



HAL
open science

La cécité aux connaissances spécifiques

André Tricot, John Sweller

► **To cite this version:**

André Tricot, John Sweller. La cécité aux connaissances spécifiques. *Éducation & Didactique*, 2016, 10 (1), pp.9-26. 10.4000/educationdidactique.2428 . hal-01404943

HAL Id: hal-01404943

<https://hal.science/hal-01404943>

Submitted on 29 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La cécité aux connaissances spécifiques¹

André Tricot et John Sweller

Résumé

Les psychologues de l'éducation ont eu tendance, depuis la fin du 19^{ème} siècle, à négliger les connaissances spécifiques. Pourtant, ces dernières constituent un très bon candidat à l'explication de nos performances cognitives. Elles présentent aussi l'avantage d'intéresser certains didacticiens et de constituer un objet sur lequel psychologie et didactique pourraient parler de la même chose. Dans cet article, nous proposons d'examiner la longue histoire de la cécité de notre discipline, la psychologie cognitive de l'éducation, aux connaissances spécifiques. Nous montrons l'intérêt de cette notion, d'une part pour comprendre et élaborer des théories des situations d'apprentissage scolaire, et d'autre part, pour servir de base à l'ingénierie pédagogique (ou didactique). En conclusion, nous essayons d'expliquer pourquoi les connaissances spécifiques ont été négligées par la recherche en psychologie cognitive de l'éducation.

Mots clés : apprentissages scolaires, connaissances spécifiques, psychologie de l'éducation, performances cognitives

Blindness to the role of domain specific knowledge in skill formation

Abstract

Educational psychologists have tended since the late 19th century to neglect domain specific knowledge. Yet domain specific knowledge can provide a clear explanation of a very large range of human cognitive performance. It also can afford a common point of reference between psychologists and educationalists. In this article, we examine the long history of the neglect, indeed blindness, of our discipline, cognition and instruction, to domain specific knowledge. We show the critical importance of this notion, first in understanding and developing theories of academic learning, and secondly, in providing a basis for instructional design. In conclusion, we attempt to explain why domain specific knowledge has been neglected by the field of cognition and instruction, since the late 19th century.

Key words: school learning, domain specific knowledge, educational psychology, cognitive performance

Introduction

Une des difficultés de communication entre les spécialistes des apprentissages et ceux de l'enseignement réside dans le fait qu'ils ne s'intéressent pas souvent aux mêmes connaissances. Les psychologues de l'apprentissage ou de l'éducation travaillant dans une perspective cognitive se sont surtout intéressés aux connaissances générales et/ou non scolaires. Les spécialistes de l'enseignement se sont surtout intéressés aux savoirs institués et aux connaissances scolaires. Le concept de connaissance spécifique, *i.e.* une connaissance définie par sa nécessité à la réalisation d'une tâche, pourrait résoudre en partie ces difficultés. Il peut permettre de décrire, d'une même manière, ce qui est enseigné et ce qui est appris dans une situation d'enseignement - apprentissage. Ce concept pourrait donc contribuer à rendre possible l'étude interdisciplinaire des relations entre apprendre et faire apprendre, en se

¹ Cet article reprend plusieurs arguments publiés dans : Tricot, A. & Sweller, J. (2014). Domain-specific knowledge and why teaching generic skills does not work. *Educational Psychology Review*, 26, 265–283. Il va paraître dans *Education & Didactiques*.

portant candidat au statut d'objet commun, permettant de décrire à la fois ce qui est appris à l'école et ce qui y est enseigné : des connaissances spécifiques.

Dans cet article, nous essayons de montrer comment la psychologie cognitive de l'éducation et de l'apprentissage a longtemps négligé les connaissances spécifiques. Cette négligence n'a pas seulement gêné les relations avec les études consacrées à l'enseignement, elle a conduit la psychologie cognitive de l'éducation à sous-estimer le facteur le plus important dans l'explication des performances cognitives humaines. En d'autres termes, cet article propose d'examiner un paradoxe : alors que l'étude psychologique des performances cognitives a été un objet de recherches depuis plus de 130 ans, et que les connaissances spécifiques en mémoire à long terme constituent sans doute le facteur le plus déterminant des performances cognitives acquises, les connaissances spécifiques sont très peu étudiées en psychologie cognitive (mais voir Ericsson & Charness, 1994 ; Ericsson & Kintsch, 1995), en neurosciences (mais voir Dehaene, Dehaene-Lambertz & Cohen, 1998 ; Caramazza & Shelton, 1998 ; Maguire, Firth & Morris, 1999) et même en psychologie de l'éducation.

Nous définissons une connaissance spécifique comme celle qui peut amener à des actions permettant l'accomplissement de tâches spécifiées sur des périodes de temps non-spécifiées. Par exemple, de nombreux problèmes différents peuvent être résolus en utilisant le théorème de Pythagore, mais ne peuvent pas être résolus si ce théorème n'est pas connu. Nous définissons cet ensemble de problèmes comme un « domaine » et le théorème de Pythagore est un constituant des connaissances spécifiques à ce domaine, requises pour résoudre cet ensemble de problème. Par contraste, les connaissances générales peuvent être, par définition, utilisées pour résoudre n'importe quel problème, dans n'importe quel domaine. Par exemple, apprendre à résoudre des problèmes en pensant à des problèmes similaires dont on connaît la solution est une connaissance générale qui peut être appliquée à n'importe quel problème.

Les connaissances spécifiques et la résolution de problèmes sont étroitement liées et cette relation est centrale dans notre argumentation. Quand un individu doit effectuer une tâche, il y a potentiellement un continuum de connaissances disponibles, allant des connaissances spécifiques complètes permettant à cet individu d'effectuer facilement la tâche, jusqu'à des connaissances limitées, voire aucune connaissance disponible pour réaliser la tâche. Entre ces deux extrémités il y a les situations où les connaissances sont incomplètes : la personne est alors confrontée à un problème à résoudre. Quand les connaissances se complètent, elles deviennent plus spécifiques aux tâches particulières auxquelles elles peuvent être appliquées et plus efficaces pour conduire à une solution (Ericsson, 1996), réduisant le besoin de résoudre des problèmes. Les écoles ont pour principale fonction de permettre aux élèves d'apprendre des connaissances et donc de réduire leur besoin de se reposer sur la résolution de problèmes. L'école transmet aux élèves des connaissances pour de futures tâches dans de futurs environnements.

Quand les connaissances sont incomplètes, il y a trois manières principales de traiter le problème : (a) essayer de le résoudre procédant par essais et erreurs (par tâtonnement) (b) chercher des informations, par exemple dans un document ; (c) chercher de l'aide auprès d'une personne ayant les connaissances spécifiques pertinentes ou qui participera à la résolution du problème. Il y a probablement de nombreux points communs entre (b) et (c), bien qu'ils constituent deux différents domaines de recherche distincts (Puustinen & Rouet, 2009). Les conséquences pédagogiques des connaissances incomplètes constituent aussi un aspect central de notre propos.

Nous suggérerons que les connaissances spécifiques constituent le meilleur prédicteur de la performance dans la réalisation d'une tâche. Mais nous suggérons aussi, qu'historiquement, la majorité des recherches a été consacrée à prédire les performances dans des conditions où les connaissances spécifiques ne sont pas un facteur déterminant. Durant la première moitié du 20^{ème} siècle, cette tentative de prédire les performances en l'absence de

connaissances spécifiques était appelée test d'intelligence. Dans la seconde moitié, elle avait tendance à être appelée habileté à résoudre des problèmes, suggérant que cela pourrait être appris sous forme de stratégies (cognitives ou métacognitives) générales de résolution de problèmes. Nous tentons de montrer dans cet article que cette tentative d'exclure les connaissances spécifiques a conduit à une impasse.

L'incapacité de la psychologie cognitive de l'éducation à mettre l'accent sur les connaissances spécifiques est surprenante, puisque un des buts principaux de cette discipline est de comprendre l'acquisition de connaissances à l'école. Ces connaissances, comme on peut le voir dans la plupart des manuels scolaires, sont spécifiques. Le but de cet article est de tenter de montrer dans quelle mesure la psychologie cognitive de l'éducation a été aveugle à l'influence de la mémoire à long terme et des connaissances spécifiques sur les processus cognitifs et sur l'ingénierie pédagogique. Nous essaierons aussi de proposer quelques hypothèses susceptibles d'expliquer cette cécité.

Quelques preuves du peu d'intérêt pour les connaissances spécifiques dans l'étude des performances cognitives

Parmi les centaines de méta-analyses à propos des performances cognitives (trouvées sur Web of Science en Février 2016), pour autant que nous puissions l'établir, il n'y en a qu'une qui se centre sur les effets de connaissances antérieures (principalement spécifiques) sur les performances et l'apprentissage, celle de Dochy, Seghers et Buehl (1999). Ces auteurs mettent en exergue un effet important des connaissances antérieures sur les performances, avec plus de 90% des études examinées signalant des effets positifs. Malheureusement, en comparaison avec plusieurs dizaines d'autres méta-analyses sur les performances cognitives, cet article est bien moins cité.

Une difficulté avec les méta-analyses est qu'elles ne peuvent incorporer dans leurs données des expériences qui n'ont pas été publiées ou n'ont même pas été réalisées. Par exemple, imaginons l'expérience suivante : deux groupes d'élèves en début de classe de 4^{ème} ayant pour consigne de résoudre un problème de géométrie du type « dans un triangle rectangle dont les deux côtés de l'angle droit mesurent 3 cm et 4 cm, calculez la longueur de l'hypoténuse » sont aléatoirement répartis en deux groupes. On enseigne au 1^{er} groupe le théorème de Pythagore pendant une heure, avant de leur présenter le problème à résoudre. On enseigne la Révolution Française au second groupe, avant qu'ils n'effectuent la tâche. Les résultats de cette expérience révéleront bien évidemment un considérable avantage pour le groupe ayant appris le théorème. Clairement, cette expérience a peu de chances d'être publiée ou même réalisée. Cependant, il peut être utile de se demander pourquoi les facteurs qui mènent à un effet de cette ampleur ne sont pas plus fréquemment étudiés. L'ampleur de l'effet surpassera probablement par plusieurs multiples l'ampleur de n'importe lequel des effets communément étudiés. En se fondant sur les résultats de ce type d'expérience, les connaissances spécifiques constitueraient le facteur crucial de la résolution de problèmes de géométrie en utilisant le théorème de Pythagore, mais les tendances de la recherche dans notre domaine suggèrent que l'acquisition de ces connaissances spécifiques ont peu d'importance. Nous suggérerons plus loin que les raisons de ces choix sont eux-mêmes profondément ancrées dans certaines des caractéristiques de l'architecture cognitive humaine.

Quelques recherches ont prité en considération les connaissances, se concentrant principalement sur le contrôle des connaissances spécifiques antérieures des participants, dans un large éventail de tâches académiques : compréhension de textes (Armand, 2001 ; Leeser, 2007 ; Leon & Perez, 2001 ; Osuru, Dempsey & McNamara, 2009 ; Tarchi, 2010), particulièrement des textes peu cohérents (Kintsch, 1994 ; McNamara & Kintsch, 1996) ; la compréhension d'hypertextes (Le Bigot & Rouet, 2007 ; Potelle & Pouet, 2003) ; l'apprentissage fondé sur l'étude d'animations et de documents multimédia (Seufert, 2003 ;

Wetzels, Kester & van Merriënboer, 2011) ; l'acquisition de procédures et des techniques (McNamara, 1995) ; l'apprentissage de faits (Woloshyn, Pressley & Schneider, 1992) et la performance aux examens (Conway, Gardiner, Perfect, Anderson & Cohen, 1997). Saphiro (2004) a soutenu que l'effet des connaissances antérieures est tellement important qu'il est sans doute impossible d'étudier l'apprentissage et les performances sans prendre précisément en compte les connaissances spécifiques, notamment leur qualité (e.g. leur précision), leur profondeur et leur étendue.

Ainsi, alors que les connaissances spécifiques ne sont pas ignorées dans la littérature sur les performances cognitives, elles tendent à être minimisées. Quand elles sont considérées, elles le sont comme résultat (i.e. la performance cognitive elle-même), ou une variable contrôlée.

Dans la partie suivante, nous présentons une description de certains résultats datant des tout débuts de la psychologie scientifique. Ces résultats fournissent des signes que l'effet des connaissances spécifiques a toujours été disponible, mais que les psychologues, notamment psychologues de l'éducation, y semblèrent curieusement aveugles. Ainsi, les sections suivantes décrivent le long chemin menant à la prise en compte des connaissances spécifiques.

Première étape du long chemin : la cécité aux connaissances spécifiques

L'histoire de la psychologie et de l'enseignement regorge de signes d'un curieux aveuglement à l'importance des connaissances spécifiques en tant que le facteur primordial des performances. Dans cette partie, nous examinons quelques aspects de cette histoire.

Le problème de l'intelligence et des connaissances

L'étude de Binet (1894) est bien connue des psychologues de l'expertise (Ericsson & Charness, 1994 ; Ericsson & Lehmann, 1996 ; Ericsson, 1985 ; Ericsson & Chase, 1982), et des historiens de la psychologie (Nicolas, Gounden & Levine, 2011), probablement car ce fut la première étude psychologique à s'intéresser à l'expertise des joueurs d'échecs. La première partie du livre de Binet traite des grands calculateurs et est toujours citée plus de 100 ans après sa publication (e.g. Dehaene, 1997 ; Rikers, 2009). Binet étudie le cas de M. Inaudi, un grand calculateur qui effectuait des tâches de calculs mental à première vue impossibles. Binet demande à Inaudi d'effectuer un grand nombre d'opérations et mesure le temps de réalisation de ces opérations. Il compare ces temps de calculs à celui de plusieurs caissiers du « Bon Marché » qui, en cette fin de XIX^{ème} siècle, travaillaient sans machines à calculer. Le calcul mental était donc leur tâche professionnelle principale. Le tableau 1 est une copie de celui de Binet. Il présente le temps mis pour réaliser des multiplications mentalement (sans papier ni crayon) par plusieurs participants. Dans son commentaire, Binet s'intéresse principalement aux résultats d'Inaudi et du « 1^{er} Caissier », M. Lour. (M. Diamandi était un autre calculateur prodige). Binet écrit (p. 97) : « On voit que si M. Inaudi a en général une supériorité marquée, il est cependant inférieur, pour la multiplication des petits nombres, à un caissier, M. Lour., le meilleur et le plus rapide caissier du Bon Marché, qui ne met que 4 s dans un cas où M. Inaudi met 6,4 s. Il s'agit de petites opérations. M. Lour. ne pourrait pas soutenir la lutte pour des opérations plus complexes, parce que la mémoire lui manquerait. La discussion de ces différents résultats numériques soulève une intéressante question de psychologie ».

Multiplications (CALCUL MENTAL)

| | 3×7 | 49×6 | 63×58 | 426×67 | 638×823 | $4\ 279 \times 584$ | $7\ 286 \times 5\ 397$ | $61\ 826 \times 3\ 976$ | $58\ 927 \times 61\ 408$ | $729\ 856 \times 297\ 143$ |
|---------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| M. Inaudi.... | 0 ^s ,6 | | 2 ^s | | 6 ^s ,4 | | 21 ^s | | 40 ^s | 4 ^m |
| M. Diamandi. | | 6 ^s | 17 ^s | 21 ^s | 56 ^s | 92 ^s | 2 ^m ,7 ^s | 3 ^m ,10 ^s | 4 ^m ,35 ^s | |

Note : les données à laquelle on se réfère sont les minutes et secondes pour effectuer complètement la multiplication de la première ligne.

Tableau 1. Reproduction du tableau de Binet (1894, p. 98) rapportant le temps mis à réaliser des multiplications par cinq participants, dont M. Inaudi et trois caissiers.

Il est fascinant de constater que Binet est incapable de voir que, pour 7286×5397 , le caissier fait beaucoup plus vite qu'Inaudi. Pour Binet, Inaudi est un « phénomène » hautement intelligent qui doit être supérieur à un simple caissier. Binet interprète donc incorrectement ses résultats (à moins qu'il ne se soit trompé en recopiant son tableau).

Il est aussi intéressant de noter que dans une publication antérieure à propos d'Inaudi, Binet (1892) rapporte une anecdote bien connue sur Mozart et sa capacité à se souvenir du « Miserere » d'Allegri. Visitant Rome, à l'âge de quatorze ans, Mozart entend ce morceau de musique pendant le service du mercredi à la chapelle Sixtine. Le jour même, il le transcrit entièrement de mémoire, retournant à la chapelle le vendredi pour effectuer des corrections mineures. Selon Binet, cette prouesse s'explique par la mémoire musicale de Mozart, qu'il attribue à une disposition naturelle, de la même manière qu'il a interprété les facultés de calcul mental d'Inaudi. (Binet pensait aussi que des peintres tel Doré et Vernet avaient une mémoire visuelle supérieure.)

Binet était manifestement incapable d'envisager les performances sous l'angle d'une expertise due aux connaissances spécifiques. De telles connaissances expliquent aisément la capacité de Mozart à se souvenir d'un morceau de musique. Mozart comprend que le morceau d'Allegri est de la musique tonale, suivant (très scrupuleusement) les règles de la musique tonale. Ces règles sont connues des musiciens expérimentés qui connaissent la structure de cette musique et peuvent la reproduire de manière similaire à Mozart. Mozart était un génie, mais il n'est pas besoin d'être un génie pour se souvenir un morceau de musique appartenant à une catégorie bien connue. En d'autres termes, la transcription de ce morceau de musique a les caractéristiques d'un exercice à la portée des musiciens experts. Ce n'est que 75 ans après Binet et plus de 300 ans après Mozart que la psychologie réalisa, avec les travaux d'Ericsson et de ses collègues (Ericsson et Charness, 1994 ; Ericsson & Lehmann, 1996 ; Ericsson 1985 ; Ericsson & Chase, 1982), que quand on effectue une tâche cognitive requérant des connaissances spécifiques, la présence ou l'absence de ces connaissances constituent le meilleur prédicteur de la performance².

² Il est bien entendu hors de question pour nous de prétendre que ces facteurs sont les seuls. Par exemple, les humains sont tout à fait capables de ne pas mobiliser une connaissance alors que celle-ci se trouve en mémoire à long terme et qu'elle est pertinente pour réaliser la tâche : la mobilisation des connaissances spécifiques est un exemple de facteur, parmi de nombreux autres, qui ont aussi un effet sur la performance (cf. la synthèse de Bastien, 1997).

Une décennie après les publications de 1892 et 1894, on demande à Binet de mettre au point un test standardisé pour évaluer les chances de réussite des élèves à l'issue de l'école élémentaire. Par la suite, ce test reçut le nom de QI et on se mit à considérer qu'il mesurait l'intelligence. Binet et ses successeurs supposaient qu'ils mesureraient essentiellement un trait naturel et général, plutôt que des connaissances acquises. Nous connaissons tous les conséquences de la supposition que les tests de QI ne dépendent que minimalement des connaissances acquises. Si Binet n'avait pas été aveugle lors de la description de son propre tableau, peut être l'histoire aurait elle été différente.

Des résultats d'études plus récentes jettent un doute sur l'idée que les tests d'intelligence mesurant une caractéristique essentiellement naturelle. Certaines des preuves les plus marquées de l'influence des connaissances sur l'intelligence viennent d'une expérience ingénieuse conduite par Cahan et Cohen (1989). Ces derniers se préoccupaient des effets de l'avancée en âge *vs.* avancée de la scolarité sur l'intelligence. L'intelligence des enfants augmente avec l'âge, mais dans quelle mesure cette augmentation est une augmentation naturelle simplement due à l'âge ou à l'acquisition de connaissances à l'école ? De toute évidence, une véritable expérience sur le sujet ne pourrait être effectuée de manière éthique. Cahan et Cohen contournent ce problème par un procédé quasi expérimental utilisant le fait que pour une année scolaire donnée, l'âge des enfants varie normalement d'un maximum d'un an. Ainsi, sur une année scolaire donnée, des enfants avec le même temps de scolarité ont un âge variant jusqu'à un an, selon que leur anniversaire tombe avant ou après la rentrée scolaire. En conséquence, des enfants sur des années scolaires adjacentes peuvent être très proches en âge mais avoir un temps de scolarité différant d'un an. Cahan et Cohen trouvent que l'augmentation de l'intelligence due à une année de scolarité supplémentaire représente le double de l'augmentation liée à l'âge. Des résultats similaires ont été obtenus par Cliffordson et Gustafsson (2008) et Stelzl, Merz, Ehlers et Remer (1995). D'autres méthodes, comme l'évaluation des effets d'une réforme augmentant la durée de la scolarité, fournissent la même preuve : le temps passé à l'école accroît l'intelligence (Brinch, 2012).

Alors que ces résultats peuvent être interprétés de plusieurs manières, une conclusion inévitable est que les facteurs environnementaux jouent un rôle crucial dans l'intelligence. En se fondant sur ces résultats, on ne peut supposer que l'intelligence est une mesure basique, biologiquement déterminée qui augmente avec l'âge. L'accumulation de connaissances pendant la scolarité est un candidat évident pour le rôle de facteur majeur dans le développement de l'intelligence.

Cent ans après la publication du livre de Binet sur les grands calculateurs, *The Bell Curve* (Herrnstein & Murray, 1994) mettait encore l'accent sur l'intelligence et ses liens avec les performances et les accomplissements dans de nombreux aspects de la vie. En réponse, le BSA (*Board of Scientific Affairs*) de l'APA (*American Psychological Association*) conclut qu'il y avait un besoin urgent d'un rapport qui ferait autorité sur ces sujets et que tout les bords utiliseraient comme base de discussions. Le BSA mit en place un groupe de travail chargé de préparer ce rapport. Neisser en fut nommé président. Voici quelques citations de ce rapport (Neisser et al. 1996) :

« ... la scolarité elle-même change les aptitudes mentales, notamment celles mesurées dans les tests psychométriques. Ceci est évident pour des tests comme le SAT (*Scholastic Assesment Test*, test standardisé pour l'admission aux universités) qui sont explicitement conçus pour évaluer l'apprentissage scolaire, mais c'est aussi vrai dans quasiment la même mesure pour les tests d'intelligence eux-mêmes » (Neisser et al., 1996, p. 87).

« Il ne fait aucun doute que l'école promeut et permet le développement d'importantes compétences intellectuelles, qui se développent dans des mesures différentes chez différents enfants. C'est parce que les tests d'intelligence s'appuient sur nombre de ces mêmes

compétences qu'ils prédisent les accomplissements scolaires avec le succès qui est le leur. » (Neisser et al. 1996, p. 87).

Certaines des conclusions sur ces travaux sont aussi très importantes. Neisser et al. soutiennent que nous ignorons les liens entre l'intelligence (psychométrique) et les données génétiques. Il est fait une mention importante de l'effet Flynn (Flynn, 2007) qui montre que sur plus d'un siècle, l'intelligence avait augmenté considérablement :

« Les scores moyens des tests d'intelligence sont en augmentation stable. Ils ont augmenté d'un écart type au cours des 50 dernières années. Personne ne sait pourquoi cette augmentation se fait, ni ce qu'elle signifie » (Neisser et al. 1996, p.97.)

En se basant sur ces conclusions, après une centaine d'années, nous ne savons apparemment toujours que très peu sur l'intelligence. Bien sûr, comme le suggèrent ces citations, bien des paradoxes associés à l'intelligence pourraient être résolus si l'histoire des tests d'intelligence incluait une plus grande dépendance à l'acquisition des connaissances spécifiques en mémoire à long terme. Bien des résultats déroutants associés aux tests d'intelligence deviennent compréhensibles si nous supposons que les connaissances spécifiques constituent un composant indispensable du comportement intelligent (voir *e.g.* Ackerman, 2000).

Le problème de la capacité de la mémoire de travail et du développement cognitif

L'article de Miller (1956) peut être considéré comme un des principaux événements de la naissance de la psychologie cognitive, mais aussi, l'article qui définit le concept de capacité de traitement de l'information ou capacité de la mémoire à court terme. Même quand le concept de mémoire à court terme est remplacé par celui de mémoire de travail (Atkinson & Shiffrin, 1968 ; Baddeley & Hitch, 1974 ; Miller, Galanter & Pribram, 1960), le concept lié de capacité ne disparaît pas (Cowan, 2005 ; Conway, Jarrold, Kane, Miyake & Owse, 2007). L'idée forte de Miller est que cette capacité est universelle, s'appliquant à tout le monde et dans tous les domaines. Mais, à nouveau, une courte citation de son article en 1956 est intrigante. Dans ce passage, Miller signale des résultats à propos des jugements absolus de hauteur des sons. Après avoir présenté quelques résultats cohérents, il écrit (p. 84) :

« La plupart des gens s'étonnent que le nombre soit aussi faible que six. Naturellement, on sait très bien qu'une personne très compétente en musique est capable, si on lui demande, de faire une estimation absolue de hauteur, d'identifier correctement n'importe laquelle parmi 50 ou 60 hauteurs différentes. Heureusement je n'ai pas le loisir de discuter de ces exceptions remarquables. Je dis, heureusement, car je ne sais pas comment expliquer que leur performance est élevée. Je m'en tiendrai donc au fait plus prosaïque que la plupart d'entre nous sommes capables d'identifier une hauteur seulement parmi 5 ou 6 hauteurs différentes et qu'au delà nous commençons à commettre des erreurs » (traduction d'Yvonne Noizet, 1974). Bien sûr, comme c'est le cas avec l'intelligence, l'expertise sous forme de connaissances spécifiques peut expliquer ces résultats différents entre experts et novices.

Des années plus tard, plusieurs articles (voir la synthèse de Corbin & Camos, 2013) soulignent un paradoxe directement lié à cette capacité de mémoire travail : alors que la mesure à des tests de capacité de mémoire de travail est fortement corrélée à la réussite scolaire, le fait de parvenir à augmenter la réussite aux tests de mémoire de travail par entraînement n'a pas pour conséquence d'augmenter les performances scolaires. La littérature dans le domaine interprète généralement le premier fait comme suit : la réussite scolaire est une conséquence de la capacité de mémoire de travail. Mais elle est incapable d'interpréter le second fait. Là encore, les connaissances spécifiques apprises à l'école sont un candidat sérieux pour résoudre le paradoxe : elles pourraient favoriser la réussite à ces tests.

Le problème avec la capacité de limitée mémoire de travail / à court terme qui semble disparaître en tant que limite pour certaines personnes doit être lié à la manière dont Miller

pensait le problème. Il considérait la mémoire de travail / à court terme comme une capacité générale, et non pas dépendant du domaine testé. En fait, il est virtuellement impossible de mesurer une capacité de mémoire de travail / à court terme de manière « pure », non influencée par les connaissances en mémoire à long terme pour quelque matériel que ce soit, comme les nombres, les mots, les hauteurs, les images, etc. Il y a d'énormes différences entre les connaissances en mémoire à long terme d'individus différents et c'est précisément ce que les pionniers de l'expertise psychologique découvrirent dans la fin des années 60 (voir ci-dessous).

Les connaissances spécifiques et le développement cognitif

Notre incapacité à reconnaître l'importance des connaissances spécifiques a aussi gêné l'étude du développement cognitif, en particulier la théorie de Piaget des stades de développement. Piaget est, bien sûr, le plus grand théoricien du développement cognitif. Sa théorie des stades (Piaget, 1972) présente une série de paliers cognitifs à travers lesquels l'enfant se développe, du stade sensori-moteur, au préopératoire, puis opératoire concret, et enfin celui des opérations formelles. Ces stades indiquent un changement dans l'habileté générale des enfants à s'engager dans la pensée logique. Chaque palier était d'abord supposé général (non spécifique). Le procédé de la pensée était supposé progresser dans un ordre fixe et nécessaire. Le progrès dans les étapes pouvait varier en vitesse, mais pas en ordre.

Alors que la théorie des stades fonctionne raisonnablement bien, des incohérences commencèrent à apparaître. Piaget montra que les enfants au stade pré opératoire avaient des difficultés dans les épreuves de conservation des nombres, des masses et des volumes. Des objets d'une série qui sont déplacés conduisent les enfants pré opératoires à supposer qu'ils ont augmenté en nombre, les liquides versés dans des contenants de forme différentes conduisent à supposer qu'ils ont changé en volume, alors que les objets solides dont les formes ont changé peuvent conduire à supposer qu'ils ont changé en masse. Ces erreurs, selon la théorie de Piaget, sont dues à la prédominance de la perception sur le raisonnement logique chez les enfants pré opérationnels. Au stade suivant, le stade opératoire concret, le raisonnement logique domine et ces erreurs ne sont plus commises.

La difficulté avec cette explication est que le moment où les erreurs disparaissent varie. Les enfants peuvent, par exemple, conserver les nombres plus tôt que la masse. Si nous supposons qu'apprendre à conserver les nombres, les volumes et les masses sont simplement des connaissances spécifiques qui doivent être acquises à l'école, le fait qu'un enfant puisse les acquérir à des moments différents est facilement expliqué. Si nous supposons que l'acquisition de ces concepts dépend du développement d'aptitudes générales à manipuler la logique, leur apparence à différents moments pour le même enfant devient problématique.

Ce problème devint accablant dans le cas du dernier stade de développement, la pensée opératoire formelle. Cette dernière est supposée se développer à l'âge de 12 ou 13 ans. Elle permet de considérer des problèmes qui peuvent exister, ou pas, en dehors de notre esprit. Elle permet de proposer des hypothèses de manière scientifiquement appropriée. Piaget a commencé par évaluer la pensée opératoire formelle sur des enfants de certaines des meilleures écoles genevoises. Les tâches consistaient notamment à demander aux enfants de mettre en place des expériences valables testant de simples hypothèses scientifiques telles qu'établir le ou les facteurs déterminant la fréquence de l'oscillation d'un pendule. Les enfants au stade des opérations formelles pouvaient accomplir la tâche avec succès en modifiant une variable à la fois et en observer les effets. Les enfants au stade des opérations concrètes étaient plus susceptibles de faire varier plusieurs variables à la fois, indiquant leur échec à comprendre la logique des tests d'hypothèses.

Vers la fin de sa carrière, Piaget (1972) réalisa qu'il y avait de sérieux problèmes avec le stade des opérations formelles. En utilisant sa tâche comme un test, il dut constater que de

nombreuses personnes semblaient ne jamais atteindre ce stade. La solution qu'il suggéra était non pas supprimer le stade des opérations formelles, mais plutôt de le tester dans un domaine où la personne a des compétences, un intérêt et des connaissances. On ne peut pas ignorer les connaissances spécifiques.

Nous aimerions aller plus loin. Notre habilité acquise à raisonner logiquement est spécifique (cf. la synthèse de Bonnefon, 2011). Une personne capable de raisonner logiquement son domaine scientifique peut ne pas le faire dans sa vie personnelle ou dans n'importe quel domaine qui n'est pas le sien.

Deuxième étape du long chemin : reconnaissance des connaissances et de l'expertise

Le contrôle du trafic aérien et les échecs sont sans doute les deux domaines où les effets des connaissances spécifiques ont été les plus communément démontrés. Nous discuterons d'abord des recherches sur le contrôle du trafic aérien.

La nature de l'expertise des contrôleurs aériens

La mémoire des contrôleurs aériens a été largement étudiée au cours des 50 dernières années (e.g. Bainbridge, 1975 ; Stein, Garland & Mueser, 2010 ; Yntema, 1963). Le but d'Yntema par exemple, était de comprendre pourquoi « les joueurs de carte, les contrôleurs aériens, et les personnes vaquant à leurs activités quotidiennes démontrent une habileté à traiter un grand nombre de choses en même temps » (Yntema & Mueser, 1960, p. 18). Son hypothèse était, bien entendu, opposée à celle des connaissances spécifiques. Dans la lignée de Miller (1956), Yntema voulait voir si les contrôleurs aériens avaient une meilleure capacité générale dans la gestion de grosses quantités d'information (puisqu'il suffit de monter dans une tour de contrôle pour constater que c'est ce qu'ils font). En conséquence, Yntema testait les contrôleurs aériens avec des tâches en laboratoire comme l'association de lettres et de formes, de couleurs, de signes, etc. Les résultats indiquent que les contrôleurs aériens n'étaient pas meilleurs que la population générale pour gérer des grosses quantités d'information.

Dix ans plus tard, Bisseret (1970) utilisa le même type de tâches, mais les aborda d'une manière différente : il utilisa des données significatives plutôt que des tâches de laboratoire sans lien avec les connaissances professionnelles. Son expérience incluait une description de plusieurs avions ; chaque description utilisait sept variables. Deux facteurs étaient manipulés : le nombre d'avions et l'expérience du contrôleur aérien. Bisseret trouva une amélioration des scores avec une augmentation de l'expérience. Le nombre moyen de valeurs retenues était de 22,8 pour les novices et de 30 pour les experts, ces deux scores dépassant largement le 7+/-2 de Miller. Les connaissances professionnelles ont un effet considérable sur la mémoire de travail. Pour la première fois, on était capable de faire l'hypothèse que les capacités de mémoire de travail dépendent de connaissances spécifiques. Dans une communication personnelle, Bisseret nous a proposé une interprétation de ses résultats 40 ans plus tard. Selon lui, il aurait « été dans une meilleure position pour interpréter ses résultats si le concept de mémoire de travail à long terme (Ericsson & Kintsch, 1995 ; [voir plus bas]) avait été disponible au moment de la publication ». Il ajoute : « j'ai regretté de n'avoir pas publié l'article en anglais » ! On comprend pourquoi quand on examine la littérature sur l'expertise au jeu d'échecs.

Pourquoi les maîtres d'échecs gagnent-ils ?

Les travaux ci-dessus concernant les conséquences des connaissances spécifiques sur la cognition en utilisant des contrôleurs aériens ont eu un faible impact. Les psychologues de l'apprentissage n'étaient-ils pas prêts pour envisager que les connaissances spécifiques en

mémoire à long terme puissent affecter si radicalement la mémoire de travail, que notre démarche cognitive et nos performances en sont transformées ? Les travaux sur les échecs eurent un impact, bien que la totalité de leurs implications restent à venir, selon nous. Ces travaux furent initiés par De Groot.

Les travaux de De Groot furent publiés pour la première fois en 1946 en Néerlandais et eurent un impact limité dans le domaine. Ils furent à nouveau publiés en 1965 en Anglais. Ils eurent un impact considérable dans le domaine de la cognition, tout particulièrement après le travail de Chase et Simon (1973 ; voir plus bas), mais un impact limité en psychologie de l'éducation, notamment dans ses liens avec l'ingénierie pédagogique et les didactiques.

De Groot étudiait les facteurs qui permettent aux maîtres d'échecs de systématiquement vaincre les joueurs moins bien classés. Les échecs sont, à juste titre, vus comme un jeu de résolution de problèmes, mais le facteur de résolution des problèmes n'était pas clairement identifié. Une possibilité était que les maîtres s'engagent dans une plus grande recherche en profondeur en considérant plus de coups à l'avance, ou une plus grande recherche en largeur, en considérant plus de coup alternatifs. On pourrait s'attendre à ce que plus de recherche augmente la possibilité de trouver un bon coup, mais De Groot ne trouva aucune preuve que les maîtres cherchaient plus que les joueurs moins bien classés. La recherche de différences dans la résolution de problèmes ne permettait pas de distinguer les maîtres des autres joueurs.

La seule distinction que De Groot pu trouver entre maîtres et joueurs moins bien classés fut la mémoire pour les configurations de plateaux de jeu tirés de vraies parties. On montrait aux joueurs une configuration du plateau de jeu pendant 5 secondes avant que les pièces soient retirées et qu'on demande aux joueurs de répliquer la configuration qu'ils venaient de voir. Les maîtres réussissaient bien à cette tâche avec un taux de précision de 70 à 80%. Les joueurs moins bien classés avaient une précision de 30 à 40%. Chase et Simon (1973) reproduisirent ces résultats, mais ils montrèrent, en plus de cela, qu'avec des configurations aléatoires, la différence entre maîtres et les autres disparaissait, tous ayant un très faible taux de précision.

Ces résultats changèrent notre vision de la résolution de problèmes et consécutivement de la cognition humaine. Les maîtres sont supérieurs aux joueurs moins bien classés non pas parce qu'ils ont acquis des stratégies de résolution de problème complexes et sophistiquées, ni une capacité de mémoire générale améliorée, mais parce qu'ils ont acquis une énorme base de connaissances spécifiques constituée de milliers de configurations de problèmes ainsi que les meilleurs coups pour chaque configuration. Aucune étude, que ce soit avant ou après le travail de De Groot, ne révèle des stratégies de résolution de problème différentes ou n'importe quelle stratégie cognitive générale, qui puisse distinguer les maîtres d'échec des joueurs de moins bien classés (voir la synthèse de Didierjean, Ferrari & Marmèche, 2004). La seule différence entre les joueurs réside dans les connaissances spécifiques en mémoire à long terme. De plus, aucune autre différence n'est requise pour expliquer les compétences de résolution de problèmes d'échec.

Généralisation du travail sur les échecs à d'autres domaines.

Sans surprise, des résultats similaires ont été obtenus dans d'autres domaines, notamment des domaines plus intéressants pour la recherche en éducation. Des résultats indiquant que les experts ont une meilleure mémoire pour les états du problème que les novices ont été obtenus dans des domaines tels que la compréhension et le rappel de textes (Chiesi, Spilich & Voss, 1979), le génie électronique (Egen & Schwartz, 1979), la programmation (Jeffries, Turner, Polson & Atwood, 1981) et l'algèbre (Sweller & Cooper, 1985). En se fondant sur ces résultats, on peut envisager que la compétence dans un domaine repose sur les connaissances des états des problèmes qui peuvent être rencontrés dans ce domaine, ainsi que les meilleures actions associées à ces états. Pour des domaines complexes

et étendus, ces connaissances peuvent constituer de plusieurs dizaines de milliers d'états de problèmes (Simon & Gilmarin, 1973). Ces innombrables états de problèmes et les meilleures actions associées à ces états sont stockés en mémoire à long terme. Ce sont ces connaissances et le fait qu'elles sont mobilisables pour atteindre ces buts qui constituent l'expertise. Nous devrions au moins considérer la possibilité que des telles connaissances constituent les ressources de l'expertise et de la compétence. Nous ne devrions certainement pas reléguer les connaissances spécifiques au second plan.

La théorie de l'expertise

Ericsson et ses collaborateurs ont produit des données et une théorie de l'expertise qui dépend des connaissances spécifiques en mémoire à long terme. Initialement, l'accent était mis sur les performances extraordinaires d'individus particuliers, dans des tâches de tests de mémoire de dizaines de chiffres présentés aléatoirement (Chase & Ericsson, 1982). Ces premières études ont montré que les techniques utilisées par les personnes aux performances exceptionnelles pour mémoriser des listes de chiffres ou de lettres aléatoires sont faciles à apprendre. Les personnes avec haut niveau de performance aux tests de mémoire sont tout simplement des experts dans les tests de mémoire du fait de leurs connaissances spécifiques de ces tests. Par la suite, dans une étude à propos de la pratique délibérée, Ericsson et ses collaborateurs ont montré que l'acquisition de l'expertise dans n'importe quel domaine substantiel requiert des années d'entraînement avec l'intention d'améliorer les performances (Ericsson et Charness, 1994 ; Ericsson, Krampe & Tesch-Romer, 1993). Dix années de pratique intensive sont généralement nécessaires pour atteindre un niveau de performance comparable à celui de grand maître aux échecs. Il est intéressant de noter que les trois caissiers ayant participé à l'expérience de Binet (1894) ont indiqué qu'ils avaient mis 10 ans à atteindre leur meilleur niveau en calcul mental. Grâce aux travaux d'Ericsson et de ses collègues, nous savons maintenant ce qui se passe pendant ces 10 ans : les experts acquièrent des connaissances spécifiques contenues en mémoire à long terme.

En effet, le travail effectué par Ericsson et ses collègues a montré que les limites de capacité et de durée de la mémoire de travail disparaissent quand la mémoire de travail gère des informations habituelles provenant de la mémoire à long terme. Les limites de capacité et de durée de la mémoire de travail s'appliquent à des informations nouvelles, inhabituelles. D'un point de vue théorique, on peut aborder ce fait de deux manières. On peut supposer que la mémoire de travail gère différemment l'information stockée et organisée en mémoire à long terme, et les informations provenant de l'environnement, qui doivent encore être organisées. Ou bien, on peut définir une structure qui gère l'information de la mémoire à long terme qui diffère de la mémoire à court terme/de travail. Ericsson et Kintsch (1995) ont choisi de définir une nouvelle structure, la mémoire de travail à long terme, pour expliquer comment la mémoire de travail gère l'information de la mémoire à long terme. Celle-ci n'a pas les limites de capacité et de durée de la mémoire de travail à court terme. Elle n'a aucune limite mesurable.

Que nous adhérons à une conception de la mémoire de travail aux différentes caractéristiques selon la source de l'information, ou à des structures séparées gérant l'information provenant de l'environnement ou de la mémoire à long terme, le résultat est le même. Dans les deux cas, les connaissances en la mémoire à long terme transforment radicalement les performances.

En résumé, la psychologie de l'expertise a montré que le principal facteur déterminant les performances des experts réside dans les connaissances spécifiques acquises. Plus le domaine est complexe, plus les connaissances spécifiques ont de l'importance. D'après Ericsson et Charness (1994), la raison pour laquelle nous avons mis tant de temps à découvrir cette explication, tellement simple, est notre fascination pour les performances

exceptionnelles et pour les génies. Cette fascination nous a peut-être conduit à chercher des explications extraordinaires. Cependant, l'accent mis par Ericsson et Charness sur le rôle de notre fascination pour le génie pourrait n'être que partiellement correcte du fait que lorsque des gens non exceptionnels sont considérés, il est encore plus difficile de reconnaître le rôle des connaissances spécifiques.

Troisième étape du long chemin : de la psychologie de l'expertise à l'éducation

Ce n'est que récemment que l'influence des recherches sur l'expertise a commencé à influencer la psychologie de l'éducation, et ce processus est loin d'être terminé. Nous avons toujours tendance à ignorer la possibilité que les connaissances spécifiques pourraient être le facteur déterminant des performances et des avantages à mettre l'accent sur l'acquisition de connaissances spécifiques.

Catégorisation et représentation des problèmes de physique par des experts et des novices

Parmi les premiers travaux sur les effets des connaissances spécifiques sur les apprentissages académiques, on trouve ceux de Chi, Feltovich et Glaser (1981). Leur étude décrit quatre expériences sur la résolution de problèmes en sciences physiques. Chi et ses collègues analysent les différences entre les experts et les novices dans la représentation de problèmes, i.e. « la structure cognitive correspondant à un problème, construite par un résolveur sur la base de ses connaissances spécifiques et de leur organisation » (p. 122). Avant l'article de Chi et al., Simon et Simon (1978) et Larkin, McDermott, Simon et Simon (1980) avaient découvert que les novices travaillent de façon régressive à partir du but dans les problèmes de physique en utilisant une stratégie « moyens – fins » (Newell & Simon, 1972). Avec cette stratégie, les solveurs de problème repèrent les différences entre l'état courant d'un problème et l'état but, et cherchent des opérations pour réduire ces différences, alors que les experts travaillent vers l'avant, en partant de l'état initial. Ces résultats ont été interprétés comme relevant de différences dans les stratégies de résolution de problème des experts et des novices. Chi était convaincue que ces différences entre experts et novices dans la résolution de problèmes de physique pouvait être interprétée en termes de représentation (voir Chi, 1993, pour l'origine de l'article de Chi et al., 1981). Elle a donc présenté à des novices et à des experts une tâche de catégorisation de différents exercices de physique. Les experts étaient des étudiants en doctorat en physique et les novices étaient des étudiants en licence. Les résultats montrent que les experts répartissent les problèmes en fonction d'indices structurels, pertinents par rapport à la résolution de problèmes, alors que les novices utilisent des indices superficiels. Par exemple, un novice peut grouper des problèmes par ce qu'ils incluent un plan incliné, alors que les experts tendent plutôt à regrouper des problèmes parce que, par exemple, leur solution repose sur la conservation de l'énergie. « Le résultat expert-novice basique, qui est que les connaissances des experts sont représentées à un niveau plus « profond » (quelle que soit l'acception de « profond »), alors que celles des novices sont représentées à un niveau plus concret, a été reproduit dans de nombreux domaines, allant des connaissances des scientifiques, à celles des chauffeurs de taxi » (Chi, 1993, p.12).

L'article de Chi et al. met l'accent sur les différences entre les experts et les novices dans des problèmes pertinents par rapport à l'apprentissage. Dans le domaine de la résolution de problèmes, abandonner les problèmes de puzzle, considérés comme des prototypes de problèmes, pour aller vers des problèmes pertinents par rapport à l'apprentissage, a constitué une avancée majeure pour la prise en compte de l'importance des connaissances spécifiques dans l'apprentissage. Ce changement est particulièrement frappant quand on relit l'article de Anzai et Simon (1979) à propos de l'apprentissage de la résolution du problème de la Tour de Hanoi. Aucune mention n'est faite, dans cet article important, des effets des connaissances

dans la résolution de problèmes, ou de l'acquisition de connaissances au cours de la résolution de problèmes. L'article de Chi et al. a été l'un des premiers à considérer, avec des problèmes pertinents scolairement, l'importance des connaissances spécifiques dans les performances de résolution de problèmes.

Schneider, Korkel et Weinert (1989) ont reproduit l'effet des connaissances spécifiques de manière très différente. Ils ont présenté des tâches de mémoire et de compréhension de textes à deux groupes qui diffèrent selon leurs connaissances spécifiques et leurs aptitudes verbales (vocabulaire, complètement de phrase, classement de mots) mesurées par un test d'aptitudes cognitives. Les participants étaient des experts et des novices en football. Les résultats indiquent que les experts en football avec un faible niveau d'aptitudes surclassent les novices en football avec un haut niveau d'aptitudes, quelle que soit la mesure de mémoire ou de compréhension. Ces résultats sont analogues à ceux obtenus par Chi (1978) qui a trouvé que les joueurs d'échec plus jeunes ont une meilleure mémoire pour les configurations de plateau d'échec pour de vraies parties que d'autres enfants plus âgés mais moins performants aux échecs.

Le travail de Chi a alimenté le faisceau d'indices concernant la spécificité des connaissances des experts. Cela a été particulièrement important car l'objet d'étude, la physique, est pertinent scolairement, et que les novices et les experts étaient tous des étudiants de différents niveaux d'expertise plutôt que des experts reconnus. A la suite du travail de Chi, plusieurs études ont pris en compte les connaissances spécifiques en les contrôlant, mais quelques unes seulement se sont focalisées sur l'analyse des effets des connaissances spécifiques sur l'apprentissage (voir Fayol, 1994 pour une revue, et plus récemment Amadiou, Tricot & Mariné, 2009 ; Duncan, 2007 ; Gijlers & de Jong, 2005). Un nombre très limité d'études ont montré les effets des connaissances spécifiques quand elles sont présentées quelques minutes avant une tâche d'apprentissage principale (Mayer, Mathias & Wetzel, 2007 ; Pollock, Chandler & Sweller, 2002). Ainsi, si les connaissances spécifiques sont au cœur des performances intellectuelles des élèves, des techniques mises au point pour aider les élèves dans l'acquisition de connaissances spécifiques constituent logiquement l'étape suivante.

La théorie de la charge cognitive

Si les connaissances spécifiques en mémoire à long terme constituent le facteur principal des performances intellectuelles, on peut s'attendre à ce que la recherche et les théories en ingénierie pédagogique ou didactique mettent l'accent sur l'acquisition de connaissances spécifiques. En réalité, comme nous l'avons souligné plus haut, alors que certaines recherches en ingénierie pédagogique et en psychologie cognitive de l'éducation mettent bien l'accent sur l'acquisition de connaissances spécifiques, ces travaux sont minoritaires, rendant peu pertinentes bien des découvertes parmi les plus importantes à propos des processus cognitifs. Une des théories qui insistent sur l'acquisition de connaissances spécifiques est la théorie de la charge cognitive (Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007 ; Sweller, 2015; Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011).

La théorie de la charge cognitive a été conçue et continue d'être développée pour rendre compte des processus cognitifs qui facilitent l'acquisition de connaissances spécifiques à travers la conception de situations d'enseignement (au sens restreint, c'est-à-dire composées de tâches et de supports). Appliqué à la cognition humaine, le processus l'acquisition de connaissances spécifiques requiert :

- Une réserve d'informations sous la forme d'une mémoire à long terme contenant une très grande quantité de connaissances spécifiques. Cet ensemble est partiellement réorganisé chaque fois qu'il intègre une nouvelle connaissance.

- Un mécanisme pour obtenir cette connaissance de la part d'autres personnes, *e.g.* par enseignement ou par imitation.

- La capacité de créer des connaissances originales à travers un processus de génération aléatoire et de test de cette connaissance originale : *e.g.* la capacité de procéder par essais et erreurs lors de la résolution d'un problème.

- Une structure, la mémoire de travail, pour limiter la quantité de connaissances originales qui sont acquises lors de la génération aléatoire et le test, pour s'assurer que des connaissances utiles contenues en mémoire à long terme ne soient pas altérées, *i.e.* réorganisées de façon non-pertinente.

- Et enfin, une structure telle que la mémoire de travail à long terme, ou bien des processus permettant à l'information contenue en mémoire à long terme d'être mobilisée en mémoire de travail, pour diriger une activité fondée sur les connaissances.

Ensemble, ces structures et processus cognitifs constituent une architecture cognitive qui peut être utilisée pour générer des situations d'enseignement. Ces procédés sont centrés entièrement sur la facilitation de l'acquisition de connaissances spécifiques. Des synthèses récentes des différents effets de la charge cognitive et de leurs implications dans l'enseignement peuvent être trouvées chez Sweller (2011, 2012). Des présentations détaillées peuvent être trouvées chez Sweller, Ayres et Kalyuga (2011) et, en Français, chez Chanquoy, Tricot et Sweller (2007). Elles ne seront pas reproduites ici. Alors que tous les effets ont pour but de faciliter l'acquisition de connaissances spécifiques, deux des effets, l'effet du problème résolu et l'effet de renversement dû à l'expertise, fournissent deux bons exemples de l'importance des connaissances spécifiques en ingénierie pédagogique.

L'effet du problème résolu. Cet effet est obtenu quand des apprenants, à qui on donne un problème à résoudre, apprennent moins que des apprenants à qui on demande aux apprenants d'étudier le même problème, résolu. Dans un problème résolu, chaque énoncé de problème est associé à une solution détaillée. Malgré la résolution d'un plus petit nombre de problèmes, la situation du problème résolu aboutit systématiquement à de meilleures performances. Pourquoi ?

D'après la théorie de la charge cognitive, étudier un problème résolu réduit la charge inutile en mémoire de travail, si on compare cette charge à celle mobilisée lorsque l'on doit rechercher une solution au problème, et cette réduction permet aux ressources en mémoire de travail d'être dévolues à l'apprentissage de la reconnaissance des états du problème associés aux actions pertinentes. En d'autres termes, étudier un problème résolu est conforme à l'hypothèse des connaissances spécifiques qui suggère que les bons solveurs de problèmes ont appris à reconnaître un grand nombre d'états de problèmes et la meilleure action associée à chaque état. Les problèmes résolus mettent l'accent sur précisément ces états de problèmes et leurs « pas ». C'est là que réside l'effet du problème résolu.

L'effet du renversement dû à l'expertise. L'effet du problème résolu est obtenu avec des novices dans un domaine donné. Quand le niveau d'expertise augmente, l'effet disparaît d'abord, puis se renverse : la résolution de problèmes devient supérieure à l'étude de problèmes résolus (Kalyuga, Chandler, Tuovinen & Sweller, 2001). Alors que les novices ont besoin de problèmes résolus pour les aider à acquérir les connaissances spécifiques qui sont au centre de la résolution du problème, pourquoi les problèmes résolus sont-ils nuisibles à l'acquisition de connaissances une fois le niveau d'expertise est plus élevé ?

Les experts sont des personnes qui ont déjà acquis les connaissances nécessaires à la résolution d'un type de problèmes donné. Ils n'ont pas besoin qu'on leur montre comment résoudre ces problèmes du fait qu'ils n'ont pas besoin de s'engager dans une recherche pour trouver une solution pertinente aux problèmes. Étudier un problème résolu est une activité redondante (voir Sweller et al., 2011, pour une discussion de l'effet de redondance) qui augmente la charge cognitive non pertinente. Au lieu de cela, les apprenants peuvent avoir

besoin de s'entraîner à résoudre le problème, avoir besoin de répéter, pour pouvoir reconnaître automatiquement l'état du problème pertinent et l'action associée. Pour ces raisons, les novices ont besoin de problèmes résolus alors que la résolution de problèmes est plus importante pour les experts du domaine : c'est là que réside l'effet du renversement dû à l'expertise. Là encore, cet effet mis à jour par la théorie de la charge cognitive repose sur l'importance centrale des connaissances spécifiques pour la résolution de problèmes..

L'effet du problème résolu et d'autres effets associés tels que l'effet du renversement dû à l'expertise sont fondés sur l'idée que le but de l'apprentissage est de permettre aux apprenants d'acquérir de grandes quantités de connaissances en mémoire à long terme. On suppose que ces connaissances transforment nos processus cognitifs et, effectivement, nous transforme. Cette supposition peut être mise en contraste avec des points de vue alternatifs de la cognition humaine qui insistent plutôt sur l'acquisition de connaissances générales (voir Kirschner, Sweller & Clark, 2006).

Discussion

L'expertise basée sur les connaissances spécifiques en mémoire à long terme est de loin la meilleure explication des performances dans n'importe quel domaine cognitif. En outre, contrairement aux stratégies cognitives plus générales, il n'y a aucun doute sur le fait que les connaissances spécifiques et l'expertise peuvent être enseignées et apprises. En effet, transmettre des connaissances à des apprenants novices est le rôle principal de l'école. A l'école, les élèves acquièrent des connaissances qui réduisent le besoin de s'engager dans une résolution de problème inefficace et la mise en œuvre d'autres processus cognitifs. Ces connaissances permettent aux individus d'être préparés à une grande variété de tâches en dehors de l'école. Etant donnée l'importance des connaissances spécifiques, il est déroutant de constater que la psychologie cognitive de l'éducation ait eu tendance à chercher ailleurs au cours de son histoire. Il existe plusieurs raisons possibles.

A tout moment, nous sommes inconscients de l'immense quantité de connaissances spécifiques contenues dans notre mémoire à long terme. Les seules connaissances auxquelles nous avons un accès direct et dont nous sommes conscients doivent être mobilisées en mémoire de travail. Les connaissances en mémoire de travail tendent à n'être qu'une insignifiante partie de notre base de connaissances. Avoir accès à une infime partie de notre base de connaissances, quel que soit le moment, nous conduit peut-être à supposer que les connaissances ont relativement peu d'effet sur les performances. Il peut être difficile d'appréhender l'immense quantité de connaissances organisées qui peuvent être contenues dans notre mémoire à long terme précisément car une telle quantité d'information est inimaginable. Si nous sommes inconscients de la grande quantité de connaissances contenues dans notre mémoire à long terme, nous avons de grandes chances de chercher des explications alternatives aux performances fondées sur les connaissances.

Non seulement la quantité de connaissances spécifiques contenues en mémoire à long terme nous est cachée, mais la nature de ces connaissances tend à nous être cachée aussi. Nous pouvons savoir que nous avons appris le théorème de Pythagore parce qu'il est explicitement appris. Nous pouvons savoir que nous devons aussi apprendre à reconnaître les différents états des différents problèmes auxquels le théorème s'applique, et que ces connaissances peuvent être considérablement plus étendues et difficiles à apprendre que le simple apprentissage du théorème lui-même. En effet, l'ensemble de tous les états de tous les problèmes auxquels le théorème de Pythagore s'applique est infini. En se fondant sur la littérature actuelle, il est aisé de supposer que, par exemple, apprendre les mathématiques n'implique rien de plus qu'apprendre des règles mathématiques, ou qu'apprendre les échecs n'est rien de plus qu'apprendre les règles des échecs. Les mathématiciens et les joueurs d'échecs ont pleinement conscience qu'ils ont besoin d'apprendre les règles appropriées pour

être performants dans leur domaine. Mais ils peuvent être peu conscients de ce dont ils ont besoin d'autre pour être performants à haut niveau. Un très bon joueur d'échecs ne sait généralement pas qu'il possède quelques centaines de milliers de connaissances relatives à des configurations d'états associées à des actions. Il est sans doute plus aisé de croire en des stratégies générales, d'autant que ces dernières ne sont généralement pas décrites. Il a fallu très longtemps pour découvrir exactement ce qui est appris lorsqu'on est confronté à un domaine de connaissance conséquent.

Une fois que nous avons appris un domaine conséquent, nous avons tendance à oublier à quel point il a été difficile et long de l'apprendre. Comme de nombreux formateurs d'enseignants peuvent en témoigner, il peut être difficile de convaincre les enseignants débutants qu'ils ne doivent pas entrer dans leur première salle de classe pour essayer de dire aux élèves tout ce qu'ils ont appris sur le sujet en 55 minutes. Une fois que nous avons appris quelque chose, nous avons tendance à penser que c'est simple et évident (car ça l'est maintenant pour nous) et à oublier à quel point cela a été difficile et complexe à apprendre.

Pour ces raisons, l'ampleur, la complexité, la difficulté et le temps nécessaire pour acquérir les connaissances spécifiques peuvent nous être invisibles. L'idée que les connaissances spécifiques en mémoire à long terme peuvent être tout ce dont nous avons besoin pour expliquer des niveaux de performance très élevés et très sophistiqués peut apparaître comme contre-intuitive. Au lieu de cela, des stratégies cognitives complexes, bien que souvent non spécifiées, peuvent apparaître comme les principaux moteurs de nos processus cognitifs. Alors que des stratégies sophistiquées, enseignables et apprenables peuvent exister ou ne pas exister, elles ne devraient pas être vues comme des substituts à l'acquisition de connaissances spécifiques. Ces connaissances sont cruciales.

La conséquence de ce que nous venons d'énoncer est qu'il est très difficile, lors d'une expérimentation, d'évaluer l'ensemble des connaissances spécifiques qu'un individu possède dans un domaine. La seule chose qu'un expérimentateur peut évaluer réside dans la « fenêtre » ouverte par la mémoire de travail lors de la réalisation d'une tâche. Il est, de la même manière, difficile d'évaluer précisément l'ensemble des connaissances modifiées lors d'un apprentissage. Ce n'est pas une simple expérimentation qui a permis d'aboutir à l'hypothèse, largement consensuelle aujourd'hui, que les grands joueurs d'échecs possèdent des centaines de milliers de *chunks*. Peut-être que notre cécité aux connaissances spécifiques est aussi liée à des difficultés méthodologiques.

Références.

- Ackerman, P. L. (2000). Domain-specific knowledge as the "Dark matter" of adult intelligence: Gf/Gc, personality and interest correlates. *Journals of Gerontology Series B-Psychological Sciences and Social Sciences*, 55, P69-P84.
- Amadiou, F., Tricot, A., & Mariné, C. (2009). Effects of prior knowledge diversity on learning with a non-linear electronic document: disorientation and coherence of the reading sequence. *Computers in Human Behavior*, 25, 381-388. doi: 10.1016/j.chb.2008.12.017
- Anzai, Y., & Simon, H. A. (1979). Theory of learning by doing. *Psychological Review*, 86, 124-140. doi: 10.1037//0033-295x.86.2.124
- Armand, F. (2001). Learning from expository texts: Effects of the interaction of prior knowledge and test structure on responses to different question types. *European Journal of Psychology of Education*, 16, 67-86.
- Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K.W. Spence & J. T. Spence (Eds.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 2, pp. 89-195). New York: Academic Press.

- Baddeley, A.D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G.H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 8, pp. 47–89). New York: Academic Press.
- Bainbridge, L. (1975). Working memory in air-traffic control. Unpublished paper, University of Reading. Retrieved February 16, 2016, from <http://www.bainbrdg.demon.co.uk/Papers/WMemory.html>
- Bastien, C. (1997). *Les connaissances de l'enfant a l'adulte: organisation et mise en œuvre*. Paris : Armand Colin.
- Binet, A. (1892). Le calculateur Jacques Inaudi. *Revue des deux Mondes*, 111, 905-924.
- Binet, A. (1894). *Psychologie des grands calculateurs et joueurs d'échecs*. Paris: Hachette.
- Bisseret, A. (1970). Mémoire opérationnelle et structure du travail. *Bulletin de Psychologie*, 24, 280-294.
- Bonnefon, J.-F. (2011). *Le raisonneur et ses modèles*. Grenoble : PUG.
- Brinch, C. N. (2012). Schooling in adolescence raises IQ scores. *Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America*, 109, 425–430. doi:10.1073/pnas.1106077109
- Cahan, S., & Cohen, N. (1989). Age versus schooling effects on intelligence development. *Child Development*, 60, 1239-1249. doi: 10.1111/j.1467-8624.1989.tb03554.x
- Caramazza, A. & Shelton, J. (1998). Domain-specific knowledge systems in the brain: The animate/inanimate distinction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10, 1-34. doi: 10.1162/089892998563752
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive*. Paris : Armand Colin.
- Chase, W. G., & Ericsson, K. A. (1982). Skill and working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 16, pp. 1-58). New York: Academic Press.
- Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, 4, 55-81. doi: 10.1016/0010-0285(73)90004-2
- Chi, M. T. H. (1978). Knowledge structures and memory development. In R. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* (pp. 73-96). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Chi, M. T. H. (1993). Experts vs novices knowledge - a citation-classic commentary on categorization and representation of physics problems by experts and novices by Chi, M.T.H., Feltovich, P., Glaser, R. *Current Contents/Social & Behavioral Sciences*, 42, 8-8.
- Chi, M. T. H., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152. doi: 10.1207/s15516709cog0502_2
- Chiesi, H. L., Spilich, G. J., & Voss, J. F. (1979). Acquisition of domain-related information in relation to high and low domain knowledge. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 18, 257-273. doi: 10.1016/s0022-5371(79)90146-4
- Cliffordson, C., & Gustafsson, J. E. (2008). Effects of age and schooling on intellectual performance: Estimates obtained from analysis of continuous variation in age and length of schooling. *Intelligence*, 36, 143-152. doi: 10.1016/j.intell.2007.03.006
- Conway, A. R. A., Jarrold, C., Kane, M. J., Miyake, A., & Towse, J. (Eds.), (2007). *Variation in working memory*. Oxford University Press.
- Conway, M. A., Gardiner, J. M., Perfect, T. J., Anderson, S. J., & Cohen, G. M. (1997). Changes in memory awareness during learning: The acquisition of knowledge by psychology undergraduates. *Journal of Experimental Psychology-General*, 126, 393-413. doi: 10.1037/0096-3445.126.4.393

- Corbin, L., & Camos, V. (2013). L'entraînement de la mémoire de travail et les apprentissages scolaires. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 123(25), 113-119
- Cowan, N. (2005). *Working memory capacity*. Hove: Psychology Press.
- De Groot, A. (1965). *Thought and choice in chess*. The Hague, Netherlands: Mouton. (Original work published 1946).
- Dehaene, S., (1997). *The number sense*. New York: Oxford University Press.
- Dehaene, S., Dehaene-Lambertz, G., & Cohen, L. (1998). Abstract representations of numbers in the animal and human brain. *Trends in Neuroscience*, 21, 355-361. doi: 10.1016/S0166-2236(98)01263-6
- Didierjean, A., Ferrari, V., & Marmeche, E. (2004). L'expertise cognitive au jeu d'échecs : quoi de neuf depuis De Groot ? *L'Année Psychologique*, 104, 771-793.
- Dochy, F., Segers, M., & Buehl, M. M. (1999). The relation between assessment practices and outcomes of studies: The case of research on prior knowledge. *Review of Educational Research*, 69, 145-186. doi: 10.2307/1170673
- Duncan, R. G. (2007). The role of domain-specific knowledge in generative reasoning about complicated multileveled phenomena. *Cognition & Instruction*, 25, 271-336.
- Egan, D. E., & Schwartz, B. J. (1979). Chunking in recall of symbolic drawings. *Memory & Cognition*, 7, 149-158. doi: 10.3758/bf03197595
- Ericsson, K. A. (1985). Memory skill. *Canadian Journal of Psychology*, 39, 188-231. doi: 10.1037/h0080059
- Ericsson, K. A. (Ed.), (1996). *The road to excellence: The acquisition of expert performance in the arts and sciences, sports, and games*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Ericsson, K. A., & Charness, N. (1994). Expert performance - its structure and acquisition. *American Psychologist*, 49, 725-747. doi: 10.1037/0003-066x.49.8.725
- Ericsson, K. A., & Chase, W. G. (1982). Exceptional memory. *American Scientist*, 70, 607-615.
- Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working-memory. *Psychological Review*, 102, 211-245. doi: 10.1037//0033-295x.102.2.211
- Ericsson, K. A., & Lehmann, A. C. (1996). Expert and exceptional performance: Evidence of maximal adaptation to task constraints. *Annual Review of Psychology*, 47, 273-305. doi: 10.1146/annurev.psych.47.1.273
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Teschroemer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, 100, 363-406. doi: 10.1037/0033-295x.100.3.363
- Fayol, M. (1994). From declarative and procedural knowledge to the management of declarative and procedural knowledge. *European Journal of Psychology of Education*, 9, 179-190.
- Flynn, J. R. (2007). *What is intelligence? Beyond the Flynn effect*. Cambridge, UK: Cambridge University Press
- Gijlers, H., & de Jong, T. (2005). The relation between prior knowledge and students' collaborative discovery learning processes. *Journal of Research in Science Teaching*, 42, 264-282. doi: 10.1002/tea.20056
- Herrnstein, R.J., & Murray, C. (1994). *The Bell Curve: Intelligence and class structure in American life*. New York: Free Press.
- Jeffries, R., Turner, A., Polson, P., & Atwood, M. (1981). Processes involved in designing software. In J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition* (pp. 255-283). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- 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.

- Kintsch, W. (1994). Text comprehension, memory, and learning. *American Psychologist*, *49*, 294-303. doi: 10.1037//0003-066x.49.4.294
- Kirschner, P., Sweller, J., & Clark, R. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential and inquiry-based teaching. *Educational Psychologist*, *41*, 75-86.
- Larkin, J. H., McDermott, J., Simon, D. P., & Simon, H. A. (1980). Models of competence in solving physics problems. *Cognitive Science*, *4*, 317-345. doi: 10.1207/s15516709cog0404_1
- Le Bigot, L., & Rouet, J. F. (2007). The impact of presentation format, task assignment, and prior knowledge on students' comprehension of multiple online documents. *Journal of Literacy Research*, *39*, 445-470. doi: 10.1080/10862960701675317
- Leeser, M. J. (2007). Learner-based factors in L2 reading comprehension and processing grammatical form: Topic familiarity and working memory. *Language Learning*, *57*, 229-270. doi: 10.1111/j.1467-9922.2007.00408.x
- Leon, J.A., & Perez, O. (2001). The influence of prior knowledge on the time course of clinical diagnosis inferences: A comparison of experts and novices. *Discourse Process*, *31*, 187-213. doi: 10.1207/S15326950DP3102_04
- Maguire, E. A., Frith, C. D., & Morris, R. G. M. (1999). The functional neuroanatomy of comprehension and memory: the importance of prior knowledge. *Brain*, *122*, 1839-1850. doi: 10.1093/brain/122.10.1839
- Mayer, R. E., Mathias, A., & Wetzell, K. (2002). Fostering understanding of multimedia messages through pre-training: Evidence for a two-stage theory of mental model construction. *Journal of Experimental Psychology-Applied*, *8*, 147-154. doi: 10.1037//1076-898x.8.3.147
- McNamara, D. S. (1995). Effects of prior knowledge on the generation advantage: Calculators versus calculation to learn simple multiplication. *Journal of Educational Psychology*, *87*, 307-318. doi: 10.1037/0022-0663.87.2.307
- McNamara, D. S., & Kintsch, W. (1996). Learning from texts: Effects of prior knowledge and text coherence. *Discourse Processes*, *22*, 247-288.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, *63*, 81-97.
- Miller, G. A., Galanter, E. & Pribram, KH. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Neisser, U., Boodoo, G., Bouchard, T. J., Boykin, A. W., Brody, N., Ceci, S. J., et al. (1996). Intelligence: Knowns and unknowns. *American Psychologist*, *51*, 77-101. doi:10.1037/0003-066x.51.2.77.
- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Nicolas, S., Gounden, Y., & Levine, Z. (2011). The memory of two great mental calculators : Charcot and Binet's neglected 1893 experiments. *American Journal of Psychology*, *124*, 235-242.
- Ozuru, Y., Dempsey K., & McNamara, D.S. (2009), Prior knowledge, reading skill, and text cohesion in the comprehension of science texts. *Learning & Instruction*, *19*, 228-242. doi: 10.1016/j.learninstruc.2008.04.003
- Piaget, J. (1972). Intellectual evolution from adolescence to adulthood. *Human Development*, *15*, 1-12.
- Pollock, E., Chandler, P., & Sweller, J. (2002). Assimilating complex information. *Learning & Instruction*, *12*, 61-86. doi: 10.1016/s0959-4752(01)00016-0

- Potelle, H., & Rouet, J. F. (2003). Effects of content representation and readers' prior knowledge on the comprehension of hypertext. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58, 327-345. doi: 10.1016/s1071-5819(03)00016-8
- Puustinen, M., & Rouet, J. F. (2009). Learning with new technologies: Help seeking and information searching revisited. *Computers & Education*, 53(4), 1014-1019.
- Rikers, R.M.J.P. (2009). Why is not everyone Albert Einstein? Implications of expertise research for educational practice. *Cognitive Load Theory Conference*, Open University of the Netherlands, Heerlen, March 2-4.
- Schneider, W., Korkel, J., & Weinert, F. E. (1989). Domain-specific knowledge and memory performance: A comparison of high- and low-aptitude children. *Journal of Educational Psychology*, 81, 306-312. doi: 10.1037/0022-0663.81.3.306
- Seufert, T. (2003). Supporting coherence formation in learning from multiple representations. *Learning & Instruction*, 13, 227-237. doi: 10.1016/s0959-4752(02)00022-1
- Shapiro, AM (2004). Prior knowledge must be included as a subject variable in learning outcomes research. *American Educational Research Journal*, 41, 159-189. DOI: 10.3102/00028312041001159
- Simon, D.P., & Simon, H.A. (1978). Individual differences in solving physics problems. In R. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* (pp. 325–348). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Simon, H. A., & Gilmariti, K. (1973). Simulation of memory for chess positions. *Cognitive Psychology*, 5, 29-46. doi: 10.1016/0010-0285(73)90024-8
- Stein, E.S., Garland, D.J., & Muller, J.K. (2010). Air-traffic controller memory. In J.A. Wise, V.D. Hopkin, & D.J. Garland (Eds.). *Handbook of aviation human factors* (2nd Edition). (pp. 21-1 – 21-39). Boca Raton: CRC Press.
- Stelzl, I., Merz, F., Ehlers, T., & Remer, H. (1995). The effect of schooling on the development of fluid and crystallized intelligence: A quasi-experimental study. *Intelligence*, 21, 279-296. doi: 10.1016/0160-2896(95)90018-7
- Sweller, J. (2015). In academe, what is learned, and how is it learned?. *Current Directions in Psychological Science*, 24(3), 190-194.
- Sweller, J., & Cooper, G. (1985). The use of worked examples as a substitute for problem solving in learning algebra. *Cognition & Instruction*, 2, 59-89.
- Sweller, J., & Sweller, S. (2006). Natural information processing systems. *Evolutionary Psychology*, 4, 434-458.
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory*. New York: Springer.
- Tarchi, C. (2010). Reading comprehension of informative texts in secondary school: A focus on direct and indirect effects of reader's prior knowledge. *Learning & Individual Differences*, 20, 415-420. doi: 10.1016/j.lindif.2010.04.002
- Wetzels, S. A. J., Kester, L., & van Merriënboer, J. J. G. (2011). Adapting prior knowledge activation: Mobilisation, perspective taking, and learners' prior knowledge. *Computers in Human Behavior*, 27, 16-21. doi: 10.1016/j.chb.2010.05.004
- Woloshyn, V. E., Pressley, M., & Schneider, W. (1992). Elaborative-interrogation and prior-knowledge effects on learning of facts. *Journal of Educational Psychology*, 84, 115-124. doi: 10.1037/0022-0663.84.1.115
- Yntema, D. B. (1963). Keeping track of several things at once. *Human Factors*, 5, 7-17.
- Yntema, D. B., & Mueser, G. E. (1960). Remembering the present states of a number of variables. *Journal of Experimental Psychology*, 60, 18-22. doi: 10.1037/h0040055