



ELSEVIER
MASSON

Disponible en ligne sur www.sciencedirect.com

 ScienceDirect

Psychologie française 53 (2008) 239–257

Psychologie
française

<http://france.elsevier.com/direct/PSFR/>

Article original

Contrôle d'animations multimédias par des enfants de dix à 11 ans : quel effet des dispositifs de contrôle ?

Control of multimedia animations by children

J.-M. Boucheix

LEAD-CNRS UMR 5022, université de Bourgogne, pôle AAFE, esplanade Erasme, 21035 Dijon, France

Reçu le 12 mars 2007 ; accepté le 12 octobre 2007

Résumé

Cette recherche étudie l'effet du contrôle interactif d'animations techniques multimédias sur la compréhension. D'abord, le concept de contrôlabilité des animations est défini ainsi que les raisons des résultats contradictoires qui ont été observés concernant l'interactivité dans l'apprentissage de documents multimédias. Ensuite, une expérience est rapportée dans laquelle des enfants étudient le fonctionnement de systèmes techniques d'engrenage à partir d'animations multimédias offrant à l'utilisateur plusieurs niveaux de contrôle. Enfin, les résultats sont discutés en liaison avec les contraintes cognitives qui peuvent influencer sur l'efficacité des animations interactives chez des enfants.

© 2007 Société française de psychologie. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

The present study aims at exploring the effect of user control on learning from technical animations. First, the concept of user controllability is defined and possible reasons for the divergent findings concerning its effectiveness in supporting learning are considered. Second, an empirical study is reported, in which young learners studied the operation of gear systems from animated instruction involving different levels of user control. Finally, results of the study are discussed and related to processing constraints that may influence the educational effectiveness of user controllable animations.

© 2007 Société française de psychologie. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Contrôle ; Animations ; Signaux ; Habiletés spatiales ; Connaissances préalables

Keywords: Control; Animations; Signalling; Spatial abilities; Prior knowledge

Adresse e-mail : Jean-Michel.Boucheix@u-bourgogne.fr.

0033-2984/\$ – see front matter © 2007 Société française de psychologie. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.
doi:10.1016/j.psfr.2007.10.001

Les animations interactives deviennent de plus en plus largement accessibles dans les documents électroniques pour l'éducation. Cependant leur efficacité réelle pour l'apprentissage et la compréhension reste très hypothétique. Ce problème revêt une importance cruciale chez les enfants qui utilisent fréquemment des animations interactives, y compris dans le cadre des apprentissages scolaires. Il apparaît donc nécessaire de réaliser des recherches expérimentales visant à étudier l'efficacité réelle des animations interactives, dont les résultats devraient fournir aux concepteurs une aide à la décision d'inclure ou non des animations dans les documents électroniques et de choisir le niveau d'interactivité le plus approprié. La présente recherche a pour but de contribuer à cet objectif.

Les recherches récentes ont bousculé l'idée selon laquelle les animations posséderaient intrinsèquement une supériorité sur les images statiques pour la compréhension de documents multimédias décrivant des phénomènes ou des processus dynamiques (Bétrancourt et Tversky, 2000 ; Bétrancourt, 2005 ; Hegarty et al., 2002 ; Lowe, 2005 ; Schnotz, 2005). Par exemple, Mayer et al. (2005) ont comparé des présentations de type texte et illustrations statiques sous format papier à des présentations multimédias de type narration (orales) animées sur ordinateur. Aucun avantage pour les animations n'est apparu dans la compréhension de courtes leçons portant sur quatre types de contenus : la formation des éclairs, le fonctionnement de la chasse d'eau, la formation de vagues de l'océan, le fonctionnement des freins d'une voiture.

Plusieurs arguments ont été avancés pour expliquer de tels résultats (Bétrancourt, 2005 ; Lowe, 2004 ; Schnotz et Lowe, 2003 ; Lowe et Schnotz, 2005 ; Tversky et al., 2002). Ils concordent tous avec l'idée que les contraintes cognitives liées au traitement d'informations dynamiques, en vue de comprendre des processus ou de réaliser des tâches, dépassent les capacités (mémoire de travail) des apprenants. Ces problèmes sont particulièrement marqués quand l'animation possède un haut degré de réalisme (Lowe et Schnotz, 2005). En effet, le réalisme fréquemment recherché au plan pédagogique, est souvent corrélé avec l'existence d'un flux rapide d'informations successives, avec l'animation simultanée de plusieurs éléments du système représenté.

Quatre types de difficultés de traitement des informations dynamiques ont été recensés chez l'adulte (Bétrancourt, 2005) :

- des difficultés perceptives tenant aux spécificités temporelles du déroulement des animations (Lowe, 1999, 2004) ;
- des difficultés de partage de l'attention entre différentes sources de mouvements simultanés (Schnotz, 2005 ; Mayer, 2005), « quand regarder, où regarder et quoi regarder » (Lowe, 2003 ; 2004) ;
- des difficultés conceptuelles qui concernent le niveau d'abstraction du processus décrit en relation avec le niveau des connaissances préalables de l'apprenant (Lowe, 2004 ; Tassini et Bétrancourt, 2003) ;
- des difficultés cognitives, en particulier pour les apprenants disposant de faibles aptitudes visuospatiales concernant par exemple, les processus de simulation mentale de changements spatiotemporels (Hegarty et Waller, 2005).

Un exemple typique des manifestations des limites des capacités perceptives et de traitement cognitif des individus dans l'appréhension d'informations dynamiques concerne la difficulté des peintres avant l'avènement de la photographie, à reproduire fidèlement le galop de chevaux en raison de la rapidité des transformations visuelles continues.

1. Le contrôle des animations par l'utilisateur

L'idée de donner au sujet la possibilité de contrôler le déroulement de l'animation afin de la rendre plus « appréhendable » (Tversky et al., 2002) a reçu une attention croissante dans les recherches récentes menées chez l'adulte (Schneider et Boucheix, 2006 ; Garg et al., 2001 ; Mayer et Chandler, 2001 ; Schwan et Riempp, 2004). Dans ces recherches, les participants pouvaient contrôler trois traits principaux des animations : la vitesse, la direction et la continuité (Lowe, 2003). Le contrôle s'effectuait à l'aide de boutons (pause, lecture avant et arrière, stop, ralenti avant et arrière, accéléré avant et arrière) ou de barres de défilement situés sous l'image animée. On peut attendre d'un tel contrôle plusieurs bénéfices. Le contrôle de la vitesse du processus pourrait diminuer les difficultés perceptives et, dans une certaine mesure, les difficultés de partage de l'attention. Cette propriété pourrait avoir une influence particulière quand des éléments du processus décrits se meuvent simultanément ou bien lorsque deux chaînes causales sont impliquées (comme dans le système de chasse d'eau étudié par Narayanan et Hegarty, 2002). Le contrôle de la direction et de la continuité pourrait avoir un effet favorable sur le niveau d'intégration conceptuelle et la construction du modèle mental du système décrit. L'apprenant bénéficierait ainsi de l'opportunité d'interrompre l'animation à des étapes cruciales du processus pour s'arrêter et consulter des images particulières, ou bien pour comparer des phases différentes, ou encore pour vérifier les transitions entre les états clés du processus dynamique. Ce contrôle donnerait ainsi à l'apprenant un rôle dans le découpage temporel et spatial des principales étapes du contenu présenté. Dans cette perspective, le contrôle des animations devrait s'avérer bénéfique parce que cette fonction permettrait à l'apprenant d'adapter les caractéristiques de la présentation des informations animées, à la fois à ses propres compétences cognitives et aux contraintes spécifiques que la tâche impose.

Quelques travaux récents ont ainsi mis en évidence un effet bénéfique du contrôle dans des activités de compréhension multimédia. Par exemple, Chandler and Mayer (2001) ont montré que le contrôle du rythme de séquences animées d'une leçon sur la formation des éclairs améliorerait la compréhension comparativement à une présentation fixe. Le même type de résultat a été trouvé par Boucheix et Guignard (2005) chez des enfants à propos de l'apprentissage de systèmes techniques. Le contrôle total sur le déroulement de l'animation elle-même semble également améliorer l'apprentissage. Schwan et Riempp (2004) ont montré que l'acquisition de procédures de réalisation de nœuds marins était améliorée par l'utilisation de vidéos interactives comparativement à des vidéos non interactives. Garg et al. (1999) ont mis en évidence un bénéfice d'images 3D dont la rotation était contrôlable dans l'apprentissage de l'anatomie en médecine. De plus, le contrôle semblait favorable aux étudiants disposant de faibles aptitudes spatiales (Garg et al., 2001).

Cependant, le contrôle total sur le déroulement de l'animation est loin de toujours fournir une aide à l'apprentissage ou à la compréhension. Quand il s'agit de tâches complexes, aux contenus abstraits, l'apprenant novice, ne disposant pas des connaissances préalables suffisantes pourrait ne pas savoir utiliser à bon escient ou efficacement les propriétés d'interactivité avec l'animation. Par exemple, Lowe (2003, 2004) a montré que le traitement de cartes météorologiques contrôlables par des techniciens météorologistes novices était largement inefficace : ils avaient tendance à se focaliser sur les traits perceptivement saillants des cartes au détriment des aspects thématiquement pertinents. Boucheix et al. (2006) ont pu généraliser ces faits à des systèmes mécaniques en utilisant l'analyse du mouvement oculaire. Des effets négatifs du contrôle de l'animation ont même été mis en évidence dans le cadre de la compréhension de systèmes mécaniques complexes (système de la chasse d'eau, Kriz et Hegarty, 2004 ; Kriz et Hegarty, 2007) ou de mécanismes

biologiques (fonctionnement de la synapse, Bétrancourt et Réalini, 2005 ; Tassini et Bétrancourt, 2003).

Plusieurs facteurs peuvent être avancés pour expliquer ces résultats contradictoires. D'abord, pouvoir utiliser efficacement un système de contrôle implique pour l'apprenant de disposer d'une connaissance précise de ses besoins informationnels en liaison avec les contraintes de la tâche. L'évaluation de tels besoins pourrait être plus facile dans le cas d'apprentissages d'actions concrètes (dont le but est directement visible) que dans le cas d'apprentissages reposant sur l'interprétation d'images nécessitant l'utilisation de concepts abstraits (en météorologie, par exemple).

Par ailleurs, la majorité des études réalisées a été limitée à la comparaison entre deux modalités de contrôle : soit aucun contrôle n'était possible une fois l'animation déclenchée, soit le contrôle était total. On pourrait penser qu'un partage plus pertinent entre le sujet et le système de ce qui peut être contrôlable et de ce qui doit rester fixe pourrait augmenter l'efficacité du contrôle. Ainsi, hormis Tassini et Bétrancourt (2003), aucune étude n'a réellement manipulé le degré de contrôle sur l'animation.

Enfin, l'interactivité avec l'animation est généralement assurée via un dispositif de contrôle indirect, de type boutons ou barre munie d'un curseur, situé sous l'animation à une distance plus ou moins importante de celle-ci. L'utilisation et la maîtrise du système de contrôle indirect impliquent un partage stratégique de l'attention, qui privilégie le choix d'actions épistémiques au choix d'actions pragmatiques (Kirsh et Maglio, 1994) entre le défilement de l'animation et la gestion du système de contrôle. Cette double tâche pourrait être à l'origine de l'absence d'effet du contrôle. On pourrait faire l'hypothèse qu'un contrôle direct sur l'animation elle-même, via la souris de l'ordinateur, diminuerait les effets de partage d'attention en fournissant à l'apprenant une interaction plus immédiate, plus analogue et plus intuitive par rapport à l'information dynamique délivrée. L'objectif de l'étude expérimentale présentée dans la suite de cet article est précisément d'étudier de tels facteurs, l'effet du degré de contrôle et le rôle du contrôle direct. Cependant, chez l'enfant, tout système de contrôle, même direct et intuitif pourrait constituer une tâche ajoutée concurrente avec la tâche de compréhension au cours de l'apprentissage. Dans ce cas, l'adjonction à l'animation de propriétés interactives pourrait s'avérer préjudiciable à la compréhension.

2. Les techniques de signalisation

La possibilité de contrôler l'animation ne permet pas pour autant à l'utilisateur de savoir où regarder, quoi regarder, quand et comment. Pour pallier ce problème, l'addition prudente et parcimonieuse à l'animation d'indices, de signaux, verbaux et/ou non verbaux, de type flèches directionnelles, points de repère colorés, signes par exemple, pourrait s'avérer efficace. Ces indices pourraient attirer l'attention de l'apprenant sur les étapes clés du processus. Ils pourraient compenser les effets négatifs de la saillance perceptuelle d'éléments non pertinents en orientant l'allocation des ressources attentionnelles et cognitives vers les aspects pertinents de l'animation. Ces indices pourraient aussi aider l'apprenant à réaliser des connections entre l'animation et le texte (oral ou écrit) qui l'accompagne. Quelques travaux ont montré un effet bénéfique de tels indices sur la compréhension de documents ou de graphiques techniques (Boucheix et Guignard, 2005 ; Hegarty et Steinhoff, 1997 ; Mautone et Mayer, 2001 ; Shah et al., 1999). Toutefois, les indices choisis, ainsi que leur organisation, doivent entretenir une congruence physique et conceptuelle élevée avec l'animation et apporter des informations complémentaires. En effet, des recherches récentes ont montré que le simple ajout de flèches directionnelles à des graphiques statiques (Kriz et Hegarty, 2007) ou à des animations (Schneider et Boucheix, 2007) n'améliorait

pas la compréhension de systèmes techniques complexes. Enfin, les habiletés visuospatiales ainsi que les capacités de focalisation de l'attention des enfants sont probablement soumises à des contraintes de développement dont les éventuels effets sur le traitement des animations sont méconnus.

3. Objectifs de l'étude

Notre recherche a pour but d'étudier l'effet de différents niveaux de contrôle d'une animation sur l'apprentissage du fonctionnement de systèmes d'engrenages chez des enfants de dix à 11 ans. Le rôle du contrôle direct et celui du degré de contrôle sur le déroulement de l'animation sont examinés en utilisant une condition non contrôlable et deux conditions contrôlables. L'une de ces deux dernières permet à l'apprenant une interaction directe avec les roues des engrenages, l'autre met en œuvre un contrôle plus indirect. À ces trois modalités de contrôle sont intégrés ou non des indices complémentaires permettant d'orienter l'attention du sujet vers les mécanismes clés du fonctionnement des systèmes d'engrenage : flèches directionnelles, points de couleurs, courtes consignes. Deux raisons ont orienté notre choix vers des systèmes mécaniques : d'une part, la notion d'engrenage implique la construction interne de processus dynamiques, d'autre part, l'acquisition de ces notions fait partie des programmes de l'école primaire. Nous attendons un effet bénéfique du contrôle sur l'animation et en particulier, du contrôle direct. Néanmoins, pour des enfants, ainsi que pour des apprenants disposant de faibles aptitudes spatiales ou de connaissances préalables très peu élevées, l'utilisation d'un système de contrôle pourrait devenir préjudiciable à la compréhension des notions sous-jacentes à l'animation. Dans ce cas, la présence d'indicateurs orientant l'attention des participants pourrait augmenter les bénéfices potentiels du contrôle.

4. Méthode

4.1. Participants

Un total de 129 élèves d'école primaire (69 CM1 et 60 CM2) a participé à l'expérience. La moyenne d'âge était de 10,8 ans (CM = 10,1 ans, CM2 = 11 ans), la population était composée de 59 filles (30 en CM1 et 29 en CM2) et de 71 garçons (40 en CM1 et 30 en CM2). Un accord préalable des parents pour autoriser leur enfant à participer à la recherche a été obtenu, en complément de l'accord des enseignants.

4.2. Matériel

Le matériel était composé d'une leçon multimédia portant sur les principes de fonctionnement de systèmes d'engrenages et de poulies. Elle comprenait 24 diapositives. Le contrôle portait à la fois sur le rythme des diapositives et sur le déroulement des animations au sein de chaque diapositive. La leçon a été créée avec le logiciel Director 8.5 et présentée sur un ordinateur possédant un écran de 17 pouces. Une sélection représentative des diapositives concernant les différentes modalités étudiées est consignée en Fig. 1. Chaque diapositive montrait une image d'un ou deux systèmes d'engrenage (incluant un moteur) pouvant être animés. Chaque diapositive était accompagnée d'une phrase de texte explicatif (un court écrit a ici été préféré au commentaire oral afin d'éviter les disparités de synchronisation entre le commentaire et l'image dans les différentes conditions de contrôle). Quatre notions étaient abordées au cours de la leçon : la composition des



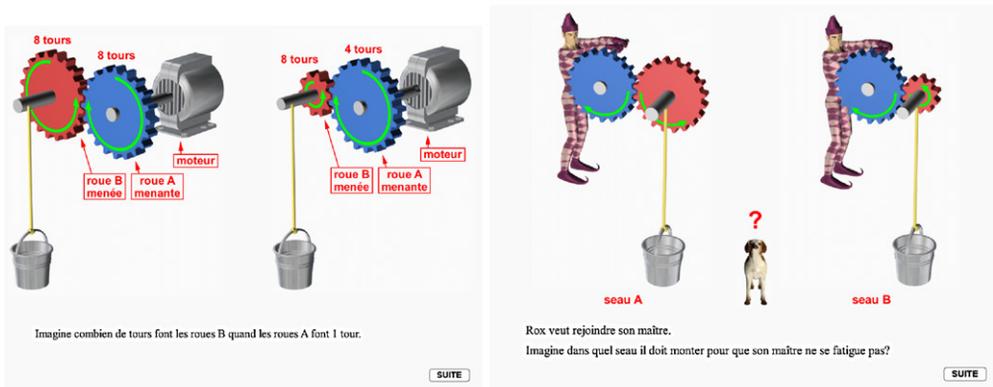
1- Engrenage simple, sans contrôle ou contrôle direct, avec signaux

2- Engrenage simple, condition, contrôle indirect, sans signaux



3- Engrenage complexe, sans contrôle ou contrôle direct, avec signaux

4- Engrenage complexe, sans contrôle ou contrôle direct, avec signaux



5- Deux engrenages, sans contrôle ou contrôle direct, avec signaux

6- Deux engrenages, sans contrôle ou contrôle direct, avec signaux.

Fig. 1. Sélection d'illustrations tirées de la leçon animée.

engrenages ; le sens de rotation ; la relation entre la vitesse de rotation et le diamètre des roues (nombre de dents) ; l'effet mécanique, c'est-à-dire la force appliquée au système d'engrenage pour soulever des charges. Pour la troisième partie de la leçon, les diapositives comprenaient deux systèmes d'engrenages chacun pouvant lever des seaux remplis d'eau. Ces systèmes d'engrenage

étaient composés de deux roues dentées de tailles différentes dont les positions respectives avaient été inversées (Fig. 1). Les diapositives concernant la force mécanique représentaient des lutins essayant de monter des charges telles que des seaux remplis d'eau avec différents systèmes de poulies (Fig. 1).

4.3. Procédure

Les deux facteurs manipulés sont le niveau de contrôlabilité des animations (trois modalités) et la présence d'indices d'orientation de l'attention (deux modalités), soit un plan inter sujets de type $3 \times 2 = 6$ groupes.

L'expérience se déroulait en quatre phases. Au cours de la première, les connaissances préalables des participants ainsi que leur niveau d'habileté spatiale étaient évalués au moyen d'épreuves papier-crayon. Les enfants étaient alors répartis de façon homogène dans les différents groupes expérimentaux en fonction de leurs performances aux prétests. Puis, au cours de la seconde phase, les participants réalisaient la tâche d'apprentissage en étudiant la leçon individuellement sur ordinateur. La troisième phase comprenait une épreuve de compréhension qui suivait immédiatement la consultation de la leçon. Les participants étaient enfin soumis à un post-test ayant pour but d'évaluer la « stabilité » des apprentissages, une semaine plus tard.

4.3.1. Phase 1 : prétests

Les connaissances préalables des participants étaient mesurées à l'aide d'un questionnaire à choix multiples accompagné de tâches de résolution de problèmes (15 items). Les thèmes du prétest portaient sur la composition des engrenages et leurs principes de fonctionnement. Les contextes des questions ainsi que les types de problèmes à résoudre étaient plus variés que les situations plus prototypiques abordées dans la leçon. Les questions pouvaient porter sur le nom de parties des engrenages (par exemple : « sur cette image, indique où se trouvent les roues ») comme inclure des tâches de décision portant sur la force mécanique (par exemple : « dans quelle situation A ou B sera-t-il plus dur pour le cycliste d'atteindre le sommet de la côte ? »). Chaque bonne réponse à une question était créditée d'un point pour un score total possible de 40 points. Les scores étaient ensuite convertis en proportions. Sur la base des scores obtenus par chaque enfant au prétest, les participants ont été répartis en trois groupes de niveau de connaissances préalables : niveau faible (C1, $N = 45$, $m = 24,8$), médian (C2, $N = 46$, $m = 42,64$) et élevé (C3, $N = 38$, $m = 63,10$). Les participants de chaque sous-groupe étaient distribués de façon égale dans les six conditions expérimentales (entre 12 et 16 sujets par condition). Une Anova et des tests systématiques de Neuman Keuls ont permis de vérifier l'absence de toute différence au prétest entre les groupes expérimentaux.

Les habiletés spatiales des participants étaient également évaluées. Cette mesure permettait d'examiner l'influence éventuelle des habiletés spatiales sur l'efficacité de l'utilisation d'un système de contrôle des animations. Les épreuves étaient constituées de 40 items organisés en quatre subtests. Il s'agissait d'une tâche de rotation mentale adaptée d'une épreuve de mémoire de travail spatiale élaborée par Shah et Myake (1996). Les sujets devaient reconnaître des lettres ou des objets après qu'ils aient subi une rotation spatiale (Boucheix et Guignard, 2005). Les scores obtenus ont été transformés en proportion de bonne réponse et, sur la base de la médiane, deux groupes de sujets ont été distingués : les participants disposant d'habiletés spatiales respectivement faibles ($N = 63$) et élevées ($N = 66$). Les sujets de chaque groupe ont ensuite été également répartis dans les conditions expérimentales (entre 18 et 23 sujets par groupe). Enfin, les participants étaient confrontés à une courte épreuve de lecture avec le test de Lefavrais (1967) qui

évalue les performances de lecture à voix haute (exactitude et temps). L'objectif de cette épreuve concernait l'évaluation de la performance pour l'activité de décodage de l'écrit plutôt que la compréhension de manière générale. Des Anovas et des tests systématiques de Neuman–Keuls réalisés pour chaque épreuve (spatiale et lecture) ont confirmé l'absence de différence entre les conditions expérimentales. Les connaissances préalables étaient corrélées avec les aptitudes spatiales ($r = 0,34$; $p < 0,01$).

4.3.2. Phase 2 : la tâche

La tâche de l'apprenant consistait à comprendre la leçon sur le fonctionnement des engrenages. Les participants étaient informés à plusieurs reprises de l'objectif de la tâche et qu'ils auraient à répondre à des questions portant sur les connaissances acquises durant la phase d'apprentissage. La leçon était étudiée une fois entièrement. Le temps de consultation (total et par diapositive) ainsi que le nombre d'interactions (clics) pour chaque participant étaient automatiquement enregistrés.

Dans la version non contrôlable, lorsque le sujet cliquait sur le système d'engrenage de chaque diapositive, l'animation démarrait et ne pouvait plus être arrêtée avant la fin du processus. Le sujet pouvait en revanche, faire repartir l'animation autant de fois qu'il le souhaitait. Dans la version directement contrôlable, le participant pouvait utiliser le curseur de la souris pour faire bouger directement les roues de l'engrenage : tourner, en avant, en arrière, à la vitesse choisie. Dans la version indirectement contrôlable, les enfants pouvaient ajuster la vitesse de rotation des roues de l'engrenage en manipulant, avec la souris, une barre de contrôle horizontale située au-dessous du système (voir Fig. 1). L'apprenant pouvait aussi utiliser cette barre de contrôle pour stopper l'animation, revenir en arrière, aller en avant, faire une pause. Quarante-quatre enfants étaient assignés à la condition de contrôle indirect, 40 à la condition de contrôle direct, 45 à la condition sans contrôle.

Dans la version qui comportait des indices pour orienter l'attention de l'apprenant (avec signaux), trois types de signaux étaient délivrés. Le premier, apposé sur la roue d'engrenage, représentait une flèche directionnelle montrant le sens de rotation des roues (Fig. 1). Le second type d'indice consistait en un compte-tours apposé près de l'engrenage qui indiquait de façon simultanée et dynamique le nombre de tours de chaque roue. Le troisième indice correspondait à une courte instruction qui incitait l'élève à regarder un aspect particulier de l'animation (par exemple : « regarde la roue A » ou « regarde les deux roues et compare leur vitesse »). Dans la condition sans indices (sans signaux), aucun des indicateurs n'était présent. Soixante-trois participants étaient affectés à la condition avec indices et 66 à la condition sans indice.

4.3.3. Phases 3 et 4 : mesures de compréhension immédiate et différée

À l'issue de la consultation de la leçon, chaque participant répondait immédiatement oralement à une série de 15 questions de compréhension réparties en trois catégories :

- des questions de compréhension impliquant le rappel des notions concernant la composition et le fonctionnement des engrenages ;
- des questions de transfert de type résolution de problème nécessitant la mise en œuvre d'inférences portant sur les concepts de la leçon mais à propos de contextes différents de la leçon et impliquant donc une application des notions abordées ;
- des questions explicatives portant sur chaque concept de la leçon pour lesquelles l'apprenant devait justifier ses réponses aux deux premières catégories de questions.

Les réponses de chaque participant étaient enregistrées par l'expérimentateur et transcrites sur un livret individuel. Chaque réponse correcte rapportait un point. Les scores totaux étaient ensuite convertis en proportions de réponses correctes. Enfin, un post-test se déroulait une semaine après la consultation de la leçon et correspondait à une forme similaire (contenus et illustrations) à celle utilisée en prétest.

4.3.4. Mesures dépendantes

La compréhension était évaluée sur la base des performances à l'épreuve de rappel immédiat, l'évolution des apprentissages réalisés était mesurée à travers l'étude des gains entre le prétest et le post-test. Une troisième mesure concernait le temps de consultation de la leçon. Enfin, un indice d'efficacité de l'apprentissage était calculé en rapportant la performance de compréhension au temps d'étude de la leçon (respectivement en compréhension immédiate et pour les gains entre le prétest et le post-test).

5. Résultats

Les résultats seront décrits en trois étapes. Seront d'abord examinées les performances de compréhension à l'épreuve suivant immédiatement la leçon. Les gains entre le prétest et le post-test seront analysés ensuite. Enfin, nous nous intéresserons au temps d'étude et à l'efficacité de l'apprentissage.

5.1. Épreuve de compréhension immédiate

5.1.1. Effet du contrôle et des signaux attentionnels sur la compréhension immédiate en fonction des aptitudes spatiales

Les scores de compréhension au test immédiat sont consignés dans la Fig. 2. Une Anova (contrôle, indices et aptitudes spatiales) n'a pas révélé d'effet simple du type de contrôle

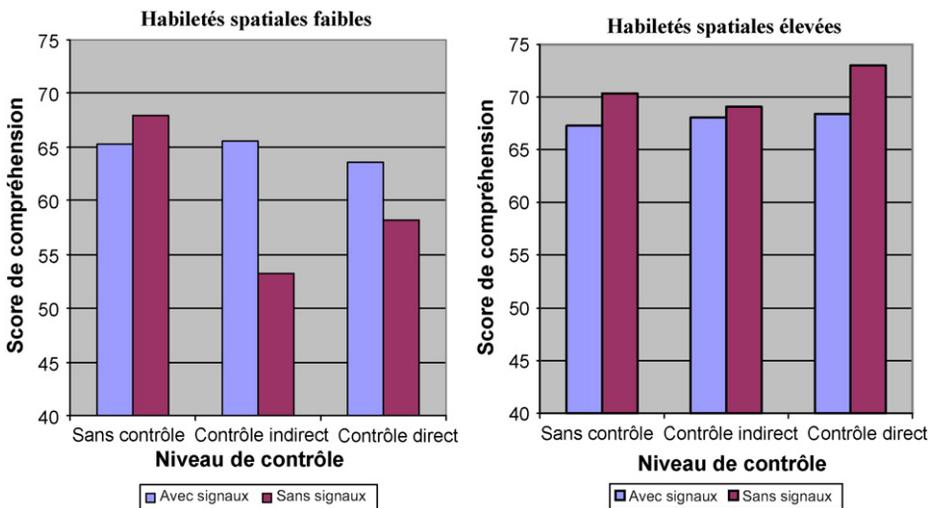


Fig. 2. Scores de compréhension en fonction des habiletés spatiales, du niveau de contrôle et de la présence de signaux attentionnels.

(sans-contrôle : $m = 67,7$, $N = 45$, $SD = 12,46$; contrôle indirect : $m = 64$, $N = 44$, $SD = 15,56$; contrôle direct : $m = 65,8$, $N = 40$, $SD = 13,54$; $F < 1$) ni d'effet simple de la présence de signaux d'orientation de l'attention (signaux présents : $m = 66,35$, $N = 63$, $SD = 12,65$; signaux absents : $m = 65,28$, $N = 66$, $SD = 15,07$; $F < 1$). En revanche, l'effet du niveau des habiletés spatiales était significatif (spatial faible : $m = 62,3$, $N = 63$, $SD = 13,42$; spatial élevé : $m = 69,33$, $N = 66$, $SD = 13,84$, $F(1, 117) = 8,3$, $p < 0,01$). Les apprenants disposant d'aptitudes spatiales élevées ont obtenu de meilleures performances de compréhension que les sujets disposant de plus faibles habiletés spatiales. L'interaction entre le contrôle et les indices n'était pas significative ($F(2, 117) = 1$, $p = 0,37$).

Nous avons conduit des analyses (Anovas) de l'effet du contrôle et des signaux attentionnels séparées pour chaque groupe de niveau des habiletés spatiales. Pour le groupe des apprenants disposant de faibles aptitudes spatiales et en l'absence d'orientation attentionnelle, le contrôle indirect (et direct, dans une moindre mesure) avait des effets significativement négatifs sur la compréhension comparativement à la condition sans contrôle (contrôle indirect : $m = 54,88$, $N = 11$, $SD = 17,25$; non contrôlable : $m = 67,23$, $N = 13$, $SD = 12,3$, $F(1, 57) = 5,21$, $p = 0,025$). Quand les indices attentionnels étaient présents, nous n'observions plus d'effet du contrôle. Le guidage de l'attention au cours de traitement de l'animation semblait ainsi compenser les difficultés cognitives pragmatiques dues aux contraintes d'utilisation du système de contrôle. Quand les apprenants possédaient des habiletés spatiales élevées, nous n'observions pas de différence significative entre les trois versions du contrôle, ni entre les deux modalités d'orientation de l'attention. Dans ce groupe, le contrôle n'affectait pas l'apprentissage et les sujets n'avaient pas un réel besoin de guidage.

5.1.2. *Effet du contrôle et des signaux attentionnels sur la compréhension immédiate en fonction des connaissances préalables*

Le **Tableau 1** présente les scores de compréhension des apprenants en fonction de leur niveau de connaissances préalables, des conditions de contrôle et de signalisation des animations. Le pattern de résultats s'approche du précédent. L'Anova (connaissances préalables, contrôle et signaux) n'a pas révélé d'effet du contrôle ($F < 1$), mais un effet des connaissances préalables ($F(2, 111) = 5$, $p < 0,01$) et une interaction entre connaissances préalables et signaux de guidage ($F(2, 111) = 4$, $p < 0,01$). Pour les apprenants disposant de faibles connaissances préalables, la présence de guidages attentionnels améliorait la compréhension.

5.2. *Évolution des performances entre le prétest et le post-test*

5.2.1. *Effet du contrôle et des signaux attentionnels sur l'évolution des performances en fonction des aptitudes spatiales*

Les gains moyens obtenus entre le prétest et le post-test sont consignés en **Fig. 3**. L'Anova conduite sur les trois facteurs (contrôle, signaux, habiletés spatiales) n'a pas montré d'effet du contrôle (contrôle indirect : $m = 22,05$, $N = 44$, $SD = 14,92$; contrôle direct : $m = 24,62$, $N = 40$, $SD = 15,64$; sans contrôle : $m = 26,7$, $N = 45$, $SD = 14,12$, $F(2, 117) = 1,31$, $p = .27$). Aucune différence n'a été obtenue en ce qui concerne les signaux (signaux présents : $m = 24,3$, $N = 63$, $SD = 14,20$; signaux absents : $m = 24,6$, $N = 66$, $SD = 15,63$, $F < 1$). En revanche, les gains obtenus par les participants possédant de faibles aptitudes spatiales étaient plus grands que ceux obtenus par les sujets possédant des habiletés spatiales plus élevées (spatial faible : $m = 31,22$, $N = 63$, $SD = 13,86$; spatial élevé : $m = 17,67$, $N = 66$, $SD = 12,56$; $F(1, 117) = 32,3$, $p < 0,01$).

Tableau 1
Scores de compréhension en fonction du niveau des connaissances préalables, du niveau de contrôle et de la présence de signaux.

	Connaissances préalables élevées (N=38)			Connaissances préalables médianes (N=46)			Connaissances préalables faibles (N=45)		
	Sans contrôle (N=11)	Contrôle indirect (N=14)	Contrôle direct (N=13)	Sans contrôle (N=19)	Contrôle indirect (N=16)	Contrôle direct (N=11)	Sans contrôle (N=15)	Contrôle indirect (N=14)	Contrôle direct (N=16)
Avec signaux	72,50 (5,77)	64,04 (10,29)	70,83 (7,56)	64,50 (10,40)	63,60 (13,76)	65,41 (26,52)	64,21 (14,17)	75,33 (15,40)	63,63 (8,62)
Sans signaux	74,93 (13,13)	75,00 (15,67)	75,17 (9,70)	68,82 (13,04)	61,90 (17,67)	67,56 (11,32)	64,34 (15,22)	51,52 (15,18)	55,50 (13,31)

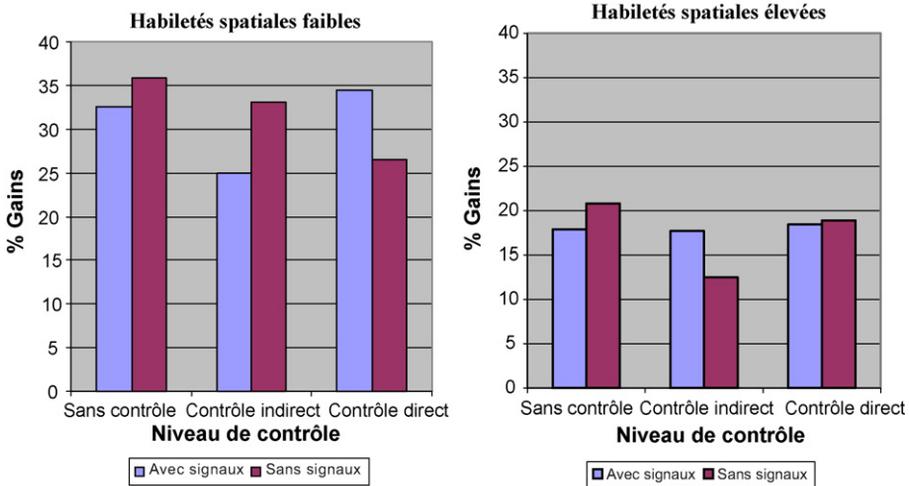


Fig. 3. Gains moyens entre le pré et le post-test selon les habiletés spatiales, le contrôle et les signaux.

En résumé, l'analyse des gains entre le prétest et le post-test a permis de mettre en évidence un fort effet d'apprentissage, qui ne semblait pas influencé par les propriétés de contrôle sur l'animation.

5.2.2. Effet du contrôle et des signaux attentionnels sur l'évolution des performances en fonction connaissances préalables

Dans le **Tableau 2** sont consignés les résultats concernant les gains entre le prétest et le post-test en fonction des connaissances préalables. L'Anova conduite sur les trois facteurs (connaissances préalables, contrôle et signaux) n'a pas révélé d'effet du contrôle ($F < 1$) ni d'effet de la présence de signaux d'orientation attentionnelle ($F < 1$). Cependant, le niveau des connaissances préalables avait un effet sur les gains d'apprentissage ($F(2,111) = 15,1$; $p < 0,01$). Au cours d'une dernière analyse, nous avons utilisé comme variable dépendante la somme des dix sous-scores (sur 15) portant sur les trois notions cruciales du post-test (le sens de rotation des engrenages, la vitesse et l'effet mécanique). Cette analyse a montré un effet marginalement du contrôle ($F(2,111) = 2,64$, $p = 0,056$). De plus, les apprenants de la condition sans contrôle ont obtenu de meilleures performances de compréhension que les participants de la condition avec contrôle indirect ($t(111) = 2,41$, $p < 0,05$).

5.3. Temps de consultation de la leçon animée et efficacité de l'apprentissage

Les précédents résultats ont indiqué que le contrôle sur le déroulement de l'animation n'améliorait pas la compréhension de processus dynamiques techniques chez des enfants de dix à 11 ans. Cette absence de bénéfice semblait particulièrement marquée quand l'apprenant ne disposait pas de guidages permettant d'orienter son attention et les processus de traitement. Pourquoi un tel résultat en apparence contre-intuitif ? Une première réponse s'est appuyée sur l'analyse de deux indicateurs. Le premier avait trait aux temps de consultation de la leçon. Le deuxième indicateur correspondait à un indice d'efficacité de l'apprentissage réalisé par chaque participant. Cet indice d'efficacité consistait à compiler le temps de consultation de la leçon et le score de compréhension pour chaque participant : il était le résultat d'un rapport qui consistait à diviser

Tableau 2

Gains moyens entre le prétest et le post-test en fonction du niveau des connaissances préalables, du niveau de contrôle et de la présence de signaux.

	Connaissances préalables élevées ($N = 38$)			Connaissances préalables médianes ($N = 46$)			Connaissances préalables faibles ($N = 45$)		
	Sans contrôle ($N = 11$)	Contrôle indirect ($N = 14$)	Contrôle direct ($N = 13$)	Sans contrôle ($N = 19$)	Contrôle indirect ($N = 16$)	Contrôle direct ($N = 11$)	Sans contrôle ($N = 15$)	Contrôle indirect ($N = 14$)	Contrôle direct ($N = 16$)
Avec signaux	16,25 (6,37)	19,86 (8,19)	13,95 (12,38)	23,75 (20,50)	19,68 (14,38)	23,75 (14,01)	31,25 (10,24)	27,5 (19,10)	34,43 (13,10)
Sans signaux	12,70 (8,67)	10,53 (9,37)	14,10 (12,13)	34,09 (14,17)	18,43 (16,56)	27,91 (16,61)	34,28 (13,89)	33,88 (13,16)	25,75 (11,54)

le score de compréhension de la leçon par le temps de consultation. Nous avons calculé deux indices d'efficacité : l'un pour l'épreuve de compréhension immédiate, l'autre pour l'épreuve de compréhension différée. Les temps de consultation de la leçon au cours de l'apprentissage ainsi que l'indice d'efficacité en compréhension immédiate et en post-test (gains entre le prétest et le post-test) en fonction du niveau de contrôle et des habiletés spatiales sont consignés dans le **Tableau 3**.

En premier lieu, il est apparu que l'étude de la leçon prenait un temps beaucoup plus long quand le contrôle était possible que quand il ne l'était pas ($F(2, 117) = 16,6, p < 0,01$). La condition d'interactivité la plus directe avec le système a conduit au temps d'apprentissage le plus long sans contrepartie du point de vue des bénéfices de la compréhension. Les contraintes d'interaction avec l'animation dans les conditions de contrôle, direct en particulier, ont conduit les apprenants à « consommer » un temps relativement long de consultation. Cet accroissement temporel associé à une quantité d'interaction élevée avec le système technique n'a pas conduit pour autant à une meilleure intégration. Dans la condition de contrôle indirect, nous avons des temps de consultation plus longs, que dans la condition non contrôlable ($F(1, 126) = 6,9, p < 0,01$). La condition de contrôle direct a conduit à un temps d'étude plus long en comparaison de la condition sans contrôle ($F(1, 126) = 31, p < 0,01$) ou en comparaison de la condition de contrôle indirect ($F(1, 126) = 8,57, p < 0,01$). Ces différences étaient essentiellement dues aux différentes formes de contrôle. En effet, les corrélations entre les scores de compréhension et les temps d'études de la leçon étaient soit négatives, soit proches de zéro et dans tous les cas non significatives. La corrélation entre le score de compréhension immédiate et le temps de consultation était de $r(129) = 0,17, p > 0,10$. La corrélation entre les gains du prétest au post-test et le temps de consultation de la leçon était de $r(129) = 0,02, p > 0,10$.

En second lieu, les données du **Tableau 3** montrent que l'efficacité de l'apprentissage a été significativement affectée par l'interactivité avec le système présenté. En compréhension immédiate, l'efficacité de l'apprentissage était plus élevée dans la condition non contrôlable que les deux conditions contrôlables, $F(2, 117) = 13,69, p < 0,001$. En ce qui concerne les gains entre le prétest et le post-test, l'indice d'efficacité était également plus élevé dans la condition sans contrôle que dans les deux autres conditions plus interactives $F(2, 117) = 6,94, p < 0,001$. Il apparaît donc clairement que l'ajout d'interactivité, à travers l'augmentation du contrôle du déroulement de l'animation par l'apprenant a été préjudiciable à l'apprentissage et à la compréhension chez des enfants de moins de 12 ans.

6. Discussion

Cette recherche avait pour but d'étudier le rôle du contrôle et des signaux attentionnels dans la compréhension d'animations techniques chez des enfants de dix à 11 ans. Qu'il soit direct ou indirect, le contrôle sur le déroulement de l'animation n'a pas été bénéfique. Bien au contraire, il est apparu que, contrairement à une condition sans contrôle, les deux conditions contrastées de contrôle pénalisaient la compréhension immédiate comme l'apprentissage à plus long terme, en particulier en l'absence de guidages attentionnels et pour les apprenants ne disposant pas de compétences spatiales élevées. En effet, le temps de consultation de la leçon augmentait considérablement avec l'introduction de propriétés de contrôle sur les animations alors que l'efficacité de l'apprentissage diminuait fortement. Ces données, obtenues pour la première fois à notre connaissance chez des enfants, corroborent et approfondissent les résultats des recherches récentes sur le rôle du contrôle des animations chez l'adulte dans des domaines différents, comme la biologie (Bétrancourt et Réalini, 2005), la météorologie (Lowe, 2004), la mécanique

Tableau 3

Temps moyen de consultation de la leçon et indices moyens d'efficacité en compréhension immédiate et différée en fonction du niveau d'habileté spatiale et du niveau de contrôle.

	Habilités spatiales faibles (N=63)			Habilités spatiales élevées (N=66)		
	Sans contrôle (N=23)	Contrôle indirect (N=22)	Contrôle direct (N=18)	Sans contrôle (N=22)	Contrôle indirect (N=22)	Contrôle direct (N=22)
Temps de consultation (s)	687,7 (207,80)	859,2 (294,04)	1133,8 (387,54)	736 (232,14)	843,7 (195,64)	986,1 (289,93)
Efficienc 1. Compréhension immédiate/temps (en minutes)	7,54 (2,61)	5,27 (2,32)	4,24 (1,98)	7,05 (2,46)	5,70 (1,83)	5,30 (1,89)
Efficienc 2. Gains pré-post test/temps (en minutes)	3,28 (1,67)	2,18 (1,39)	1,87 (1,20)	1,68 (1,28)	1,11 (0,92)	1,15 (1,01)

(Kriz et Hegarty, 2007 ; Schneider et Boucheix, 2006). Les résultats de l'ensemble de ces recherches s'accordent donc clairement à ne pas recommander l'ajout d'un contrôle interactif pour la conception d'animation visant une activité de compréhension de processus dynamiques et encore moins chez des apprenants novices, des enfants, ou des sujets disposant de faibles habiletés spatiales. Chez des enfants de moins de 12 ans, la gestion en parallèle de tout système de contrôle (même direct et intuitif) et de la tâche de compréhension (même guidée) induit une interférence.

En effet, les caractéristiques des systèmes de contrôle généralement fournis aux apprenants impliquent des manipulations qui peuvent interférer avec la tâche principale de compréhension. Dans ces conditions, les opérations de contrôle affectent le niveau de traitement de l'animation. Par exemple, dans le cas d'un contrôle direct sur les roues de l'engrenage (contrôle pourtant supposé posséder des propriétés d'*affordance* intégrées aux caractéristiques de l'illustration animée) les ressources cognitives allouées au traitement de la tâche par l'utilisateur pourraient être majoritairement focalisées sur la réalisation (locale) d'actions telles que faire tourner les roues du système avec la souris. Dans ce cas, « apprendre par l'action » pourrait perturber les mécanismes de traitement cognitif concernant le niveau de la compréhension, parce que la focalisation de l'attention du sujet sur le niveau de l'action elle-même et de ses résultats immédiats entrerait en compétition avec un traitement plus profond de l'animation. L'action, c'est-à-dire ici l'interactivité avec l'interface, n'est pas toujours source de conceptualisation. C'est pourquoi, dans la condition de contrôle direct sur le système, les scores de compréhension apparaissaient plus faibles quand les signaux de guidage attentionnels étaient absents. Dans le cas d'un contrôle indirect, la manipulation du système engendrait un moindre engagement mais l'utilisation de la barre de défilement pouvait entraîner un effet de partage d'attention entre le contrôle et le traitement de l'animation elle-même.

Une autre explication que l'interférence des tâches pourrait être avancée selon laquelle le moyen de contrôle fourni à l'enfant pouvait être employé par celui-ci, presque comme un jeu, sans avoir un objectif précis de compréhension. Il apparaît cependant que cette explication ne tient pas pour plusieurs raisons. Les enfants (11 ans en moyenne) étaient informés plusieurs fois du but de compréhension de la tâche et il leur était rappelé à plusieurs reprises qu'ils devraient répondre à des questions concernant la leçon portant sur le fonctionnement des engrenages. Par ailleurs, dans les conditions contrôlables, le temps de consultation de la leçon était considérablement plus grand que dans la condition sans contrôle. Ce résultat ne correspond pas aux temps très courts que l'on observe dans des tâches de jeux multimédias (Mayer, 2005). Enfin, la leçon présentée ici comportait des consignes attentionnelles précises stimulant l'activité de compréhension. Il apparaît bien que la gestion du système de contrôle a interféré avec la tâche de compréhension.

De plus, lorsque le système est contrôlable, le découpage des micros étapes du processus décrits par l'animation dépend des modalités d'utilisation des propriétés de contrôle par l'apprenant. En donnant une « liberté » d'action à l'utilisateur, il est possible que cette facilité d'usage soit sous-exploitée (ou exploitée de façon inadaptée) par l'apprenant par rapport aux exigences réelles de la tâche. Par exemple, le sujet pourrait manipuler l'animation trop vite ou n'explorer qu'une partie limitée du processus. De telles modalités d'action pourraient engendrer des conséquences dommageables sur la compréhension, en particulier quand des apprenants novices dans le domaine sont confrontés à des contenus dynamiques complexes. Dans de telles circonstances, le résultat immédiat du contrôle, lié à l'action propre de l'utilisateur, pourraient même conduire à des erreurs d'interprétation conceptuelle provenant du fait que des aspects très superficiels du processus animé, perceptivement saillants, sont extraits plutôt qu'une information plus fondamentale pour l'élaboration de modèles mentaux circonscrits et corrects du contenu décrit (Lowe, 2004). En résumé, le fait de donner le contrôle aux apprenants ne signifie par forcément qu'ils l'utilisent

de façon adéquate, c'est ce qui entraîne souvent une importante variabilité entre les participants d'une même condition.

Les résultats rapportés dans ce travail ont également montré que la contrôlabilité des animations n'améliore pas l'apprentissage chez les apprenants disposant d'habiletés spatiales faibles. Pour eux, utiliser un système de contrôle pourrait constituer une double tâche particulièrement coûteuse. Les résultats obtenus dans cette expérience vont clairement à l'encontre de l'idée dominante chez les concepteurs de documents multimédias dans le domaine éducatif concernant l'utilité et les caractéristiques des systèmes interactifs pour l'apprentissage. Les apprenants, particulièrement quand ils disposent de faibles connaissances préalables, ne bénéficient pas d'un contrôle total et libre sur le système à apprendre. Et même, comme le montrent les travaux sur la perception de trajectoires (Kaiser et al., 1992), le contrôle par l'apprenant peut engendrer des interprétations erronées des relations causales entre les événements décrits, par exemple (Boucheix et al., 2006).

Les résultats obtenus dans cette recherche concernaient une tâche de compréhension. Néanmoins, ces résultats doivent être mis en relation avec le fait que l'effet du contrôle pourrait aussi dépendre du contenu de la tâche à réaliser. Il apparaît nécessaire de distinguer, en particulier :

- les animations destinées à soutenir la compréhension de changements conceptuels dans le temps et l'espace ou de mécanismes complexes ;
- les animations conçues pour l'aide à la réalisation et à l'apprentissage de procédures d'actions, motrices, par exemple.

Dans le cas d'une tâche comme apprendre à réaliser des nœuds marins (Schwan et Riempp, 2004), les apprenants pourraient être capable d'évaluer de façon pertinente leurs besoins informationnels pour conduire leurs activités, parce que de telles tâches impliquent plutôt des activités d'imitation et de mémorisation des étapes des actions décrites dans le média (animation ou vidéo). Apprendre la procédure de réalisation d'un nœud marin pourrait être facilité par l'accès à un haut niveau de contrôle sur le déroulement des micros étapes de l'action associées aux activités gestuelles et motrices impliquées dans l'exécution de la tâche.

Cependant, cela n'est peut-être pas vrai chez des enfants jeunes, et le contrôle sur le déroulement des animations n'est pas bénéfique pour d'autres types d'activités pour lesquelles la clé de la compréhension réside dans l'extraction de concepts, ou de règles, sous-jacents au déroulement de l'animation (Lowe, 2005 ; Bétrancourt et Réalini, 2005 ; Rebetz et al., 2004).

Nous évoquerons pour terminer une perspective de recherche possible visant à aborder les questions soulevées précédemment. Il nous semblerait particulièrement intéressant d'obtenir des données précises relatives aux comportements d'utilisation *online* des propriétés interactives offertes par le contrôle sur le déroulement des animations. Pour cela, nous suggérons l'utilisation de techniques de capture des mouvements oculaires des participants au cours de l'étude du contenu présenté, couplées avec l'enregistrement des actions de contrôle réalisées avec la souris de l'ordinateur.

Remerciements

L'auteur remercie vivement le Pr Annie Vinter de sa relecture efficace d'une première version de cet article.

Références

- Bétrancourt, M., 2005. The animation and interactivity principles in multimedia learning. In: Mayer, R.E. (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge University Press, New-York, pp. 287–296.
- Bétrancourt, M. & Réalini, N., 2005. Le contrôle sur le déroulement de l'animation. 11^e JETCSIC; 17 Juin, Nice.
- Bétrancourt, M., Tversky, B., 2000. Effect of computer animation on user's performance: a review. *Le Travail Humain* 63 (4), 311–329.
- Boucheix, J.M., Lowe, R.K., & Soirat, A., 2006. On line processing of a complex technical animation: Eye tracking investigation during verbal description. In: *Proceedings of the EARLI-SIG 2 Congress*, University of Nottingham, September.
- Boucheix, J.M., Guignard, H., 2005. Which animation condition can improve text comprehension in children? *Eur. J. Psychol. Educ.* 20 (4), 369–388.
- Garg, A.X., Norman, G.R., Spero, L., Maheshwari, P., 1999. Do virtual computer models hinder anatomy learning? *Acad. Med.* 74, 87–89.
- Garg, A.X., Norman, G., Sperotable, L., 2001. How medical students learn spatial anatomy. *The Lancet* 357, 363–364.
- Hegarty, M., Narayanan, N.H., Freitas, P., 2002. Understanding machines from multimedia and hypermedia presentations. In: Otéro, J., Léon, J.A., Graesser, A.C. (Eds.), *The psychology of Science Text Comprehension*. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, pp. 357–384.
- Hegarty, M. & Steinhoff, K. (1997). Individual differences in the use of diagrams as external memory in mechanical reasoning. *Learning and Individual Differences*, 9, 19–42.
- Hegarty, M., Waller, D.A., 2005. Individual differences in spatial abilities. In: Shah, P., Myake, A. (Eds.), *The Cambridge Handbook of visuo spatial thinking*. Cambridge University Press, New-York, pp. 121–169.
- Kaiser, M.K., Proffitt, D.R., Whelan, S.M., Hecht, H., 1992. Influence of animation on dynamical judgments. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 18, 669–690.
- Kirsh, D., Maglio, P., 1994. On distinguishing epistemic from pragmatic action. *Cogn. Sci.* 18 (4), 513–549.
- Kriz, S., Hegarty, M., 2004. Constructing and revising mental models of a mechanical system: The role of domain knowledge in understanding external visualizations. In: Forbus, K., Gentner, D., Regier, T. (Eds.), *Proceedings of the 26th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ.
- Kriz, S., Hegarty, M., 2007. Mental models of mechanical systems: top-down and bottom-up influences on learning from animations. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.* 65 (11), 911–930.
- Lefavrais, P. (1967). *Test de L'Alouette, Manuel et tests*. Éditions du Centre de Psychologie Appliquée (ECPA). Paris.
- Lowe, R.K., 1999. Extracting information from an animation during complex visual learning. *Eur. J. Psychol. Educ.* 14 (2), 225–244, Special Issue: Visual Learning with New Technologies.
- Lowe, R.K., 2003. Animation and learning: selective processing of information in dynamic graphics. *Learn. Instr.* 14, 257–274.
- Lowe, R.K., 2004. Interrogation of a dynamic visualization during learning. *Learn. Instr.* 14, 257–274.
- Lowe, R.K., 2005. Multimedia learning of meteorology. In: Mayer, R.E. (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge University Press, New York, pp. 429–446.
- Lowe, R.K., & Schnotz, W., (2005). Traitements cognitifs et fonctions pédagogiques des animations. In: J.-M. Boucheix, & J.-F. Rouet (Eds.), *Les animations graphiques et leurs effets dans le cadre des technologies d'apprentissage*.
- Mautone, P.D., Mayer, R.E., 2001. Signalling as a cognitive guide in multimedia learning. *J. Educ. Psychol.* 93, 377–389.
- Mayer, R.E. (Ed.), 2005. *The Cambridge Handbook of Multimedia learning*. Cambridge University Press, New York.
- Mayer, R.E., Hegarty, M., Mayer, S., Campbell, J., 2005. When static media promote active learning: Diagrams versus animations in multimedia instruction. *J. Exp. Psychol. Appl.* 11, 256–265.
- Mayer, R.E., Chandler, P., 2001. When learning is just a click away: does simple user interaction foster deeper understanding of multimedia messages. *J. Educ. Psychol.* 93, 390–397.
- Narayanan, H.N., Hegarty, M., 2002. Multimedia design for communication of dynamic information. *Int. J. Hum.-Comput. St.* 57 (4), 279–315.
- Rebetz, C., Sangin, M., Bétrancourt, M., & Dillenbourg, P., 2004. Effects of collaboration in the context of learning from animations. In: *Proceedings of EARLI SIG Meeting on Comprehension of text and Graphics: Basic and Applied Issues*, September, 9–11, Universita de Valencia: Valencia Spain, 187–192.
- Schneider, E., Boucheix, J.M., 2006. On Line elaboration of a mental model during the understanding of an animation. In: Barker-Plummer, D., Cox, R., Swoboda, N. (Eds.), *Theory and Application of Diagrams*. Springer, LNAI, Springer New-York.
- Schneider, E. & Boucheix, J.M. (2007). *Learner's Activity During the Understanding of an Interactive Animated Mechanical System: Eye Tracking Investigation*. WIAMIS, IEEE, Athènes Juin.

- Schnotz, W., 2005. An integrated model of text and picture comprehension. In: Mayer, R.E. (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia learning*. Cambridge University Press, New York, pp. 49–70.
- Schnotz, W., Lowe, R.K., 2003. External and Internal representations in multimedia learning. *Learn. Instr.* 13, 117–123.
- Schwan, S., Riempp, R., 2004. The cognitive benefits of interactive videos: learning to tie nautical knots. *Learn. Instr.* 14, 293–305.
- Shah, P., Mayer, R., Hegarty, M., 1999. Graphs as aids to knowledge construction: Signalling techniques for guiding the process of graph comprehension. *J. Educ. Psychol.* 91, 690–702.
- Shah, P., Myake, A., 1996. The separability of working memory resources for spatial thinking and language processing: An individual differences approach. *J. Educ. Psychol.* 125, 4–27.
- Tassini, S., & Bétrancourt, M., 2003. Le contrôle sur l'animation influence-t-elle le niveau d'efficacité cognitive de l'animation. *Neuvièmes Journées JETCSIC, Dijon, 21 Juin*.
- Tversky, B., Bauer-Morrison, J., Bétrancourt, M., 2002. Animation: can it facilitate ? *Int. J. Hum.-Comput. St.* 57, 247–262.