Pour De Vries : « Ce type de logiciel est connu sous le nom d'*exercices répétés* (*drill* en anglais). Le rôle joué par l'ordinateur est celui de stockage et de distribution de multiples exercices. La tâche proposée à l'élève est de *faire des exercices*. Selon Alessi et Trollip (1991), les exercices répétés ne sont appropriés qu'après avoir suivi un enseignement classique. L'objectif est que l'élève s'entraîne pour obtenir aisance et vitesse dans une matière. Le point de vue théorique sous-jacent est *béhavioriste*. Cette théorie postule une relation directe entre les conditions d'enseignement et le résultat de l'apprentissage (sans processus intermédiaires, Mayer, 1987). Les items (exercices) sont considérés comme des stimuli et les actions de l'élève comme des réponses. La récompense (renforcement) réside dans le fait d'avoir donné la bonne réponse, de pouvoir passer à l'item suivant, ou, dans certains cas, d'obtenir un événement auditif ou visuel de la part de l'ordinateur. Les premières « machines à

enseigner »¹ (des machines mécaniques au début) ont été développées par Crowder (1960), Pressey (1926) et Skinner (1958) cités par Burton, Moore, & Magliaro (1996). Burton et ses collègues donnent une excellente revue du béhaviorisme et l'enseignement programmé (voir aussi Bruillard, 1997 et Depover, 1987). Le point de vue béhavioriste pose que les connaissances doivent être définies en termes de performances et de comportements observables. Ainsi, le comportement désiré est connu d'avance ; ce qui est à acquérir par l'élève, ce sont les associations entre items et bonnes réponses. On peut dire que les connaissances sont exemplifiées en *associations à former* par l'élève. Aujourd'hui, il existe de multiples logiciels offrant des exercices répétés. »

Si De Vries montre bien les relations entre une théorie de l'apprentissage et un type d'application informatique, il faut aussi admettre que :

- les exercices existaient avant l'invention du béhaviorisme ;
- aucune théorie générale des apprentissages scolaires (à notre connaissance) ne fait l'impasse sur les exercices ;
- les exercices existent aussi dans les pratiques d'enseignants non-béhavioristes.

Ce dernier point vaut d'être détaillé, car il nous semble crucial. De nombreuses études conduites depuis les années 1970 sur les conceptions que les enseignants se font de leur profession attestent d'une opposition assez radicale, aussi bien chez les enseignants débutants que chez les plus expérimentés (voir les exemples récents de Boulton-Lewis et al., 2001 ; Castejón & Martínez, 2001). Selon une première conception, l'enseignant possède des connaissances qu'il doit transmettre par le biais de son discours aux élèves. L'enjeu pour l'enseignant est de bien maîtriser les contenus de sa discipline et la forme de ce discours. Selon la seconde, les enseignants ont des connaissances dans leur tête mais ne peuvent pas les transmettre directement. Il faut qu'ils mettent en place des situations où les élèves vont construire par eux-mêmes ces connaissances. Par exemple des situations de résolution de problème, de découverte, de confrontation, etc. Les élèves vont construire par eux-mêmes les connaissances à partir du moment où ils se posent des questions, font des hypothèses et agissent. Les auteurs distinguent parfois un troisième type de représentation des enseignants qui conçoivent leur métier comme centré sur l'aide à apporter aux élèves. Cette conception n'est pas exclusive des deux premières : elle peut se retrouver aisément chez certains enseignants qui partagent la première représentation, comme chez ceux qui partagent la seconde. Mais surtout : quelle que soit la conception que les enseignants ont de leur pratique, elle intègre les exercices.

Ainsi, il est difficile d'affirmer que les exercices ou les exercices ont comme sous-bassement théorique le béhaviorisme. Ou alors, il faut l'entendre comme suit : le béhaviorisme constitue sans doute la première théorie de l'apprentissage à avoir décrit les apprentissages (ou au moins une partie d'entre eux) réalisés par

¹ Notons que dès le début de l'enseignement programmé de réticences ont été exprimées à propos du remplacement -ou de la concurrence- de l'enseignant par la machine. Soulignons aussi la différence entre le programme de type linéaire (Skinner) où la réponse donnée par l'élève doit être toujours juste, et les programmes à choix multiples (Crowder) ouvrant la possibilité de l'erreur et introduisant une aide (sous forme d'une information complémentaire) spécifique selon la réponse choisie (note due à Jean-Pierre Carrier).

exercices. Plus généralement, nous pensons que si les théories de l'apprentissage ont des liens importants avec les environnements d'apprentissage informatisés, il est difficile d'établir une bijection entre ces théories et ces environnements (ce qui n'est évidemment pas le but de De Vries, qui réalisé un repérage général et exhaustif des catégories d'applications existantes, exclusives entre elles, en illustrant ce repérage par les conceptions, les tâches, les objectifs et les pratiques qui y sont le plus souvent associées).

A l'opposé des théories de l'apprentissage comme sources d'inspiration pour les environnements d'apprentissages informatisés, il est possible de situer les technologies comme sources d'inspiration. Par exemple, Nelson, l'inventeur de l'hypertexte, écrit :

« Laissons à l'étudiant le choix de son objet d'étude, laissons-le décider s'il souhaite se soumettre à une évaluation, donnons-lui une bonne variété de matériel intéressant, fournissons-lui un environnement stimulant. Dans ce cas, l'étudiant se trouvera motivé, intéressé à en faire un peu plus que dans le cadre d'enseignement traditionnel. L'étudiant placé assez tôt dans un tel environnement atteindra l'âge adulte avec un esprit vif, marqué par l'enthousiasme et l'intérêt. Toujours anxieux d'en apprendre davantage, il surpassera de beaucoup les gens ordinaires » (cité par Rhéaume, 1991).

Cette citation montre bien l'idéalisme éducatif inspiré par la technologie de l'hypertexte et les concepts relatifs à la structure des connaissances qui le sous-tendent. Il n'est pas besoin de la commenter d'avantage (voir Jacobs, 1992, pour une discussion sur la technologie des hypermédias et les théories pédagogiques). Notre approche centrée sur les tâches scolaires se veut étrangère à la fois à la perspective descendante (la théorie est appliquée dans la pratique) et à la perspective technologique – idéaliste (la technologie permet de résoudre tous les problèmes par une redéfinition radicale de l'activité humaine). Cette approche ne veut pas pour autant ignorer les travaux sur les processus d'apprentissage. Nous sommes proches de Elshout-Mohr et ses collègues (1999) dont la catégorisation aide à spécifier la situation d'apprentissage en fonction des buts d'apprentissage envisagés. Cette catégorisation est fondée sur la distinction entre :

- Les savoirs et les savoir-faire : les savoirs sont des connaissances déclaratives, verbalisables par les sujets, les savoir-faire sont des connaissances procédurales, mobilisables dans l'action.
- La cognition et la méta cognition : la méta cognition est la cognition sur la cognition, elle est surtout mise en œuvre à travers les activités de planification, de contrôle et de régulation.
- Les transferts importants des transferts directs : un transfert direct s'applique d'une situation d'apprentissage vers une situation analogue, très proche ; un transfert est important quand les deux situations sont très sensiblement différentes.
- La reproduction et la production : en situation de reproduction on demande à l'apprenant de « refaire », en respectant les traits de surface de la situation d'apprentissage ; en situation de production, on demande à l'apprenant de « faire » quelque chose, qui n'a pas forcément grand chose à voir avec la situation d'apprentissage.

Situation d'apprentissage	Objectif d'apprentissage
Apprendre « par cœur » : des faits, des savoirs encyclopédiques, par un traitement attentif.	Utilisation des savoirs acquis en situation de reproduction.
Construire des savoirs conceptuels par un traitement profond.	Utilisation des savoirs acquis en situation de production.
Construire des savoirs d'un plus haut niveau en alternant décontextualisation et recontextualisation.	Utilisation des savoirs acquis en situation de production, ou qui implique un transfert important
Développer des routines autonomes en s'exerçant	Utilisation des routines acquises en situation de reproduction.
Acquérir des savoir-faire cognitifs par une pratique systématique	Utilisation des savoir-faire acquis en situation de production.
Développer de l'expertise par le contact avec des experts	Utilisation des savoir-faire acquis en situation de production, ou qui implique un transfert important
Acquérir des savoirs méta cognitifs par la réflexion	Utilisation des savoirs méta cognitifs acquis en situation de production, ou qui implique un transfert important
Acquérir des savoir-faire d'auto-régulation par l'auto-évaluation	Utilisation des savoir-faire méta cognitifs acquis en situation de production, ou qui implique un transfert important

Tableau 2. Situations et objectifs d'apprentissage, (d'après Elshout-Mohr et al., 1999)

Notre approche a été proposée la première fois par Tricot, Pierre-Demarcy et El Boussarghini (1998, 2000). Selon eux, il est possible d'envisager que :

- il existe trois grands types de situations d'apprentissage décrites par différentes théories de l'apprentissage : apprentissages par l'action, par instruction et par la découverte;
- toute situation d'apprentissage mobilise entre autres et à des degrés divers les activités mentales de compréhension (élaborer une représentation mentale de la situation, du concept, en intégrant cette représentation à certaines de nos connaissances antérieures), de répétition (réutiliser une de nos connaissances anciennes, refaire ce que nous savons déjà faire), et d'exploration (élaborer des hypothèses, explorer un espace problème) ;
- la situation d'apprentissage par l'action correspond à une tâche scolaire bien connue (la résolution de problèmes) et mobilise de façon souvent équilibrée les trois activités mentales évoquées ;
- les autres situations d'apprentissage sont moins bien connues en psychologie cognitive mais correspondent à des tâches scolaires ;
- toute tâche scolaire peut être décrite en fonction des activités mentales qu'elle mobilise ;
- il est possible de définir des aides aux activités mentales qui aient une certaine pertinence dans les différentes situations ou pour les différentes tâches.

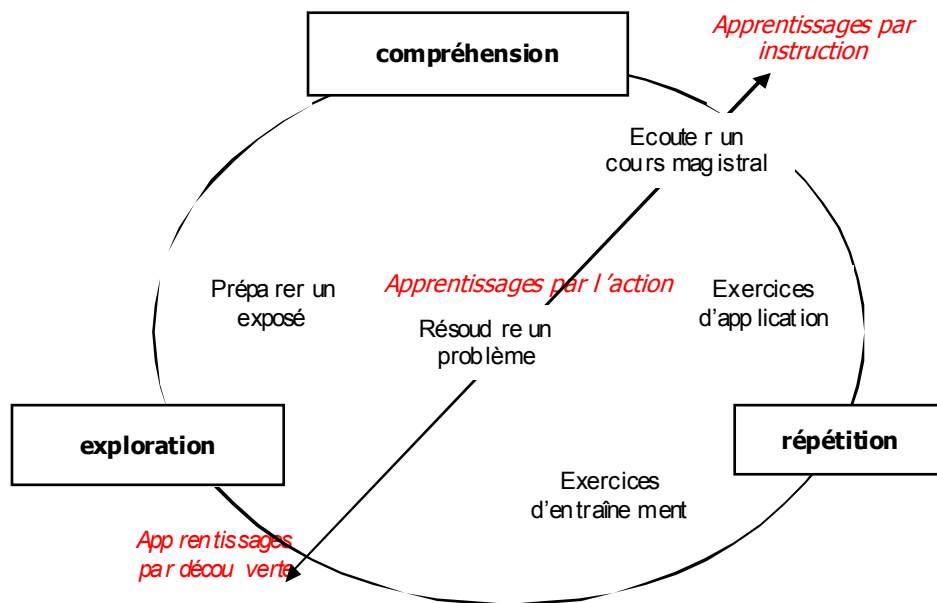


Figure 1. Relations entre activités mentales, situations d'apprentissages et quelques tâches scolaires

Dans ce rapport nous voudrions montrer qu'il est possible de favoriser l'apprentissage par exercices en favorisant la mise en œuvre d'au moins une des activités mentales impliquées par la situation : la compréhension. Plutôt que d'aider les enseignants à innover pédagogiquement, une technologie doit aider les élèves à réussir les tâches d'apprentissage qu'on leur propose.

Dans la partie suivante, nous allons envisager les liens entre les exercices et les apprentissages : qu'est-ce qu'un exercice ? qu'est-ce qu'il permet d'apprendre ? sous quelles conditions ?

Exercices et apprentissages

La littérature sur les apprentissages par résolution de problème est immense. Le cas particulier des exercices est plus difficile à cerner directement, car de nombreuses terminologies co-existent. Dans ce rapport, nous envisageons un exercice comme une tâche de résolution de problème particulière, impliquant de façon privilégiée les processus de procéduralisation et d'automatisation, tels qu'ils sont définis dans la théorie de l'apprentissage actuelle la plus précise et classique qui soit : ACT^R, la théorie d'Anderson (1983, 1990). Nous considérons qu'une situation d'apprentissage met en relation, au moins :

- une tâche : un but à atteindre dans un environnement donné, au moyen d'actions (physiques) ou d'opérations (mentales) ;
- un système cognitif : un ensemble de connaissances disponibles (pour nous : l'ensemble des connaissances d'un élève). Nous proposons de distinguer classiquement ces connaissances comme pouvant être sémantiques (déclaratives, procédurales) ou épisodiques, implicites ou explicites, automatisées ou non.

Qu'est-ce qu'un exercice ?

Un exercice est une des tâches réalisées dans les situations d'apprentissage par l'action. C'est une sous catégorie de la catégorie des tâches de résolution de problème. Un problème correspond à une tâche pour laquelle le sujet ne dispose pas de toutes les connaissances suffisantes pour atteindre le but : pour ce faire, il doit par exemple tâtonner, produire des hypothèses, établir une analogie avec un problème qu'il sait résoudre, interpréter le résultat de ses actions sur la situation problème, etc. Face à un problème un sujet doit raisonner, produire des inférences. Nous considérons ici un exercice comme une tâche de résolution de problème à réaliser par un sujet humain, telle que le sujet dispose des connaissances nécessaires (le plus souvent il vient de voir cela en cours) pour réaliser cette tâche, sans pour autant que ces connaissances soient automatisées ou même sous la forme la plus adéquate à la réalisation de la tâche.

Il est important de ne pas confondre exercice et exécution. Une exécution correspond à une tâche pour laquelle le sujet dispose des connaissances suffisantes, sous un format automatisé, pour atteindre le but... automatiquement, sans avoir à raisonner, à produire des inférences. Une exécution ne correspond pas à une situation d'apprentissage puisqu'il n'y a rien à apprendre : le sujet sait déjà faire.

Ainsi, un exercice tel que nous le définissons est une sous catégorie de problèmes, où le but est plus de transformer en savoir-faire automatisé ce que l'on sait déjà (sous forme déclarative ou sous forme procédurale mais contrôlée), plutôt que d'acquérir une connaissance réellement nouvelle.

A quoi peut servir un exercice ?

Un exercice sert essentiellement à transformer une connaissance d'une forme déclarative vers une forme procédurale. Ainsi, dans le contexte scolaire, un exercice d'application est une tâche que l'on propose après un cours où l'on a expliqué « de quoi il s'agit » (explication notionnelle) et/ou « comment faire » (explication procédurale).

Un exercice peut aussi concerner la transformation d'une connaissance procédurale peu automatisée en une connaissance automatisée : il s'agit alors d'un exercice d'entraînement. Notons enfin que certains exercices sont présentés avec leur solution (appelons-les exercices résolus) sans que cela ne change profondément, d'après nous, la nature de l'exercice.

Il nous semble important de souligner que les exercices ne peuvent pas permettre beaucoup d'autres apprentissages que ces « apprentissages par transformation » que constituent la procéduralisation et l'automatisation (les définitions de ces deux termes sont données plus bas). Il nous semble tout aussi important d'insister sur le fait que ces objectifs de procéduralisation et d'automatisation ne peuvent pas, dans la très grande majorité des cas, être atteints autrement que par exercice. Ainsi nous ne pensons pas que les exercices soient intéressants ou inintéressants d'un point de vue pédagogique, qu'il faille les développer ou les proscrire. Nous voudrions seulement qu'ils puissent être considérés comme des tâches scolaires utiles pour deux grandes catégories d'apprentissages (la procéduralisation et

l'automatisation) et sans doute seulement pour ces deux. La réalisation d'une série d'exercices peut entraîner l'acquisition de connaissances déclaratives ou l'amélioration de celles-ci (*i.e.* la facilitation de la reconnaissance et de la catégorisation des situations-problèmes), par apprentissage associatif implicite des liens entretenus entre les différents éléments constituant l'espace problème.

Quels sont les processus cognitifs en jeu dans la réalisation d'un exercice ?

La procéduralisation : c'est le processus de transformation d'une connaissance sous forme déclarative en une forme procédurale. Il peut s'agir donc d'une suite d'actions ou d'opérations que l'élève sait dire mais qu'il ne sait pas encore faire aisément : par l'exercice il va apprendre à mettre en œuvre cette suite d'actions ou d'opérations.

L'automatisation de la procédure : c'est le processus de transformation d'une connaissance non-automatisée en une forme automatisée. Il peut s'agir donc d'une suite d'actions ou d'opérations que l'élève sait faire, mais peu aisément (il se trompe, procède lentement) : par l'exercice il va apprendre à aller plus vite, sans se tromper.

La compréhension (de la tâche) : c'est le processus d'élaboration d'une représentation mentale de la tâche, c'est-à-dire d'une représentation du but, de l'environnement, voire des actions et des opérations à mettre en œuvre pour atteindre le but.

La récupération : c'est le processus de réactivation d'une connaissance disponible en mémoire.

Face à l'énoncé d'un exercice (un matériau composé de texte, d'image, de schéma, d'outils), l'élève tente de comprendre quel but il doit atteindre et comment il doit atteindre ce but. Il sait que ce qui va lui permettre d'atteindre le but est disponible dans sa mémoire (par exemple, il vient de le voir en cours) voire dans le matériau lui-même (par exemple, la solution est présentée, sous forme de but ou sous forme de procédure d'atteinte du but). A partir de l'une de ces sources interne (sa mémoire) ou externe (le matériau disponible, le cours qu'il peut relire) il va tenter d'appliquer pas à pas la procédure d'atteinte du but. C'est souvent la répétition du même type d'exercices qui va permettre de progressivement appliquer plus rapidement et plus sûrement la procédure, donc qui va permettre l'utilisation de cette connaissance de façon pertinente (quand il faut) et efficace (comment il faut).

Comment concevoir des exercices utiles ?

Des travaux ont été consacrés aux méthodes de conception des exercices, pour tenter de les rendre plus efficaces. Ce champ d'étude est particulièrement actif depuis quelques années, notamment depuis que le multimédia est à la mode. Les problèmes et les solutions de conception mis en évidence peuvent être décrits en fonction des principales caractéristiques d'une série d'exercices :

- l'apprenant a déjà été exposé au contenu à apprendre, au moins sous sa forme déclarative / conceptuelle ; il est censé maîtriser, au moins partiellement cette connaissance visée ;

- l'exercice est présenté, ainsi un espace de réponse, sur écran ou papier ;
- la réponse est évaluée, par l'apprenant lui-même (par confrontation avec la solution) ou par un tiers (son enseignant), avec éventuellement un retour, plus ou moins « intelligent » vers l'élève ;
- l'exercice est répété.

Le point (a) ne pose pas de problème particulier de conception. Il pose deux problèmes d'utilisation :

(a1) les notions de référence sont clairement identifiées dans le cadre de l'utilisation d'un exerciceur en classe « sous commande de l'enseignant » ; en dehors de ce cas (par exemple utilisation en autonomie, à la maison ou à l'école), il peut y avoir des problèmes avec l'identification par les apprenants de ces connaissances.

(a2) les notions de référence peuvent être intégrées dans l'exerciceur, l'utilisateur ayant alors généralement le choix entre la consultation a priori et la consultation en cours d'exercice (à titre d'aide). Or, choisir le moment opportun est un problème en soi. Il ajoute à la difficulté de la situation.

Le point (b) bénéficie du multimédia en ce sens que les présentations multimodales interactives peuvent faciliter la compréhension de l'énoncé. De très nombreuses études ont été consacrées aux caractéristiques de cette « facilitation ». Elles ont produit des résultats répliqués dans une dizaine des disciplines différentes avec des élèves d'âges différents. Elles ont mis à jour :

(b1) l'effet de l'exercice résolu : quand le premier exercice de la série est présenté avec sa procédure de résolution et sa solution, cela facilite la compréhension des énoncés suivants et l'apprentissage initial, au moins dans les domaines de contenus structurés et définis comme les sciences physiques, les mathématiques, la programmation (VanLehn, 1996).

(b2) l'effet d'intégration texte image : souvent, un texte illustré est mieux compris qu'un texte seul. De même, une image commentée est mieux comprise qu'une image seule (Gyselinck, 1996). Le multimédia facilite la compréhension, par intégration du texte dans l'image fixe (Moreno & Mayer, 1999 ; Mayer & Moreno, 1998) ou animée (Mayer & Anderson, 1992), mais aussi par intégration facultative du texte dans l'image (Bétrancourt & Caro, 1998).

(b3) l'effet de mixage audio-visuel : un texte entendu commentant la situation à comprendre facilite la compréhension, par rapport à un texte lu (Mousavi, Low & Sweller, 1995 ; Tindall-Ford, Chandler & Sweller, 1997) ;

(b4) l'effet de redondance : donner deux fois la même information dans un énoncé, par exemple sous forme imagée et sous forme linguistique, facilite la compréhension (Kalyuga, Chandler & Sweller, 2000) ;

(b5) l'ensemble de ces effets concerne les apprentissages initiaux, c'est-à-dire ceux qui suivent immédiatement une phase d'exposition à un domaine de contenus. La plupart de ces effets sont annulés voir renversés quand les

apprenants sont familiers du domaine de contenu. (Kalyuga, Chandler, Tuovinen & Sweller, sous presse).

(b6) l'effet d'auto-explication de la réponse : l'apprenant qui explicite sa réponse apprend mieux, il faut donc l'encourager à la faire (Chi, sous presse; Chi, Bassok, Lewis, Reimann, & Glaser, 1989).

Le point (c) est le plus critique. L'interprétation « intelligente » des réponses de l'apprenant pose de gros problèmes de conception (cela explique peut-être aujourd'hui l'intérêt pour les exercices résolus évoqués en b1). En effet, une réponse « intelligente » est une réponse qui tient compte de la nature de l'erreur produite par l'apprenant (elle implique donc une reconnaissance de l'erreur, une typologie des erreurs et un modèle du domaine de contenu) et de la nature du raisonnement (ou au moins de la démarche) qui l'a conduit à produire cette erreur (elle implique donc un modèle des connaissances de l'apprenant). Elaborer et faire communiquer ces deux modèles est un objectif très ambitieux, qui a occupé la recherche en environnements interactifs d'apprentissages avec ordinateur (EIAO) pendant une vingtaine d'années. En l'état, on peut dire que les réussites sont dans les laboratoires, qu'elles ont du mal à en sortir, qu'elles impliquent un travail énorme, pour des domaines de connaissances bien définis et circonscrits (pour une vue d'ensemble voir Anderson, Boyle, Corbett & Lewis, 1990 ; Bruillard, 1997 ; Py, 1998). Cette restriction de l'Intelligence Artificielle à gérer des processus d'interprétation ou de dialogue uniquement dans des domaines bien définis n'est d'ailleurs pas spécifique au domaine de l'enseignement. Nous sommes plutôt de ceux qui pensent aujourd'hui que l'interaction doit être dirigée par l'utilisateur à partir d'un nombre de choix limités imposés par un scénario statique (il n'y a pas d'interprétation, seulement des choix). Des méthodes de conception intermédiaires, comme celle de Nykänen et Ala-Rantala (1999) intègrent maintenant la tradition de rigueur de l'EIAO et des conceptions plus récentes en termes d'interaction et d'interface.

Le point (d): la répétition des exercices est un enjeu important pour la réussite de l'apprentissage. Quelques effets ont été mis à jours, dont la plupart ont été maintes fois répliqués avec des élèves différents dans des disciplines différentes :

(d1) une série alternant exercices avec et sans solution est plus efficace qu'une série d'exercices sans leur solution (Sweller & Cooper 1985 ; Sweller, Merriënboer & Paas 1998) et qu'une série d'exercices avec leur solution (Stark, Gruber, Renkl, & Mandl 2000) ;

(d2) une série commençant par des exercices avec leur solution puis intégrant des exercices avec solution partielle est plus efficace qu'une série d'exercices avec leur solution (Stark, 1999) ;

(d3) une série commençant par des exercices avec leur solution, intégrant progressivement des exercices avec solution partielle (de plus en plus partielle) pour finir par un exercice sans solution semble plus efficace que les autres séries (Renkl & Atkinson, 2001).

Expérimentation : évaluation d'une série d'exercices multimédia en TP d'électricité

Le projet réalisé dans le cadre de l'étude PNER consiste en une expérimentation dans le domaine de l'enseignement de l'électricité. Nous avons voulu évaluer l'effet de la structuration, du support et de la nature de l'information présentée dans une série d'exercices sur l'apprentissage réalisé par les étudiants.

Sujets

Les sujets sont étudiants en première année de DUT de génie mécanique et productique à l'IUT de Toulouse. La moitié de la promotion 2001-02 a participé à cette expérience, soit 150 étudiants, répartis en 11 groupes. L'autre moitié de la promotion participe à une seconde expérience, en cours.

Matériel

Les exercices concernent les circuits électriques en régime continu. Trois séries de 10 exercices sont proposées (correspondant à 1 séance de TP hebdomadaire pendant 3 semaines). La première série concerne le « calcul de résistances équivalentes », la seconde les « Loi d'Ohm, Loi de maille, Ponts diviseurs » et la troisième les « générateurs d'équivalents ». Les exercices sont présentés avec leur solution. Quatre versions différentes des séries sont comparées.

La version 0 est une version de référence : elle correspond au matériel utilisé originellement dans les TP depuis plusieurs années. Il s'agit d'un cahier de TP, comportant une dizaine de pages sur lesquelles 3 ou 4 exercices sont présentés sous la forme d'un schéma électrique et d'une question. La 1^{ère} page de ce document papier propose un rappel des représentations schématiques des différents constituants électriques : résistance, générateur de courant, condensateur, etc. L'ensemble des solutions est donné en dernière page.

Les versions 1 à 3 sont des versions modifiées de ce TP. Afin d'évaluer l'impact de la présentation multimédia des exercices, une version papier (version 1) de la présentation multimédia a été réalisée.

La version 1 est un cahier de TP papier correspondant à une impression de l'ensemble des diapositives PowerPoint de la version 2 (Figure 2). Il s'agit des mêmes schémas et des mêmes énoncés que pour la version 0 ; de même, les solutions sont données en dernière page. La différence majeure réside dans le rappel des lois donné en début de cahier (Loi d'Ohm, Loi de Maille, etc.).

$R_1 = 30 \Omega ; R_2 = 20 \Omega ; E = 20 \text{ V}$

Calculer U_1 et U_2 .

Outils Conventions Exercice 2 Sommaire Aide

Figure 2. Exemple d'exercice au format de la version 1 et de la version 2

La version 2 est un diaporama PowerPoint où un exercice par diapositive est donné. Ces exercices sont précédés d'un rappel des lois. Les solutions sont données au tableau.

La version 3 est identique à la 2 (Figure 3), mais on lui a appliqué un certain nombre d'aides à la compréhension telles que définies ci-dessus (aides essentiellement inspirées des travaux de Sweller et de Mayer). On donne une explication de l'énoncé (Figure 4). L'étudiant peut voir des animations pour représenter le courant sous forme de flèches qui s'affichent l'une après l'autre de l'entrée vers la sortie (Figure 5). Pour chaque exercice, une explication de la solution est intégrée sur le support de TD, à côté du schéma étudié (Figure 6), ainsi que la solution elle-même (Figure 7). Il existe enfin une rubrique « en savoir plus » (Figures 8 et 9).

Calculer la résistance équivalente entre les points A et B .

Figure 3. Exemple d'exercice au format de la version 3

R_{AB} = résistance vue par un courant qui : - entre en A
- sort en B

Figure 4. Exemple d'aide à la compréhension de l'énoncé

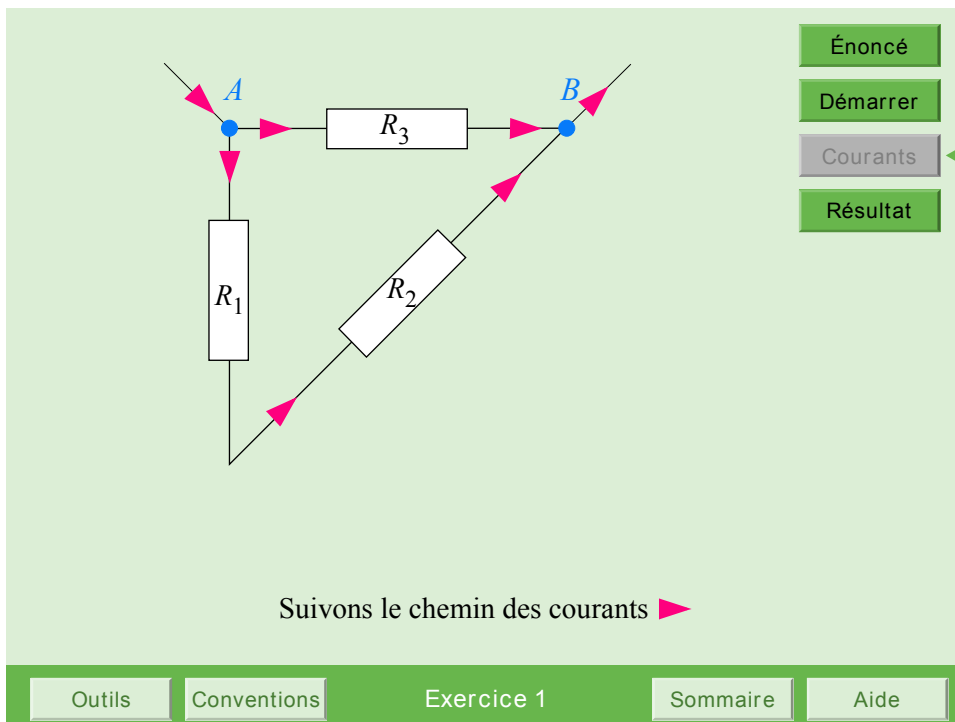


Figure 5. Exemple d'animation (ici présentée dans son état final : les flèches apparaissent l'une après l'autre de l'entrée vers la sortie)

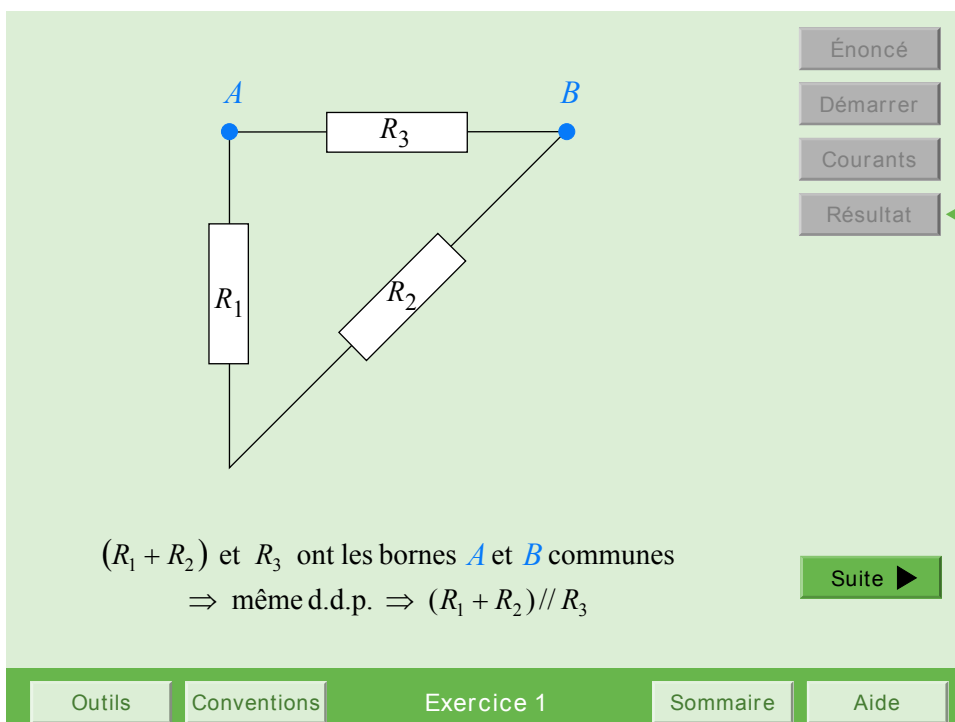


Figure 6. La solution et son explication

Énoncé
Démarrer
Courants
Résultat
En savoir +

$$R_{\text{eq}} = (R_1 + R_2) // R_3 = \frac{(R_1 + R_2) \times R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Outils Conventions Exercice 1 Sommaire Aide

Figure 7. Suite de la solution

Si nous utilisons le réseau branché entre *A* et *C*

Énoncé
Démarrer
Courants
Résultat
En savoir +

$$R_1 // (R_2 + R_3) = R_{AC} \neq R_{AB} = R_3 // (R_1 + R_2)$$

Une résistance équivalente se calcule entre 2 points donnés du réseau.

Suite ▶

Outils Conventions Exercice 1 Sommaire Aide

Figure 8. Rubrique « en savoir plus ».

Si nous utilisons le réseau branché entre B et C

$R_2 // (R_3 + R_1) = R_{BC} \neq R_{AB} = R_3 // (R_1 + R_2)$

Une résistance équivalente se calcule entre 2 points donnés du réseau.

Énoncé
 Démarrer
 Courants
 Résultat
 En savoir +

Outils Conventions Retourner au sommaire Sommaire Aide

Figure 9. Rubrique « en savoir plus » (suite).

Procédure

Pour chaque séance, le professeur commence par un apport notionnel en 15 minutes. Après cela, les étudiants réalisent un rapide test de connaissances (en 5 minutes) concernant le thème de la séance. Les tests proposés sont pour moitié des QCM sur la compréhension des notions (performance évaluée sur 5 points) et pour l'autre moitié des exercices d'application (performance évaluée sur 5 points). Ce test est analogue, en termes de difficulté, aux derniers exercices du TP. Ce test, administré juste après l'apport notionnel, c'est-à-dire avant la réalisation de la série de 10 exercices, est aussi administré, dans une version différente, après la série. Deux versions différentes du même test (version a et version b) sont donc réalisées. Pour la moitié des sujets, la version a est utilisée pour le pré-test et la version b pour le post-test. Pour l'autre moitié des sujets c'était l'inverse : b pour le pré-test et a pour le post-test. Le pré et le post-test sont constitués tous les deux du même nombre d'exercices et de questions à choix fermés.

Les étudiants travaillent systématiquement en binôme, quelle que soit la version du TP. Le temps consacré au TP lui-même (la réalisation de la série de 10 exercices) est d'environ 1h35. Les pré-tests et post-tests sont passés individuellement.

La répartition des groupes de TP par séance et par version du document se fait selon un croisement quasi complet : il y a une répartition équilibrée de chacune des quatre versions sur chacune des trois séances.

	Séance 1	Séance 2	Séance 3
Groupe 1	version 0	version 3	version 2
Groupe 2	version 0	version 1	version 3

Groupe 3, ...
etc.

Enfin, nous avons comptabilisé les interventions des enseignants pendant la séance de TP, en distinguant les aides individuelles des interventions adressées à l'ensemble du groupe. Parmi les aides, nous avons distingué celles concernant la résolution de l'exercice de celles concernant la correction d'une erreur ou l'explication d'une solution.

Résultats

	QCM de compréhension		Exercices d'application	
	Pré-test	Post-test	Pré-test	Post-test
Séance 1	3,61	4,55	2,47	4,19
Séance 2	4,48	4,69	2,62	3,35
Séance 3	3,40	4,28	2,00	3,89

Tableau 3. Performances moyennes au pré et post-test pour les QCM de compréhension et les exercices d'application en fonction de la séance de TP (séance 1 = calcul de résistances équivalentes ; 2 = Loi d'Ohm, Loi de maille, Ponts diviseurs ; 3 = générateurs d'équivalents.)

Globalement il y a une différence significative entre post et pré-tests ($F(1,300) = 42,048$; $p < 0,001$). Ainsi, nous pouvons considérer que dans chaque séance de TP les étudiants ont appris quelque chose, tant au niveau compréhension qu'application. Le cas de la séance 2 pour les QCM de compréhension présente manifestement un effet plafond : les notes sont trop bonnes aux pré-tests (4,48 sur 5 points possibles).

	QCM de compréhension		Exercices d'application	
	Pré-test	Post-test	Pré-test	Post-test
Version 0	3,42	4,45	2,30	4,11
Version 1	3,88	4,38	2,19	3,71
Version 2	3,90	4,55	2,52	3,60
Version 3	4,11	4,59	2,39	3,76

Tableau 4. Performances moyennes au pré et post-test pour les QCM de compréhension et les exercices d'application en fonction de la version du TP

Quelle que soit la version, les étudiants apprennent quelque chose. L'apprentissage est plus important avec les exercices d'application qu'avec les QCM de compréhension ($F(1, 300) = 155,5$; $p < 0,001$). On peut légitimement faire l'hypothèse que cela est dû à la nature des exercices proposés lors des séances de TP : des exercices d'application. Toutefois, pour affirmer cela il faudrait être en mesure d'obtenir des performances en pré-test de niveau équivalent. Or, les pré-tests sont mieux réussis, et sans doute même « trop bien réussis » quand ils concernent des questions de compréhension : il s'agit probablement d'un effet plafond encore une fois.

Globalement il n'y a pas d'effet version : pas de différence significative entre les performances dues aux versions. Cela est plutôt intéressant, car nous n'espérons pas une différence entre les versions papiers et les versions ordinateurs, pas plus qu'entre les deux versions papiers. Nous voulions montrer que la version 3 est plus efficace que les autres. Mais, même si les scores sont bons avec cette version, notamment aux QCM compréhension, le gain de performance lui-même ne présente pas de différence significative avec les autres versions. Cette absence d'effet s'explique peut-être par un effet *placebo* : de bonnes performances obtenues aux pré-tests dans cette version 3 et plus généralement avec les versions ordinateurs viennent « mécaniquement » amoindrir le gain de performance avec ces versions (Tableau 6).

	QCM de compréhension		Exercices d'application	
	Pré-test	Post-test	Pré-test	Post-test
Versions papier	3,65	4,42	2,25	3,91
Versions ordinateurur	3,89	4,47	2,36	3,66

Tableau 6. Performances moyennes au pré et post-test pour les QCM de compréhension et d'application selon que le TP est sur papier ou sur ordinateur

Enfin, nous avons observé des grandes différences, selon les versions, quant au nombre d'interventions des enseignants pendant la séance. Cette différence s'observe pour les aides individuelles concernant la résolution de l'exercice ainsi que celles concernant la correction d'une erreur ou l'explication d'une solution (Figure 10). Les interventions adressées au groupe entier sont en quantité négligeable. Ainsi, malgré des observations incomplètes, l'effet version est significatif sur l'aide à la résolution ($F(2,12)=17,7$; $p<0,001$) et sur les corrections ou les explications de la solution ($F(2,12)=11,4$; $p<0,003$). La version 3 entraîne très peu d'interventions : dans la plupart des groupes, les enseignants n'interviennent plus du tout. Un enseignant a fait 2 interventions de résolution d'un exercice et 2 de correction des erreurs ou explication de la solution. Cette version pourrait correspondre à une tâche réalisée de façon autonome, dans le cadre d'un enseignement à distance par exemple.

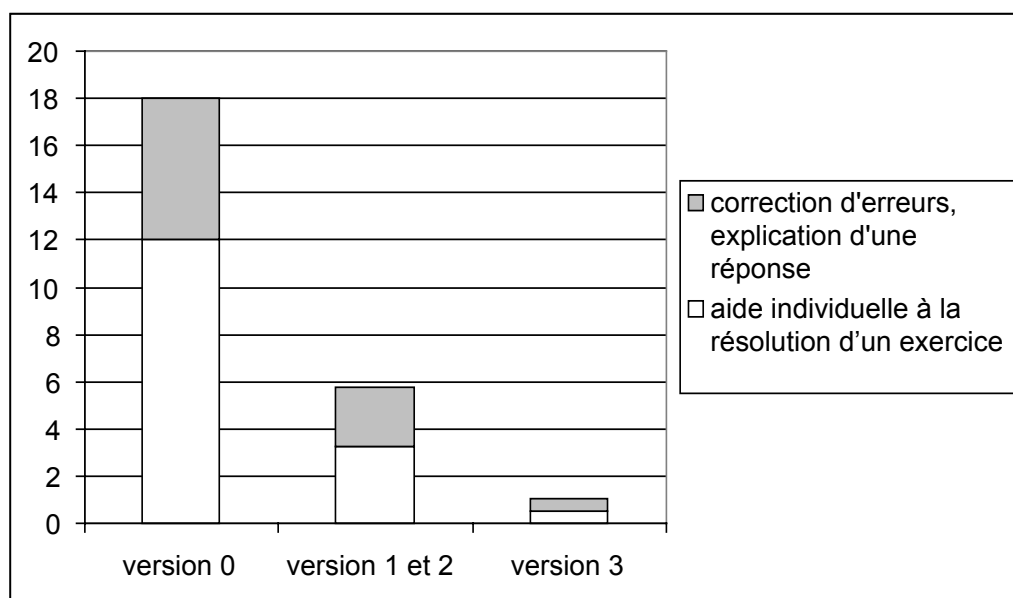


Figure 10. Nombre moyen d'interventions de l'enseignant selon la version

En résumé, la version 3, conçue pour aider les étudiants à mieux comprendre, ne présente pas de gain de performance plus important ou moins important que les autres versions, que ce soit en compréhension ou en exercice d'applications. L'aide à la compréhension semble avoir un effet autre : elle permet aux étudiants de travailler en autonomie. Cette version semble donc pouvoir être utilisée sans la présence d'un enseignant.

Discussion

Cette étude confirme qu'il est possible pour un étudiant d'acquérir ou de transformer des connaissances déclaratives et procédurales en réalisant une série d'exercices. Quand on présente les exercices en intégrant les solutions dans le support de présentation et quand on donne des explications de la solution, il semble que l'on puisse permettre la réalisation de la série d'exercices en autonomie, sans l'aide d'un enseignant. Notre étude montre donc l'utilité de l'application développée.

L'acceptabilité de l'application développée est évidente. Il suffit d'une classe équipée d'ordinateurs pour que l'application soit acceptable. Cependant, dans notre expérience, les classes étaient équipées d'un ordinateur pour deux étudiants, ce qui les a contraints à travailler en binôme. Il n'est pas sûr que le travail en binôme soit la meilleure forme de travail possible pour la réalisation d'une série d'exercices. La très importante littérature consacrée aux apprentissages coopératifs réalisés avec l'aide d'un ordinateur est plus centrée sur les situations de résolution de problèmes « difficiles », de négociation, d'argumentation, que sur les séries d'exercices. Il faut aussi souligner que la réalisation d'une série d'exercices selon l'approche présentée ici représente un coût important (proche de 20 KF par série), un travail de conception à proprement parler difficile à estimer (mais beaucoup plus onéreux que la réalisation) et une longue période de concertation préalable au sein de l'équipe des enseignants. Cette concertation s'est accompagnée d'interrogations assez intéressantes.

Notre étude présente des biais méthodologiques, en particulier :

- l'existence d'un effet plafond pour un des pré-tests (celui de la seconde séance de TP) ;
- la présentation des solutions au tableau (avec la version 2) qui rend difficilement comparable cette version aux autres.

En outre, notre étude n'aborde pas l'un des critères mentionnés par nous comme pertinent pour évaluer la qualité d'une application informatique pour l'apprentissage : l'utilisabilité. Nous ne savons pas quelle version est la plus utilisable. Quelles versions posent-elles des problèmes de prise en main ? Quelles versions présentent-elles des *bugs* ou génèrent-elles des erreurs d'utilisation ? Quelles versions sont-elles perçues comme satisfaisantes par les étudiants ?

Dans une seconde expérience, en cours, menée auprès de l'autre moitié de la promotion 2001-02 des étudiants de l'IUT génie mécanique productique de

Toulouse, nous analysons aussi l'utilisabilité des quatre versions et tentons d'éliminer les principaux biais relevés dans l'expérience présentée ici.

Conclusion

Dans cette étude, nous avons voulu illustrer l'intérêt de la conception centrée sur la tâche scolaire, dans le domaine des applications informatiques pour l'apprentissage. Cette approche ne soumet pas la conception à l'innovation pédagogique, à l'affiliation théorique ou à l'innovation technologique. Il s'agit simplement, étant donné une tâche scolaire (c'est-à-dire des connaissances à acquérir par certains élèves dans un certain contexte scolaire en réalisant un type d'activité précise), d'envisager en quoi les techniques disponibles facilitent la mise en œuvre de certains processus cognitifs impliqués par la tâche. Nous avons souligné que la littérature consacrée à cette approche de la conception est foisonnante (mais peu connue en France ?), et que des solutions de conception dans le domaine du multimédia éducatif peuvent être envisagées autrement que de façon intuitive.

Nous avons voulu montrer aussi que la qualité d'une application est liée à son utilité (les étudiants apprennent ce qu'ils doivent apprendre), à son acceptabilité et à son utilisabilité. Malheureusement, si les deux premiers critères ont été envisagés dans notre étude, le troisième ne l'a pas été.

En bref, nous avons montré que l'aide à la compréhension peut favoriser l'acquisition ou la transformation de connaissances en autonomie dans le cadre des exercices. Ceci représente sans doute une perspective pour l'enseignement à distance, où concevoir une application pourrait revenir à se demander quelle tâche scolaire peut être réalisée à distance, étant donnés les processus cognitifs qu'elle implique et l'aide possible à la mise en œuvre de ces processus (que cette aide utilise ou non les technologies de l'information).

Bibliographie

- Alessi, S. M. & Trollip, S. R. (1991). *Computer-based instruction: Methods and development* (2nd ed.). Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Anderson, J.R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge : Harvard University Press.
- Anderson, J.R. (1990). *The adaptative character of thought*. Hillsdale : Erlbaum.
- Anderson, J.R., Boyle, C.F., Corbett, A.T., & Lewis, M.W. (1990). Cognitive modeling and intelligent tutoring. *Artificial Intelligence*, 42, 7-49.
- Bétrancourt, M., & Caro, S. (1998). Intégrer des informations en escamots dans les textes techniques : quels effets sur les processus cognitifs ? In A. Tricot & J.-F. Rouet (Eds.), *Les hypermédiats, approches cognitives et ergonomiques*. Paris : Hermès.
- Boulton-Lewis G.M., Smith, D.J.H., McCrindle, A.R., Burnett, P.C., & Campbell, K.J. (2001). Secondary teachers' conceptions of teaching and learning. *Learning and Instruction*, 11 (1), 35-52.
- Bruillard, E. (1997). *Les machines à enseigner*. Paris : Hermès.

- Burton, J.K., Moore, D.M., & Magliaro, S.G. (1996). Behaviorism and instructional technology. In D.H. Jonassen (Ed.), *Handbook of research for educational communications and technology* (pp. 46-73). New York: Macmillan.
- Castejón, J.L., & Martínez, M.A. (2001). The personal construct of expert and novice teachers concerning the teacher function in the Spanish educational reform. *Learning and Instruction, 11* (2), 113-132.
- Chi, M.T.H. (in press). Self-explaining: The dual process of generating inferences and repairing mental models. In R. Glaser (Ed.), *Advances in Instructional Psychology*. Mahwah : Erlbaum.
- Chi, M.T.H., Bassok, M., Lewis, M.W., Reimann, P., & Glaser, R. (1989). Self-explanations: How students study and use examples in learning to solve problems. *Cognitive Science, 13*, 145-182.
- De Vries, E. (in press). Les logiciels d'apprentissage : panoplie ou éventail ? *Revue Française de Pédagogie*.
- Elshout-Mohr M., Van Hout-Wolters B., & Broekkamp H., (1999). Mapping situations in classroom and research : eight types of instructional-learning episodes. *Learning and Instruction, 9* (1), 57-76.
- Giardina, M., (Ed.), (1992). *Interactive multimedia learning environments*. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop at Laval University. Berlin : Springer Verlag.
- Gyselinck, V. (1996). Illustrations et modèles mentaux dans la compréhension de textes. *L'Année Psychologique, 96* (3), 195-216.
- Jacobs, G. (1992). Hypermedia and discovery-based learning: a historical perspective. *British Journal of Educational Psychology, 23* (2), 113-121.
- Jacobson, M.J. & Spiro, R.J. (1995). Hypertext learning environments, cognitive flexibility, and the transfer of complex knowledge: an empirical investigation. *Journal of Educational Computing Research, 12* (4), 301-333.
- Jonassen, D.H., & Mandl, H. (1990). *Designing hypermedia for learning*. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop at Rottenburg / Neckar. Heidelberg : Springer Verlag.
- Kalyuga, S., Chandler, P., & Sweller, J. (2000). Incorporating learner experience into the design of multimedia instruction. *Journal of Educational Psychology, 92*, 126-136
- Kalyuga, S., Chandler, P., Tuovinen, J., & Sweller, J. (in press). When problem solving is superior to studying worked examples. *Journal of Educational Psychology*.
- Mayer, R.E. (1987). *Educational psychology*. Santa Barbara: Harper Collins.
- Mayer, R.E. (1999). Research-based principles for the design of instructional messages. The case of multimedia explanations. *Document Design, 1*, 7-20.
- Mayer, R.E. (sous presse). *Multimedia learning*. Cambridge : Cambridge University Press
- Mayer, R.E., & Anderson, R.B. (1992). The instructive animation : Helping students build connections between words and pictures in multimedia learning. *Journal of Educational Psychology, 84*, 444-452.
- Mayer, R.E., & Moreno, R. (1998). A split attention effect in multimedia learning. Evidence for dual processing systems in working memory. *Journal of Educational Psychology, 90*, 312-320.
- Merrill, M.D. (1983). Component display theory. In C.M. Reigeluth (Ed.), *Instructional design theories and models* (pp. 279-333). Hillsdale : Erlbaum.

- Moreno, R., & Mayer, R.E. (1999). Cognitive principles of multimedia learning. *Journal of Educational Psychology, 91*, 358-368.
- Mousavi, S., Low, R. & Sweller, J. (1995). Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes. *Journal of Educational Psychology, 87*, 319-334.
- Nykänen O., & Ala-Rantala M. (1999). A design for hypermedia-based learning environment. *Education and Information Technologies, 3*, 277-290.
- Oliveira, A. (Ed.), (1992). *Hypermedia courseware : Structures of communication and Intelligent Help*. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop at Espinho. Berlin : Springer Verlag.
- Py, D. (1998). Quelques méthodes d'intelligence artificielle pour la modélisation de l'élève. *Sciences et Techniques Educatives, 5* (2), 123-140.
- Renkl, A., & Atkinson, R. (2001). The effect of gradually increasing problem-solving demands in cognitive skill acquisition. *EARLI 2001*, Fribourg, 28 Aout-1^{er} Sept.
- Rhéaume, J. (1991). Hypermédias et stratégies pédagogiques. . In B. de La Passardière & G.-L. Baron (Eds.), *Hypermédias et Apprentissages*. (pp. 45-589). Paris : INRP / MASI.
- Spiro, R.J. & Jehng, J.C. (1990). Cognitive flexibility and hypertext: Theory and technology for the non-linear and multidimensional traversal of complex subject matter. In D. Dix & R.J. Spiro (Eds.), *Cognition, Education and Multimedia: Exploring Ideas in High Technology* (pp. 163–205). Hillsdale: Erlbaum.
- Stark, R. (1999). Lernen mit Lösungsbeispielen. Einfluß unvollständiger Lösungsbeispiele auf Beispielelaboration, Motivation und Lernerfolg. Bern : Huber
- Stark, R., Gruber, H., Renkl, A., & Mandl, H. (2000). Instruktionale Effekte einer kombinierten Lernmethode: Zahlt sich die Kombination von Lösungsbeispielen und Problemlöseaufgaben aus? *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie, 14*, 206-218.
- Swan, K. (1994). History, hypermedia, and criss-crossed conceptual landscapes. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia, 3* (2), 120–139.
- Sweller, J., & Cooper, G. A. (1985). The use of worked examples as a substitute for problem solving in learning algebra. *Cognition and Instruction, 2*, 59-89.
- Sweller, J., Merriënboer, J. J. G. van, & Paas, F. G. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review, 10*, 251-296.
- Tindall-Ford, S., Chandler, P. & Sweller, J. (1997). When two sensory modes are better than one. *Journal of Experimental Psychology: Applied, 3*, 257-287.
- Tricot, A., Pierre-Demarcy, C., & El Boussarghini, R. (1998). Définitions d'aides en fonction des types d'apprentissages dans des environnements hypermédia. In J.-F. Rouet & B. de La Passardière (Eds.), *Hypermédias et Apprentissages 4* (pp. 41-58). Paris : INRP / EPI.
- Tricot, A., Pierre-Demarcy, C., & El Boussarghini, R. (2000). Specific help devices for educational hypermedia. *Journal of Computer Assisted Learning, 16*, 102-113.
- VanLehn, K. (1996). Cognitive skill acquisition. *Annual Review of Psychology, 47*, 513-539.
- Wenger, E. (1987). *Artificial Intelligence and Tutoring Systems*. Los Altos : Morgan Kaufmann Publishers.