

Apprendre à partir d'exemples : interactions entre présentation du matériel, activités des apprenants et processus cognitifs

Sandra Nogry*¹ et André Didierjean²

¹ CNRS et Université Claude Bernard, Lyon 1

² Laboratoire de Psychologie, Université de Franche-Comté

RÉSUMÉ

Dans de nombreuses disciplines, donner des exemples à étudier puis faire résoudre des problèmes est l'un des moyens les plus utilisés pour faire progresser les apprenants. Cet article présente une synthèse non exhaustive des nombreux travaux qui, ces vingt dernières années, ont abordé la question de l'apprentissage à partir de l'analyse d'exemples. Nous présentons des résultats expérimentaux sur les liens entre les activités cognitives développées face aux exemples, la nature du matériel étudié, et les progrès réalisés. Ces travaux ont montré que certains choix quant aux activités cognitives déployées et quant à la présentation des exemples ont une influence significative sur l'apprentissage. En parallèle à la présentation de ces recherches, nous proposons des hypothèses sur les processus cognitifs susceptibles d'expliquer ces résultats.

Learning from examples: interactions between learners' activities, format of the example and cognitive processes

ABSTRACT

In many disciplines, providing worked examples to study and then problems to solve is mostly used to improve learning. This article is a non exhaustive synthesis of researches conducted during the last twenty years about learning by studying examples. We present here experimental results about links between cognitive activities developed from examples, nature of material and learning progress. These researches show that a number of choices about cognitive activities and examples format have a significant influence on learning. For instance, encouraging learners to elaborate self-explanations on examples improves learning outcomes. Pointing out salient features in the example or altering the surface features presented also have an impact on learning. If these results have a great interest because they can lead to instructional design applications, they are sometimes dissonant. In this paper, we propose hypotheses about knowledge generalisation processes in order to explain these various results.

* LIRIS

Université Claude Bernard – Lyon 1 & CNRS
Bâtiment Nautibus (710) – 8, Bd N. Bohr
Domaine Scientifique de la Doua, 69622 Villeurbanne Cedex
sandra.nogry@iris.univ-lyon1.fr

Dans la plupart des disciplines, donner des exemples à étudier puis des problèmes à résoudre est l'un des moyens les plus utilisés pour faire progresser les apprenants. Un certain nombre de choix doivent alors être faits quant à la nature du matériel présenté, à sa présentation et aux activités que l'apprenant devra mettre en œuvre sur ce matériel. Faut-il inciter les apprenants à mettre en œuvre certaines activités particulières lors de son analyse ? Les lire, tenter de résoudre les problèmes parallèlement à la lecture... ? Ensuite, quel type de matériel faut-il fournir ? Des exemples de problèmes résolus ? Des textes théoriques illustrant les principes à acquérir ? Les exemples fournis doivent-ils être contrastés quant à leur « habillage » ? Ou vaut-il mieux fournir des exemples homogènes ? Dans cet article, nous présentons une revue des nombreux travaux en psychologie cognitive qui, ces vingt dernières années, ont tenté d'étudier expérimentalement ces questions. Ces travaux visent, indépendamment des spécificités de chaque discipline, à dégager des invariants dans les effets d'apprentissage observés. Parallèlement à la présentation de ces travaux, nous évoquerons des hypothèses quant à la nature des processus cognitifs en jeu, susceptibles d'être responsables des effets d'apprentissage observés.

ROLE DES ACTIVITÉS DÉVELOPPÉES SUR LES PROBLÈMES

Dès lors que l'on souhaite faire apprendre à partir d'exemples, une question importante concerne le rôle et la nature des activités déployées par les apprenants face aux exemples. Certaines activités sont-elles plus propices à l'apprentissage que d'autres ? Peut-on orienter les activités des apprenants en vue d'un apprentissage plus efficace ?

1. Étudier des exemples corrigés ou résoudre des problèmes ?

Une première question, préalable à toute question sur les activités à déployer face à un exemple corrigé, concerne l'intérêt de l'étude de problèmes résolus comparé à la résolution des mêmes problèmes. Progresser-t-on davantage si l'on analyse des exemples déjà résolus en tentant de les comprendre ou si l'on tente de résoudre les mêmes problèmes ? Cette

question est abordée par Cooper et Sweller (1987) qui comparent deux groupes de sujets confrontés à des problèmes d'algèbre portant sur une notion qu'ils maîtrisent mal. Pour chaque problème, le premier groupe doit chercher la solution jusqu'à l'obtention d'une solution correcte alors que le second groupe étudie d'abord le corrigé du problème avant d'essayer de le résoudre. Une phase de résolution de problèmes isomorphes permet ensuite de mesurer leur apprentissage. Les résultats de Cooper et Sweller montrent que le groupe ayant étudié les problèmes corrigés résout les problèmes tests plus rapidement et mieux que l'autre groupe. Ce résultat a été répliqué dans différentes situations (Zhu et Simon, 1987 ; Ward et Sweller, 1990 ; Carrol, 1994 ; Paas et Van Merriënboer, 1994) ; ainsi, Ward et Sweller (1990) montrent la supériorité des exemples dans le cadre scolaire.

La plupart des recherches qui montrent la supériorité de l'analyse de problèmes résolus sur la résolution de problèmes sont réalisées avec des sujets ayant peu de connaissances préalables sur le domaine. Or, lorsque les sujets possèdent davantage de connaissances, les résultats sont différents : avec l'augmentation de l'expertise, il devient moins avantageux d'étudier des problèmes corrigés ; la résolution de problèmes conduit progressivement à de meilleurs résultats (Kalyuga, Chandler, Tuovinen et Sweller, 2001 ; Kalyuga, Ayres, Chandler et Sweller, 2003). La transition entre l'analyse de problèmes résolus et la résolution de problèmes semble alors pouvoir être facilitée en présentant aux sujets des problèmes à compléter¹ (Van Merriënboer et Krammer, 1987 ; Paas, 1992 ; Renkl, Atkinson, Maier et Staley, 2002 ; Atkinson, Renkl, et Merrill, 2003 ; Renkl et Atkinson, 2003 ; Renkl, Atkinson, et Große, 2004).

À quoi tiennent ces effets ? Un premier niveau d'explication a été fourni par Sweller dans le cadre de la « théorie de la charge cognitive » (*Cognitive load theory*) (Voir Sweller, 1988 ; 1994 ; 1999 ; Tricot, 1998 pour des revues de question). D'après cette théorie, la mémoire de travail des apprenants ayant une capacité limitée, en situation d'apprentissage les apprenants doivent partager leurs ressources cognitives entre l'activité à réaliser et la construction de connaissances générales (des schémas). Dans l'ensemble de ses travaux, Sweller montre que certaines activités sont plus coûteuses pour la mémoire de travail que d'autres, laissant alors « moins de place » pour la mise en œuvre de processus d'apprentissage. Ainsi, lorsque les sujets ayant peu de connaissances préalables tentent de résoudre les problèmes, le coût cognitif est plus important que lorsqu'ils

¹ Ce type de problème donne l'état du problème, le but à atteindre et une solution partielle qui doit être complétée par l'apprenant.

analysent les exemples sans les résoudre, ce qui laisse moins de place pour l'élaboration d'une représentation abstraite de la structure de résolution du problème (Cooper et Sweller, 1987 ; Ward et Sweller, 1990 ; Paas et Van Merriënboer, 1994). Avec l'augmentation de l'expertise, de nombreux processus devenant automatisés, le facteur « charge cognitive » deviendrait moins déterminant (Kalyuga et al., 2001 ; 2003).

Si les recherches que nous avons présentées ici montrent que pour des sujets novices, étudier des corrigés est un moyen intéressant pour acquérir des connaissances transférables à de nouvelles situations, ces recherches ne nous informent pas sur la nature des activités que les sujets déploient face aux exemples. Cette question a davantage été étudiée dans un autre champ de recherche sur l'apprentissage à partir d'exemples : les recherches sur les auto-explications.

2. Les études sur les « auto-explications »

Pour tenter de comprendre la nature des activités mises en œuvre par les apprenants lorsqu'ils étudient des exemples, certaines recherches ont demandé aux sujets de verbaliser face à des exemples. Ces travaux ont mis en évidence certaines verbalisations et activités associées à une bonne compréhension des exemples.

Principe des « auto-explications »

Dans une étude princeps, Chi, Bassok, Lewis, Reimann et Glaser (1989) tentent de distinguer les verbalisations associées à de bonnes performances en résolution de problèmes de celles qui sont plutôt associées à de mauvaises performances. Dans cette recherche, ces auteurs présentent à des sujets des principes théoriques du domaine de la physique suivis de trois exemples à étudier puis de trois problèmes isomorphes à résoudre. À partir des performances sur les problèmes du post-test, les auteurs distinguent deux groupes de sujets : un groupe de sujets qui réussit bien ces problèmes et un groupe de sujets qui les échoue. Chi et al. (1989) étudient alors ce qui a distingué ces deux groupes dans la phase d'analyse des exemples qui précédait le post-test. Leurs résultats montrent que leurs verbalisations se distinguent, non pas par leur nombre, mais par leur contenu. Les bons apprenants tentent plus souvent d'établir des liens entre les différentes étapes de résolution et s'interrogent sur les conditions d'application et les buts des opérateurs qu'ils utilisent. Ainsi, les bons apprenants produisent plus « d'auto-explications » que les mauvais, les « auto-explications » étant définies comme des propos qui appartiennent

au domaine étudié, des actes exploratoires susceptibles de conduire à la solution, par opposition aux propos dans lesquels les sujets commentent simplement leur niveau de compréhension. Cette première recherche a ouvert la voie à tout un domaine de recherche sur les auto-explications et leur rôle (Chi, De Leeuw, Chiu et La Vancher, 1994 ; Pirolli et Recker, 1994 ; Renkl, 1997 ; Van Lehn, 1998).

Qualité des auto-explications

Comme souligné précédemment, plus que le nombre de verbalisations produites, c'est surtout la qualité des verbalisations qui est importante (Chi et al., 1989 ; Renkl, 1997 ; Neuman et Schwarz, 1998). Pirolli et Recker (1994) observent même une relation inverse entre la quantité de verbalisations produites sur un exemple et l'apprentissage : lorsque la quantité de verbalisations est très importante, les performances sont altérées.

Dans une recherche qui réplique les résultats de Chi et al. (1989) sur un plus grand nombre de sujets, Renkl (1997) montre que l'on peut distinguer de manière plus précise différentes catégories d'auto-explications et qu'il existe des différences interindividuelles dans le recours à ces différentes catégories.

L'auteur distingue ainsi plusieurs « styles » de verbalisations qui correspondent à des niveaux de performances différents :

Le **style dit « anticipatif »** est caractérisé par une tentative chez les sujets d'anticiper les étapes à venir lors de la lecture des exemples. Cette catégorie de verbalisation est associée ensuite à de bonnes performances sur de nouveaux problèmes.

Le **style dit « basé sur les principes »** est défini par le fait de donner du sens aux opérateurs en explicitant les principes sous-jacents aux étapes et en les faisant correspondre aux buts ou sous-butts du problème. Cette catégorie de verbalisations est également associée à de bonnes performances.

Enfin l'auteur distingue deux autres catégories de verbalisations qui conduisent à un faible apprentissage. Le **style dit « passif »** se caractérise par peu d'explications basées sur les principes, peu de mise en correspondance des opérateurs avec les buts à atteindre et l'expression fréquente de problèmes de compréhension. Enfin, le **style dit « superficiel »** se caractérise par un faible temps d'étude des exemples pendant lequel les sujets tentent de dégager les principes sous-jacents. Il est à noter que Renkl appelle tous ces styles « auto-explication », ce qui semble peu compatible avec la définition donnée par Chi et al. (1989) qui réserve ce terme pour les verbalisations montrant une véritable activité cognitive de réélaboration des corrigés.

Renkl (1997) montre qu'il existe des différences individuelles importantes dans l'utilisation des différentes catégories de verbalisations. Les sujets adoptent majoritairement l'une des catégories et ce « choix » semble avoir des conséquences sur l'apprentissage (voir aussi Didierjean et Cauzinille-Marmèche, 1998). Toutefois, il est à noter que ces recherches sont de nature corrélative et ne permettent donc pas de conclure à un lien de causalité entre la nature des auto-explications et l'apprentissage. Afin d'étayer cet aspect, d'autres recherches dans ce champ ont visé à induire la production d'auto-explications afin d'observer si cela s'accompagne d'un gain de performance.

Induction d'auto-explications

Plusieurs méthodes de natures différentes ont été développées pour tenter d'induire l'activité d'auto-explication (Chi et al., 1994 ; Bielaczyc, Pirolli et Brown, 1995 ; Neuman et Schwarz, 1998 ; Conati et Vanlhen, 1999 ; Aleven et Koedinger, 2002 ; Wong, Lawson et Keeves, 2002).

Bielaczyc, Pirolli et Brown (1995) entraînent des sujets, dans le cadre d'un cours de programmation, à l'utilisation des stratégies d'auto-explications mises en évidence par Chi et al. (1989) (catégorie qui correspond au style basé sur les principes proposé par Renkl). Ces auteurs comparent les performances de deux groupes de sujets qui reçoivent, ou ne reçoivent pas, un entraînement explicite aux stratégies d'auto-explications. Après trois cours d'introduction communs aux deux groupes, l'instructeur présente au groupe expérimental le principe et l'intérêt des procédures d'auto-explications, puis les applique sur des exemples concrets pendant deux séances. Ces sujets les appliquent ensuite eux-mêmes sur des exemples. Pour le groupe contrôle, l'instructeur fait une intervention de même longueur en utilisant un matériel identique, mais sans faire référence aux stratégies d'auto-explications. Une dernière séance commune aux deux groupes permet d'évaluer leurs performances en programmation. Les résultats de cette recherche montrent que le groupe qui reçoit un entraînement explicite aux auto-explications a davantage progressé que le groupe contrôle.

Si dans la recherche de Bielaczyc et al. (1995), les sujets ont un entraînement aux auto-explications qui demande beaucoup de temps (deux séances d'entraînement aux auto-explications), les mêmes résultats semblent pouvoir être obtenus plus rapidement (Stark Mandl, Gruber et Renkl, 2002 ; Wong et al., 2002). Ainsi, Stark et al. (2002) proposent à un groupe d'apprenants un entraînement aux auto-explications de vingt minutes : l'expérimentateur sert de modèle en s'auto-expliquant à haute voix un problème résolu, et donne un feedback lorsque les apprenants font eux-mêmes des auto-explications. Pendant le même temps, un autre

groupe d'apprenant (groupe contrôle) est exposé aux mêmes exemples sans instruction supplémentaire. Cet entraînement de vingt minutes aux auto-explications a des effets très positifs sur l'apprentissage, les performances obtenues par ce groupe étant supérieures aux performances du groupe contrôle.

Ces premières recherches sur les auto-explications ont toutes tenté d'induire des auto-explications du style dit « basé sur les principes ». Comme l'a montré Renkl (1997), le style « anticipatif » peut également conduire à de bonnes performances. Stark (1999) (décrit par Renkl, 2002) tente donc d'induire un raisonnement « anticipatif » en insérant des « blancs » dans des problèmes résolus. Dans la condition expérimentale, les exemples sont présentés étape par étape, avec des éléments manquants dans le matériel étudié. Après avoir complété les trous, la solution complète est donnée aux sujets afin de leur fournir un feedback sur la justesse des anticipations produites. Dans la condition contrôle, les sujets étudient les problèmes résolus complets. L'étude des exemples est suivie par un post-test. Les résultats obtenus lors du post-test montrent que le groupe expérimental a de meilleures performances que le groupe contrôle. Un raisonnement anticipatif peut donc être provoqué par l'insertion de « blancs » dans un problème résolu présenté séquentiellement et conduire à des gains de performances.

Ainsi, ces différentes études montrent d'abord que les auto-explications sont produites naturellement par les apprenants, mais qu'il existe des différences interindividuelles importantes. Seules certaines auto-explications sont associées à des gains en performances. Il est toutefois possible d'induire la production de ces auto-explications par un entraînement ou par une modification du format de présentation des exemples ; les sujets obtiennent alors de meilleures performances. Ces effets ont été montrés pour différents types de matériels (exemples résolus, problèmes à résoudre (Neuman et Schwarz, 1998), instructions textuelles (Bielaczyc et al., 1995) ou compréhension de texte (McNamara, 2004)) et dans différents domaines (apprentissage de la programmation, résolution de problèmes...).

L'intérêt principal des travaux sur les auto-explications est sans doute de mettre l'accent sur l'importance des activités mise en œuvre par les sujets. Cependant ces travaux ne donnent pas véritablement d'indications sur la nature des processus cognitifs sous-jacents aux activités décrites. On observe en effet dans la littérature en psychologie une véritable dichotomie entre les travaux sur les auto-explications et ceux sur les processus d'apprentissage. Nous allons maintenant présenter les travaux sur les processus d'apprentissage et évoquer des hypothèses sur les liens susceptibles d'exister entre processus d'apprentissage et auto-explications.

3. Les processus d'apprentissage

Lorsque des apprenants sont confrontés à des exemples, quels sont les processus d'apprentissage dont ils disposent et qui leurs permettent de développer de nouvelles connaissances ? Il semble que l'on puisse distinguer deux catégories de processus d'apprentissage selon la nature de la connaissance construite. En effet, apprendre peut consister à élaborer une connaissance abstraite, dégagée des traits de surface, qui pourra être réinvestie dans un large champs de situations, mais aussi à stocker des épisodes spécifiques dont le champs d'utilisation sera moins large, mais dont l'utilisation dans le cadre d'un raisonnement à partir de cas pourra s'avérer efficace (voir Cauzinille-Marmèche et Didierjean, 1999 ; Didierjean, 2001 ; Reeves et Weisberg, 1994, pour des revues de question).

Quel est tout d'abord le répertoire de processus dont disposent les apprenants pour élaborer une connaissance abstraite ? Il semble que l'on puisse distinguer trois processus différents de généralisation.

Tout d'abord, le processus de généralisation le plus étudié en psychologie cognitive est sans aucun doute l'induction. Ce type de mécanisme consiste à détecter les similitudes entre plusieurs situations qui partagent une structure commune de résolution. Face à des problèmes isomorphes, la mise en œuvre de mécanisme de détection de similitudes permettrait d'éliminer dans la connaissance élaborée les traits de surface qui diffèrent d'une situation à l'autre pour ne garder que la structure de résolution commune à ces problèmes (Gick et Holyoak, 1983 ; Bassok et Holyoak, 1989 ; Bassok, 1990 ; Cummins, 1992).

Un deuxième processus de généralisation, moins étudié à ce jour en psychologie cognitive, est désigné sous le nom de « processus explicatifs » (Elio et Anderson, 1983 ; Kieras et Bovair, 1986 ; Brown et Kane, 1988 ; Ahn, Brewer et Mooney, 1992). Les travaux étudiant ce type de processus partent du constat selon lequel les sujets peuvent construire un schéma à partir de l'analyse d'un seul exemple s'ils disposent des connaissances élémentaires nécessaires (Elio et Anderson, 1983 ; Kieras et Bovair, 1986 ; Brown et Kane, 1988 ; Ahn, Brewer et Mooney, 1992). Les sujets élaboreraient une connaissance abstraite en tentant tout d'abord d'établir des liens causaux entre les étapes de résolution, puis en revenant sur les liens posés pour essayer de construire une connaissance les articulant. Enfin, Ross et Kennedy (1990) évoquent l'hypothèse de l'existence d'un troisième processus de généralisation consistant à adapter une connaissance spécifique sur un problème dans le cadre d'un raisonnement par analogie. Dans cette perspective la généralisation serait le fruit non pas d'une comparaison entre les deux situations (la situation source et la situation cible) se déroulant après l'adaptation, mais véritablement de l'adaptation analo-

gique elle même (voir aussi Didierjean, 2003). Si les liens entre le transfert analogique et une généralisation consécutive à l'adaptation ont souvent été évoqués (Gentner, 1989 ; Holyoak et Thagard, 1989 ; voir Ripoll et Coulon, 2001 ; Ripoll, 2003 pour des revues de question sur les mécanismes en jeu lors de l'adaptation analogique) il y a à ce jour peu d'éléments empiriques montrant que c'est bien *pendant* l'adaptation que s'effectue la généralisation.

Enfin, si apprendre consiste dans de nombreux cas à élaborer une connaissance abstraite, les sujets peuvent progresser parce qu'ils stockent puis adaptent des parties spécifiques des exemples (Kolodner, 1993 ; Schank, 1982 ; 1999). Si le raisonnement à partir de cas est le mode de raisonnement privilégié des novices (Reed, 1987 ; 1989 ; Reed et Bolstad, 1991), c'est aussi un mode de raisonnement économique et courant pour les experts (Kolodner, 1993 ; Blessing et Ross, 1996 ; Schank, 1982 ; 1999). Les facteurs qui déterminent qu'une situation spécifique sera davantage mémorisée qu'une autre sont à ce jour assez méconnus. Un des facteurs semble être la difficulté rencontrée par les sujets lors de la résolution (Gick et McGarry, 1992 ; Johnson et Seifert, 1992 ; Patalano et Seifert, 1994 ; Didierjean, Cauzinille-Marmèche et Savina, 1999). Ce sont les situations ayant engendrées des difficultés qui seraient mémorisées de manière privilégiée. Dans cette optique, les travaux sur le raisonnement à partir de cas en intelligence artificielle mettent l'accent sur la notion « d'attente déçue » comme critère de sélection des cas stockés dans leur base de cas. Dans ces systèmes, l'important est de stocker en mémoire les « bonnes » situations, celles qui par la suite seront utiles. Pour cela, lorsqu'ils sont confrontés à une nouvelle situation, la plupart des systèmes de raisonnement à partir de cas (voir pour des exemples le système JUDGE, Bain, 1986, décrit par Riesbeck et Schank, 1989, ou le système CHEF, Hammond, 1990) tentent d'anticiper les étapes à venir. Lorsqu'une étape ne correspond pas à ce qui est attendu, l'étape ayant occasionné une « attente déçue » va être mémorisée pour une réutilisation ultérieure (voir pour des mises en évidence expérimentales de ce type de phénomènes, Hudson, 1988 ; De Graef, Christaens et d'Ydewalle, 1990 ; Hudson, Fivush et Kuebly, 1992 ; Patalano et Seifert, 1994).

Peut-on mettre en liaison les différents styles d'auto-explications que nous avons précédemment décrits et les processus d'apprentissage dont disposent les apprenants ? Nous allons évoquer ici certaines des similarités entre les phénomènes décrits sous le nom d'auto-explications et les phénomènes décrits dans les travaux portant sur les processus d'apprentissage. Comme nous l'avons présenté précédemment, deux « styles » différents d'auto-explications conduisent à une amélioration des performances

(Renkl, 1997). Le premier style source de progrès est le style dit « basé sur les principes ». Ce style désigne des apprenants qui font appel à leurs connaissances préalables d'une part afin de mettre en évidence les principes sous-jacents à l'exemple, et d'autre part pour faire le lien entre les opérations réalisées et les sous-buts à atteindre. Ces activités, telles qu'elles sont décrites ici par Renkl, sont très proches des activités décrites dans le cadre des travaux sur les processus explicatifs. Dans ces recherches, on observe que les apprenants tentent de poser des liens causaux entre les étapes pour construire une connaissance organisant l'enchaînement de ces liens en succession de sous-buts.

Le deuxième « style » source de progrès est le style dit « anticipatif ». Celui-ci est caractérisé par une anticipation des étapes à venir lors de la lecture des exemples. Plusieurs hypothèses peuvent sans doute être évoquées quant à la nature des processus reflétés par cette activité. Tout d'abord, cette tentative d'anticipation pourrait être le reflet d'une activité de comparaison des situations : c'est sur la base d'une remémoration des exemples passés que le sujet « anticipe » l'étape à venir. De plus, cette activité telle qu'elle est décrite par Renkl est très proche de la notion d'attente déçue décrite dans les travaux sur le raisonnement à partir de cas (Kolodner, 1993 ; 1997 ; Schank, 1982 ; 1999). Les activités d'anticipation pourraient permettre à l'apprenant d'identifier avec précision les passages des exemples qui sont sources de difficultés, que se soit pour tenter d'extraire la structure de ces passages via des processus explicatifs, ou pour mémoriser ces passages et leurs solutions pour la mise en œuvre ultérieure d'un raisonnement à partir de cas.

Mettre en relation les travaux des deux domaines de recherche présentés ici, ceux sur les auto-explications et ceux sur les processus d'apprentissage, offre sans doute des perspectives, tant appliquées que théoriques, importantes. En effet les travaux sur les auto-explications permettent d'aborder les mécanismes d'apprentissage tels qu'ils sont utilisés en situation « naturelle ». On étudie dans ces travaux quelles sont les activités qui sont spontanément mises en œuvre par les apprenants. Reprendre ces travaux avec un regard davantage tourné vers l'analyse des processus pourrait permettre de mieux comprendre comment les mécanismes d'apprentissage sont mis en œuvre : peuvent-ils être mis en œuvre conjointement ? Certaines conditions d'application sont-elles plus efficaces que d'autres ? De plus, une meilleure compréhension des mécanismes cognitifs pourrait permettre de favoriser l'induction des activités qui semblent conduire à un transfert sur de nouveaux problèmes, ce qui offre des perspectives appliquées évidentes. En retour, mettre en relation ces deux champs offre un moyen d'aborder la coexistence des

différents processus, question peu abordée à ce jour dans les travaux sur les processus d'apprentissage. De plus, une deuxième question importante, également peu abordée dans les études sur les processus d'apprentissage, concerne les conditions de déclenchement des processus : quelles situations permettent au mieux, ou incite le plus, à les mettre en œuvre ? Cette dernière question, cruciale dans une perspective appliquée, peut également être abordée à partir de la question suivante : comment présenter les exemples fournis aux apprenants pour « optimiser » l'apprentissage. De manière complémentaire aux travaux sur les activités des apprenants nous allons présenter des travaux dans ce sens qui portent sur la nature et la présentation du matériel.

NATURE ET PRÉSENTATION DU MATÉRIEL DONNÉ À ÉTUDIER

S'il est clair que les activités mises en œuvre face à un exemple jouent un rôle déterminant dans l'apprentissage, un deuxième aspect important concerne le mode de présentation de ces exemples. De nombreux travaux en psychologie cognitive ont montré que le choix des différents modes de présentations possibles des exemples a une influence sur l'apprentissage. Nous détaillerons ces études en abordant d'abord le rôle de la plus ou moins grande saillance des éléments structuraux que contiennent les exemples. Nous présenterons ensuite des recherches qui portent sur l'influence de la similitude/dissimilitude entre les exemples présentés. Tout au long de cette présentation, nous soulignerons à nouveau le fait que ces travaux n'abordent pas, la plupart du temps, la question des processus mis en jeu et nous évoquerons des pistes de recherche sur les liens entre les processus d'apprentissage et les effets observés.

1. Faut-il rendre saillant les traits structuraux des problèmes ?

Lorsqu'un exemple est fourni pour faire apprendre un nouveau concept, s'il est nécessaire que cet exemple soit en rapport avec le niveau de l'apprenant et en des termes compréhensibles pour lui, d'autres facteurs semblent également à prendre en compte. Ainsi, il semble que le même exemple puisse donner lieu à des apprentissages très différents selon que

l'on rende plus ou moins saillant les éléments structuraux qu'il contient. Dans une série de recherches, Catrambone (1994 ; 1995 ; 1996) contraste deux groupes de sujets qui étudient des exemples. L'un des groupes étudie des problèmes résolus dans lesquels certaines étapes du calcul sont mises en évidence par une étiquette ("label"); une étape importante est « étiquetée » en nommant explicitement ce qui est calculé. L'autre groupe étudie les mêmes exemples sans étiquette. La Figure 1 présente un exemple du type de modifications opérées par Catrambone.

Un juge note que quelques-uns des 219 avocats du palais de justice possèdent plus d'un attaché-case. Il compte le nombre d'attaché-case de chaque avocat et observe que 180 avocats ont un seul attaché-case, 17 en ont 2, 13 en ont 3 et 9 en ont 4. En utilisant la distribution de Poisson, déterminez la probabilité qu'un avocat choisi au hasard possède exactement 2 attachés-case.

Solution sans étiquette	Solution avec une étiquette ayant du sens	Solution avec une étiquette abstraite
$E(X) = \frac{180 + 2 \times 17 + 3 \times 13 + 4 \times 9}{219}$ $= \frac{289}{219} = 1.32 = \lambda$ <p>λ = nombre moyen d'attaché-case</p>	$E(X) = \frac{180 + 2 \times 17 + 3 \times 13 + 4 \times 9}{219}$ <p>= nombre total d'attaché - case</p> $= \frac{289}{219} = 1.32 = \lambda$ <p>λ = nombre moyen d'attaché-case</p>	$E(X) = \frac{180 + 2 \times 17 + 3 \times 13 + 4 \times 9}{219}$ $= \frac{\Omega}{219} = 1.32 = \lambda$ <p>λ = nombre moyen d'attaché-case</p>
$P(X=x) = \frac{\left[\binom{-1}{x} (\lambda)^x \right]}{x!}$	$P(X=x) = \frac{\left[\binom{-1}{x} (\lambda)^x \right]}{x!}$	$P(X=x) = \frac{\left[\binom{-1}{x} (\lambda)^x \right]}{x!}$
$P(X=2) = \frac{2.718^{-1.32} \times 1.32^2}{2!}$ $= \frac{0.27 \times 1.74}{2} = 0.235$	$P(X=2) = \frac{2.718^{-1.32} \times 1.32^2}{2!}$ $= \frac{0.27 \times 1.74}{2} = 0.235$	$P(X=2) = \frac{2.718^{-1.32} \times 1.32^2}{2!}$ $= \frac{0.27 \times 1.74}{2} = 0.235$

Figure 1. Problème résolu proposé par Catrambone (1996, 1998) dans trois versions différentes : sans étiquette, avec un étiquette informative (nombre d'attaché-case), et non informative (Ω)

Les résultats obtenus montrent qu'on peut améliorer considérablement l'apprentissage simplement en étiquetant une étape de calcul importante. De plus, de manière moins intuitive, Catrambone (1996 ; 1998) montre que le contenu de l'étiquette a souvent peu d'importance : les performances sont améliorées y compris si les étiquettes sont non informatives. Ce qui semble déterminant pour l'apprentissage est avant tout que l'étiquette utilisée rende saillante l'étape de résolution.

D'autres recherches montrent des effets de structuration. D'après Gick et McGarry (1992), il semble que l'apprentissage soit meilleur lorsque les éléments les plus importants des énoncés des problèmes à résoudre sont rendus peu saillants. Dans cette étude, les auteurs contrastent deux groupes de sujets qui tentent de résoudre un problème (problème source) avant d'étudier sa solution. Pour l'un des groupes, l'élément important pour la résolution est présenté explicitement dans le texte de l'énoncé du problème et dans le diagramme qui l'accompagne (version « facile » du problème), tandis que, pour l'autre groupe, cet élément n'est visible que sur le diagramme, ce qui le rend moins saillant (version « difficile » du problème). Si le groupe qui a la version facile réussit mieux le problème source que celui qui a la version difficile, Gick et McGarry montrent que le groupe ayant eu la version difficile a une meilleure capacité de transfert sur un nouveau problème isomorphe.

Au premier abord, ces résultats peuvent sembler assez contradictoires avec ceux mis en évidence par Catrambone. En effet, d'après ces deux études, l'apprentissage est amélioré si une étiquette augmente la saillance d'une étape de résolution importante, mais aussi si on « dissimule » dans l'énoncé les éléments clés qui sont ensuite importants dans la résolution. Comment concilier ces deux résultats au premier abord contradictoires ? Tout d'abord le « lieu » où se situe la modification opérée dans ces recherches diffère. Dans les recherches de Catrambone, c'est dans la résolution de l'exemple corrigé que les étapes importantes sont plus ou moins mises en avant. En revanche, dans la recherche de Gick et McGarry, l'élément structural important pour la résolution est présenté de manière plus ou moins saillante dans l'énoncé du problème, que les apprenants doivent résoudre par eux-mêmes avant d'étudier la solution. En outre, dans les deux cas de figure, il semble que le facteur important pour l'apprentissage soit que les manipulations opérées amènent l'apprenant à s'interroger sur le contenu du problème afin de mettre en œuvre un processus de généralisation. Ainsi, Catrambone (1995 ; 1996) montre ainsi que les étiquettes jouent un rôle important en ce que les apprenants s'interrogent sur leur rôle et leur positionnement et généralisent alors via la mise en œuvre de processus explicatifs. Didierjean et Nogry (2004) avancent une interprétation similaire pour expliquer les résultats obtenus par Gick et McGarry. Ils montrent dans leur recherche que si rendre peu saillant l'élément important d'un problème améliore le transfert, c'est avant tout parce que cette modification provoque la mise en œuvre de processus de généralisation. La modification opérée par Gick et McGarry attirerait l'attention des sujets sur l'élément important, incitant les sujets à mettre en œuvre des processus de généralisation.

Ainsi, rendre plus ou moins saillant les éléments structuraux semble un moyen d'agir sur l'apprentissage, mais il semble que l'élément important soit avant tout que les choix opérés amènent les apprenants à s'interroger sur leur rôle dans la solution.

2. Influence des similitudes entre problèmes présentés successivement

Si la manière dont est structuré un exemple joue un rôle important, la plupart des apprentissages s'effectuent par l'analyse non pas d'une unique situation mais de multiples exemples. Dès lors, une question importante concerne la similarité/dissimilarité entre les situations rencontrées. Cette question comprend en fait deux aspects : tout d'abord la similarité/dissimilarité entre les différents exemples corrigés à étudier. Progresses-t-on davantage si les corrigés étudiés sont contrastés ou au contraire s'ils sont homogènes ? Un deuxième aspect concerne la similarité entre les exemples corrigés que l'apprenant étudie et les problèmes qui sont donnés à résoudre ensuite. Est-il préférable de contraster exemples et problèmes ou au contraire est-il préférable que ceux-ci se ressemblent fortement ?

Rôle de la similarité/dissimilarité des corrigés étudiés

Lorsque l'on souhaite faire acquérir des concepts théoriques, deux formes de similarité/dissimilarité des corrigés fournis peuvent être manipulés. La première forme concerne la similarité/dissimilarité de l'habillage des corrigés. Par exemple, pour illustrer le concept d'accélération en physique, on peut ne présenter que des exemples qui mettent en jeu un mobile qui se déplace sur un plan incliné, ou l'on peut choisir de présenter des exemples ayant la même structure mais qui mettent en jeu le déplacement d'un train pour l'un, d'un skieur pour l'autre... La deuxième forme de similarité/dissimilarité concerne la structure des exemples présentés à la suite. Est-il préférable de ne présenter à la suite que des exemples qui illustrent un même principe théorique ou faut-il alterner les principes théoriques illustrés ?

Similarité/dissimilarité des traits de surface

Lorsque plusieurs exemples isomorphes en terme de structure sont présentés, un certain nombre de résultats semblent montrer que plus l'habillage des exemples est contrasté, plus les performances observées ensuite sur de nouveaux problèmes sont élevées. Gick et Holyoak (1983) montrent ainsi que lorsque deux problèmes isomorphes et leurs solutions

sont présentées à des sujets, ils réussissent mieux ensuite à résoudre un nouveau problème si les deux exemples étudiés se ressemblent peu de par leur habillage. Dans le même sens, Quillici et Mayer (1996) donnent à étudier à des sujets neuf exemples de problèmes de statistiques répartis en trois blocs de problèmes correspondant à trois tests statistiques différents. Les auteurs font varier l'hétérogénéité des traits de surface à l'intérieur d'un bloc. Selon les sujets et les blocs, les trois problèmes consécutifs dans un bloc illustrent un même test et utilisent des traits de surface similaires ou, au contraire, illustrent un même test mais utilisent des exemples ayant des traits de surface dissimilaires. Après avoir étudié le matériel, les participants doivent réaliser une tâche de catégorisation de problèmes et résoudre des problèmes de transfert. Les résultats montrent que lorsque les traits de surface étaient hétérogènes, les sujets catégorisent plus facilement sur la base des traits de structure et ont des performances supérieures sur les problèmes mesurant le transfert. Dès lors que les apprenants étudient à la suite plusieurs corrigés isomorphes, il semble donc préférable que ceux-ci soient dissimilaires de par leur habillage. Pourquoi diversifier les traits de surface conduit-il à davantage de généralisation ? Dans leur recherche, Gick et Holyoak (1983) suggèrent que l'aspect positif de l'hétérogénéité des traits de surface tient à la mise en œuvre de processus de détection de similitudes (voir aussi, Bassok et Holyoak, 1989 ; Bassok, 1990 ; Cummins, 1992). Les sujets compareraient les situations pour construire une connaissance sur leur structure commune. Cette tâche est d'autant plus facile que les situations ne partagent que cette structure, et non également de nombreux traits de surface. Dans le sens de cette hypothèse, Renkl, Stark, Gruber et Mandl (1998) montrent que l'effet de l'hétérogénéité des traits de surface des problèmes diminue si les sujets sont incités à développer des activités intra-corrigés (répondre à des questions sur le contenu de chacun des exemples) plutôt qu'inter-corrigés (répondre à des questions sur ce que partagent les exemples). Les sujets qui étudient des exemples corrigés tirent surtout profit de l'hétérogénéité de leurs traits de surface s'ils tentent de les comparer.

Similarité/dissimilarité des traits de structure

Si la dissimilarité des exemples isomorphes est source de progrès, il peut également être profitable de présenter ensemble des problèmes corrigés non isomorphes (Gick et Paterson, 1992 ; Paas et Van Merriënboer, 1994 ; Quillici et Mayer, 2002 ; Chen et Mo, 2004). Gick et Paterson (1992) montrent que la présentation de deux exemples isomorphes et d'un troisième exemple qui diffère par un seul trait de structure favorise davantage l'apprentissage des principes en jeu que la présentation de trois

problèmes isomorphes. Selon ces auteurs, contraster la structure des problèmes (sur un seul trait de structure) permet à l'apprenant de mettre en évidence les convergences pertinentes dans les exemples isomorphes.

Dès lors que l'on souhaite présenter à la fois des problèmes isomorphes et non isomorphes, on peut de plus se demander quel ordre de présentation est plus favorable à l'apprentissage. De Croock, Van Merriënboer et Paas (1998) manipulent l'ordre de présentation des exemples en présentant d'une part tous les problèmes ayant une même structure ensemble (AAABBBCCC : interférences faibles) et d'autre part en mélangeant les problèmes de différents types (ABCABCABC : interférences importantes). Leurs résultats montrent que présenter les problèmes en situation d'interférence importante est la situation qui favorise le plus l'apprentissage. Deux explications non exclusives peuvent sans doute être avancées pour expliquer un tel effet. Selon la première, la présentation de problèmes mélangés facilite la comparaison entre ces problèmes, ou tout au moins multiplie les occasions de comparaison.

Selon une deuxième explication, on peut remarquer que cet effet ressemble à l'effet d'espacement sur lequel ont porté de nombreuses recherches dans le domaine de la mémoire (Melton, 1970 ; Hintzman, 1974, 1976 ; Crowder, 1976 ; Glenberg, 1979 ; Smith et Rothkopf, 1984 ; Rea et Modigliani, 1985 ; Bahrck et Phelps, 1987 ; Dempster, 1989 ; voir Perruchet, 1987 pour une revue de question). Ces travaux montrent que des items identiques présentés successivement sont moins bien rappelés que des items espacés dans une liste. Une interprétation proposée pour expliquer cet effet est que l'augmentation de l'espacement facilite la mémorisation parce que l'item est vu dans des contextes plus variés qui fournissent autant d'indices de récupération par la suite. Même si le matériel utilisé dans cette étude (des problèmes) est plus complexe que celui utilisé habituellement pour étudier cet effet (une liste de mots), il ne peut être exclu que l'effet observé par De Croock et al. (1998) tienne pour une part à un effet d'espacement.

Rôle de la similarité/dissimilarité des exemples utilisés et des problèmes donnés à la suite

Dans les travaux que nous avons présentés, le facteur manipulé concerne la similarité/dissimilarité des problèmes résolus donnés aux apprenants. Dans ces travaux, après l'étude des exemples, l'apprentissage est testé en donnant aux sujets de nouveaux problèmes à résoudre, la plupart du temps éloignés de par leur habillage des exemples étudiés. Cependant, en situation « naturelle », l'apprentissage ne se limite pas en règle générale à une unique phase d'analyse d'exemples. C'est l'alternance d'analyse

d'exemples et de tentative dans la résolution de nouveaux problèmes qui est source d'apprentissage. Aussi, la question des problèmes donnés à résoudre après l'analyse d'exemples revêt un caractère tout aussi important que les exemples eux-mêmes. Faut-il donner des problèmes qui ressemblent aux exemples ou au contraire est-il préférable de contraster les deux ? Les recherches qui ont étudié cette question montrent qu'il semble préférable de donner, dans un premier temps de l'apprentissage, des problèmes ayant un habillage proche des exemples étudiés. En effet, les sujets qui ne maîtrisent pas parfaitement des concepts réussissent mieux les problèmes donnés lorsque leur habillage est proche (Ross, 1984 ; 1987 ; 1989 ; Novick et Holyoak, 1991), et la réussite de problèmes « proches » donnés à la suite des exemples est une source importante d'apprentissage (Ross et Kennedy, 1990). Ainsi Ross et Kennedy (1990) présentent aux sujets des problèmes résolus (dans lesquels il est par exemple question de mécaniciens et de voitures) correspondant à différents principes de probabilités ; puis demandent aux sujets de résoudre des problèmes qui sont soit proches des exemples de par leur habillage (il y est par exemple question de mécaniciens et de voitures) soit plus éloignés de par leur habillage (il y est par exemple question de chevaliers et de chevaux). Ensuite, les auteurs proposent un second post-test consistant à résoudre de nouveaux problèmes afin de tester si les sujets ont élaboré une représentation abstraite des principes théoriques présents dans les exemples et les problèmes. Les résultats du second post-test montrent que des sujets qui rencontrent des problèmes proches des exemples élaborent ensuite des connaissances moins attachées à un contexte que des sujets qui ont rencontré des problèmes éloignés. C'est sur la base de ce résultat que Ross et Kennedy (1990) argumentent en faveur d'une généralisation basée sur l'adaptation analogique. En effet, si la généralisation produite par des processus de comparaison est supérieure lorsque les exemples sont contrastés de par leur habillage, ici le résultat inverse est observé : la généralisation est plus forte quand les traits de surface sont proches. Dans le même sens, Didierjean (2003) montre qu'une généralisation peut être consécutive à l'adaptation analogique lorsque des problèmes proches sont présentés. Néanmoins, celle-ci survient uniquement si les sujets tentent délibérément de construire une connaissance générale. Ainsi, si deux problèmes résolus sont fournis et que les sujets les comparent, il semble préférable que leurs traits de surface soient éloignés. En revanche, si les apprenants tentent d'adapter un premier problème résolu pour résoudre un second problème, il semble préférable que leurs traits de surface soient proches.

CONCLUSION

La revue de la littérature que nous avons proposée met en évidence certains « effets » en matière d'apprentissage. Certaines activités face aux problèmes et certains modes de présentation semblent plus favorables que d'autres.

Ainsi, si la résolution de problème favorise l'apprentissage chez des apprenants ayant déjà des connaissances préalables, l'analyse de problèmes résolus est plus favorable à l'apprentissage chez des apprenants plus novices (Cooper et Sweller, 1987 ; Ward et Sweller, 1990 ; Paas et Van Mèrrienboer, 1994). Lors de l'analyse de ces exemples, l'activité d'auto-explication est associée à des effets positifs sur l'apprentissage (Chi et al., 1989 ; Renkl, 1997) et peut être induite par des entraînements appropriés (voir par exemple Bielaczyc, Pirolli et Brown, 1995 ; Neuman et Schwarz, 1998). Par ailleurs, la structuration du matériel (Gick et McGarry, 1992 ; Catrambone, 1995 ; 1996 ; 1998) tout comme l'habillage des problèmes présentés successivement peuvent influencer considérablement l'apprentissage.

Si ces travaux présentent un grand intérêt d'un point de vu appliqué, ils avancent parfois des résultats qui semblent contradictoires. Une première limite vient du fait que ces recherches manquent de cadre théorique unificateur : elles sont conduites dans des cadres théoriques différents ou mal définis, ce qui peut rendre difficile la comparaison des résultats issus de ces différentes études. De plus, une seconde limite peut être soulevée : ces études ne font que rarement référence aux mécanismes cognitifs responsables des effets observés.

Partant de ce constat, nous avons proposé des hypothèses visant à mettre en relation ces résultats, les processus d'apprentissage dont disposent les apprenants et leurs conditions de déclenchement.

Par exemple, la mise en œuvre de processus de détection de similitudes semble être affectée par la similarité des exemples présentés. Si les exemples sont isomorphes, des traits de surfaces différents sont plus favorables à la mise en œuvre d'un processus de détection de similitudes (Gick et Holyoak, 1983 ; Bassok et Holyoak, 1989 ; Bassok, 1990 ; Cummins, 1992). À l'inverse, si les exemples ne sont pas tous isomorphes, des traits de surface proches favorisent la détection des similitudes structurales (Quillici et Mayer, 2002). Les processus explicatifs semblent être mis en œuvre lorsque les apprenants s'auto-explicitent les exemples et semblent également pouvoir être induits par des variations de la saillance des éléments clés pour la résolution (Catrambone, 1995 ; 1996 ; 1998 ; Didierjean et Nogry, 2004).

Si, sur la base des études existantes, des hypothèses peuvent être proposées, des recherches sur le lien entre facteurs qui favorisent l'apprentissage et processus mis en oeuvre restent à développer, notamment sur les trois axes suivants :

(1) Quels sont les facteurs qui déterminent qu'un processus d'apprentissage donné va être mis en oeuvre ou non ? Comme nous l'avons montré dans cet article, si tous les apprenants disposent de mécanismes d'apprentissage, ceux-ci ne sont pas nécessairement mis en oeuvre face à un exemple. Il semble que deux catégories de facteurs puissent être identifiées. Distinguons tout d'abord ceux liés aux contraintes du système cognitif de l'apprenant (par exemple la capacité de traitement limitée de la mémoire de travail) en interaction avec la présentation du matériel ; Certains processus d'apprentissage peuvent être trop « coûteux » cognitivement pour pouvoir être utilisés dans certaines situations. Sweller (1988 ; 1994 ; 1999) montre ainsi que certaines présentations du matériel sont plus favorables que d'autres en ce qu'elles allègent la mémoire de travail des apprenants et laisse ainsi les ressources cognitives nécessaires à la mise en oeuvre de processus de généralisation. Ensuite, la deuxième catégorie de facteurs intervenant dans la mise en oeuvre d'un processus d'apprentissage semble davantage d'ordre métacognitif. Certains choix quant à la présentation du matériel ou quant aux consignes données pourraient conduire davantage les apprenants à mettre en oeuvre délibérément les processus d'apprentissage dont ils disposent.

(2) Comme nous l'avons souligné, les apprenants disposent d'une pluralité de mécanismes d'apprentissage. Dès lors, une question qui reste à étudier concerne leurs interactions. Si pour des raisons de simplification, les travaux sur les processus d'apprentissage se sont la plupart du temps centrés sur un seul processus à la fois, il est probable que les apprenants en utilisent plusieurs, tour à tour ou simultanément. Par exemple, détecter des similitudes n'empêche pas d'essayer de poser des liens causaux. Il reste à développer des recherches visant à mieux comprendre comment « coexistent » les processus d'apprentissage. Les travaux visant à observer en situation « naturelle » comment les sujets apprennent, tels que ceux développés dans les recherches sur les auto-explications, offrent sans doute dans un premier temps un bon moyen d'étudier ces questions.

(3) La question de l'optimisation de l'apprentissage ne peut écarter celle de l'étude des différences individuelles. Certains travaux ont pu mettre en évidence l'existence de différences individuelles dans le recours aux différents processus d'apprentissage, il semble indispensable d'avancer dans cette voie. Ces différences sont-elles le fruit de contraintes cognitives (par exemple un processus pourrait nécessiter plus de ressources cognitives

que d'autres) ? Sont-elles le reflet de véritables « styles » cognitifs ? Dans tous les cas mieux comprendre les sources des différences, leur caractère stable ou non, est une des clés d'une bonne compréhension des phénomènes d'apprentissage à partir d'exemples.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahn, W., Brewer, W.F., & Mooney, R.J. (1992). Schema acquisition from a single example. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 18, 391-412.
- Aleven, V., & Koedinger, K.R. (2002). An Effective Meta-cognitive Strategy: Learning by Doing and Explaining with a Computer-Based Cognitive Tutor. *Cognitive Science*, 26 (2), 147-179.
- Atkinson, R.K., Renkl, A., & Merrill, M.M. (2003). Transitioning from studying examples to solving problems: Combining fading with prompting fosters learning. *Journal of Educational Psychology*, 95, 774-783.
- Bahrack, H.P., & Phelps, E. (1987). Retention of Spanish vocabulary over 8 years. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13, 344-349.
- Bain, W. (1986). *Cased-base reasoning: A comuter model of subjective assessment*. PhD Thesis. Yale University.
- Bassok, M. (1990). Transfert of domain-specific problem-solving procedures. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16, 522-533.
- Bassok, M., & Holyoak, K.J. (1989). Inter-domain transfer between isomorphic topics in algebra and physics. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, 15, 153-166.
- Bielaczyc, K., Pirolli, P., & Brown, A. L. (1995). Training in self explanation and self-regulation strategies: investigating the effect of knowledge acquisition activities on problem solving. *Journal of Educational Psychology*, 86, 122-133.
- Blessing, S. B., & Ross, B. H. (1996). Content Effects in Problem Categorization and Problem Solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22, 792-810.
- Brown, A. L., & Kane, M. J. (1988). Preschool children can learn to transfer: Learning to learn and learning from example. *Cognitive Psychology*, 20, 493-523.
- Carrol, W. (1994). Using worked examples as an instructional support in the algebra classroom. *Journal of Educational Psychology*, 86, 360-367.
- Catrambone, R. (1994). Improving examples to improve transfer to novel problem, *Memory & Cognition*, 22, 606-615.
- Catrambone, R. (1995). Aiding subgoal learning: Effect on transfers. *Journal of Educational Psychology*, 87, 5-17.
- Catrambone, R. (1996). Generalizing solution procedures learned from examples. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22, 1020-1031.
- Catrambone, R. (1998). The subgoal learning model and problem-solving transfer: Creating better examples so that students can solve novel problems. *Journal of Experimental Psychology: General*, 127, 355-376.
- Cauzinille-Marmèche, E., & Didierjean A. (1999). Raisonement par analogie et généralisation des connaissances. In G. Netchine-Grynberg (Ed.), *Développe-*

- ment et fonctionnement cognitif: vers une intégration, Paris, Presses Universitaires de France.
- Chen, Z., & Mo, L. (2004). Schema induction in problem solving: A multidimensional analysis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 30, 583-600.
- Chi, M.T.H., Bassok, M., Lewis, R., Reimann, P., & Glaser, R. (1989). Self-explanations: How students study and use examples in learning to solve problems. *Cognitive Science*, 13, 145-182.
- Chi, M. T.H., De Leeuw, N., Chiu, M.H., & La Vancher, C. (1994). Eliciting Self-Explanations Improves Understanding. *Cognitive Science*, 18, 439-477.
- Conati, C., & VanLehn, K. (1999). Teaching meta-cognitive skills: implementation and evaluation of a tutoring system to guide self-explanation while learning from examples. In *Proceedings of AIED '99, 9th World Conference of Artificial Intelligence and Education*, Le Mans, France.
- Cooper, G., & Sweller, J. (1987). The effects of schema acquisition and rule automation on mathematical problem-solving transfer. *Journal of Educational Psychology*, 79, 347-362.
- Crowder, R.G. (1976). *Principles of learning and memory*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Cummins D. (1992). Role of analogical reasoning in the induction of problem categories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 5, 1103-1124.
- De Croock, M.B.M., van Merriënboer, J.J.G., & Paas, F.G.W.C. (1998). High vs. low contextual interference in simulation-based training of troubleshooting skills: Effects on transfer performance and invested mental effort. *Computers in Human Behaviour*, 14, 249-267.
- De Graef, P., Christaens, D., & D'Ydewalle, G. (1990). Perceptual effects of scene context on object identification. *Psychological Research*, 52, 317-329.
- Dempster, F.N. (1989). Spacing effects and their implications for theory and practice. *Educational Psychology Review*, 1, 309-330.
- Didierjean, A. (2001). Apprendre à partir d'exemples: Abstraction de règles et/ou mémoire d'exemplaires? *L'Année Psychologique*, 101, 325-348.
- Didierjean, A. (2003). Is case-based reasoning a source of knowledge generalization? *European Journal of Cognitive Psychology*, 15, 435-453.
- Didierjean, A., & Cauzinille-Marmèche, E. (1998). Reasoning by analogy: Is it schema mediated or case-based? *European Journal of Educational Psychology*, 13, 385-398.
- Didierjean, A., Cauzinille-Marmèche, E., & Savina, Y. (1999). Learning from examples: Case-based reasoning in chess for novices. *Current Psychology of Cognition*, 18, 337-361.
- Didierjean, A., & Nogry, S. (2004). Reducing structural-element salience on a source problem produces later success in analogical transfer: What role does source difficulty play? *Memory & Cognition*, 32 (7), 1053-1064.
- Elio, R., & Anderson, J.R. (1983). Effects of category generalization and instance similarity on schema abstraction, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 113, 541-555.
- Gentner, D. (1989). The mechanisms of analogical learning. In S. Vosniadou & A. Ortony (Ed.), *Similarity and analogical reasoning*. New York, Cambridge University Press.
- Gick, M.L., & Holyoak, K.J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, 15, 1-38.
- Gick, M.L., & McGarry, S.J. (1992). Learning from mistakes: Inducing analogous solution failures to a source problem produces later successes in analogical transfer. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18, 623-639.
- Gick, L., & Patterson, K. (1992). Do contrasting examples facilitate schema induction

- and analogical transfer? *Canadian Journal of Psychology*, 46, 539-550.
- Glenberg, A.M. (1979). Component-levels theory of the effects of spacing and repetitions on recall and recognition. *Memory & Cognition*, 7, 95-112.
- Hammond, K.J. (1990). Explaining and repairing plans that fail. *Artificial Intelligence*, 45, 173-228.
- Hintzman, D.L. (1974). Theoretical implications of the spacing effect. In R. L. Solso (Edit.), *Theories in cognitive psychology: The Loyola Symposium* (pp. 77-99). Potomac, MD: Erlbaum.
- Hintzman, D.L. (1976). Repetition and memory. In G. H. Bower (Edit.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 10) *Advances in theory and research* (pp. 47-91). New York: Academic Press.
- Holyoak, K.J., & Thagard, P. (1989). Analogical mapping by constraint satisfaction. *Cognitive Science*, 13, 295-355.
- Hudson, J. (1988). Children's memory for atypical actions in script-based stories: Evidence for a disruption effect. *Journal of Experimental child psychology*, 46, 159-173.
- Hudson, J., Fivush, R., & Kuebly, J. (1992). Scripts and episodes: The development of event memory. *Applied Cognitive Psychology*, 6, 483-505.
- Jonshon, H.M., & Seifert, C.M. (1992). The Role of Predictive Features in Retrieving Analogical Cases. *Journal of Memory and Language*, 31, 648-667.
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P., & Sweller, J. (2003). The expertise reversal effect. *Educational Psychologist*, 38 (1), 23-31.
- Kalyuga, S., Chandler, P., Tuovinen, J., & Sweller, J. (2001). When problem solving is superior to studying worked examples. *Journal of Educational Psychology*, 93, 579-588.
- Kieras, D.E., & Bovair, S. (1986). The Acquisition of Procedures from Text: A Production System Analysis of Transfer of Training. *Journal of Memory and Language*, 25, 507-375.
- Kolodner, J. (1993). *Case-Based Reasoning*. San Mateo: Morgan Kaufman Publishers.
- Kolodner, J. (1997). Educational implications of analogy: A view from case-Based Reasoning. *American Psychologist*, 52, 35-44.
- McNamara, D.S. (2004). SERT: Self-Explanation Reading Training. *Discourse Processes*, 38(1), 1-30.
- Melton, A. W. (1970). The situation with respect to the spacing of repetitions and memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 9, 596-606.
- Neuman, Y., & Schwarz, B.B. (1998). Is self-explanation while solving problems helpful? The case of analogical problem solving. *British Journal of Educational Psychology*, 68, 15-24.
- Novick, L.R., & Holyoak, K.J. (1991). Mathematical problem solving by analogy. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17, 398-415.
- Paas, F. (1992). Training strategies for attaining transfer of problem solving skill in statistics: a cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 84, 429-434.
- Paas, F., & Van Mèrrienboer, J. (1994). Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills: A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 86, 122-133.
- Patalano, A.L., & Seifert, C.M. (1994). Memory for impasses during problem solving. *Memory & Cognition*, 22, 234-242.
- Perruchet, P. (1987). Pourquoi apprend-on mieux quand les répétitions sont espacées? Une évaluation des réponses contemporaines. *L'Année Psychologique*, 87, 253-272.
- Pirolli, P., & Recker, M. (1994). Learning strategies and transfer in the domain of programming. *Cognition and Instruction*, 12, 235-275.
- Quilici, J.L., & Mayer, R.E. (1996). Role of examples in how students learn to categorize statistics word problems. *Journal of Educational Psychology*, 88, 144-161.

- Quilici, J.L., & Mayer, R.E. (2002). Teaching students to recognize structural similarities between statistics word problems. *Applied Cognitive Psychology*, 16, 325-342.
- Rea, C.P., & Modigliani, V. (1985). The effect of expanded versus massed practice on the retention of multiplication facts and spelling lists. *Human Learning*, 4, 11-18.
- Reed, S.K. (1987). A structure-mapping model for word problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13, 124-139.
- Reed, S.K. (1989). Constraints on the abstraction of solutions. *Journal of Experimental Psychology, Learning, Memory, and Cognition*, 81, 532-540.
- Reed, S.K., & Bolstad, C.A. (1991). Use of examples and procedures in problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17, 753-766.
- Reeves, L.M., & Weisberg, R.W. (1994). The role of content and abstract information in analogical transfer. *Psychological Bulletin*, 115, 381-400.
- Renkl, A. (1997). Learning from worked-out examples: A study on individual differences. *Cognitive Science*, 21, 1-29.
- Renkl, A. (2002). Worked-out examples: instructional explanations support learning by self-explanations. *Learning and Instruction*, 12, 529-556.
- Renkl A., & Atkinson, R.K. (2003). Structuring the transition from examples to problem solving in cognitive skill acquisition: a cognitive load perspective. *Educational Psychologist*, 38 (1), 15-22.
- Renkl, A., Atkinson, R.K., & Große C.S. (2004). How fading worked-out solution steps works - A cognitive load perspective. *Instructional Science*, 32, 59-82.
- Renkl, A., Atkinson, R. K., Maier, U. H., & Staley, R. (2002). From example study to problem solving: Smooth transitions help learning. *The Journal of Experimental Education*, 70, 293-316.
- Renkl, A., Stark, R., Gruber, H., & Mandl, H. (1998). Learning from worked-out examples: The effects of example variability and elicited self-explanations. *Contemporary Educational Psychology*, 23, 90-108.
- Riesbeck, C., & Schank, R.C. (1989). *Inside Case-Based Reasoning*. Lawrence Erlbaum.
- Ripoll, T., & Coulon, D. (2001). Le raisonnement par analogie : une analyse critique des modèles de l'appariement. *L'Année Psychologique*, 101, 289-323.
- Ripoll, T. (2003). Les modèles du raisonnement par analogie. In C. Tijus (Ed.), *Métaphore et Analogie* (pp. 231-266). Paris: Edition Hermès.
- Ross, B.H. (1984). Reminders and their effects in learning a cognitive skill. *Cognitive Psychology*, 16, 371-416.
- Ross, B.H. (1987). This is like that: The use of earlier problems and the separation of similarity effects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13, 629-639.
- Ross, B.H. (1989). Distinguishing types of superficial similarities: Different effects on the access and use of earlier problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15, 456-468.
- Ross, B.H., & Kennedy, P.T. (1990). Generalizing from the use of earlier examples in problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16, 42-55.
- Schank, R. C. (1982). *Dynamic memory, a theory of reminding and learning in computers and people*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schank, R.C. (1999). *Dynamic Memory Revisited*. Cambridge University Press : Cambridge.
- Smith, S.M., & Rothkopf, E.Z. (1984). Contextual enrichment and distribution of practice in the classroom. *Cognition and Instruction*, 1, 341-358.
- Stark, R. (1999). Lernen mit Lösungsbeispielen. Der Einfluß unvollständiger Lösungsschritte auf Beispielelaboration. Motivation und Lernerfolg [Learning by worked-out examples. The impact of

- incomplete solution steps on example elaboration, motivation and learning outcomes]. Bern, CH: Huber.
- Stark, R., Mandl, H., Gruber, H., & Renkl, A. (2002). Conditions and effects of example elaboration. *Learning and Instruction, 12*, 39–60.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science, 12*, 257-285.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction, 4*, 295-312.
- Sweller, J. (1999). *Instructional Design in Technical Areas*. Melbourne: ACER.
- Tricot, A. (1998). Charge cognitive et apprentissage. Une présentation des travaux de John Sweller. *Revue de Psychologie de l'Éducation, 3*, 37-64.
- VanLehn, K. (1998). Analogy events: How examples are used during problem solving. *Cognitive Science, 22*, 347-388.
- Van Merriënboer, J.J.G., & Krammer, H.P.M. (1987). Instructional strategies and tactics for the design of introductory computer programming courses in high school. *Instructional Science, 16*, 251–285.
- Ward, M., & Sweller, J. (1990). Structuring effective worked examples. *Cognition and Instruction, 7*, 1-39.
- Wong, R.M.F., Lawson, M.J., & Keeves, J. (2002). The effects of self-explanation training on students' problem solving in high-school mathematics. *Learning and Instruction, 12* (2), 233-262.
- Zhu, X., & Simon, H.A. (1987). Learning mathematics from examples and by doing. *Cognition and Instruction, 4*, 137-166.