

## **Articuler connaissances en psychologie cognitive et ingénierie pédagogique**

**André Tricot**

Résumé (1000 s max)

Quand elle s'intéresse à l'apprentissage, la psychologie cognitive a pour objectif de comprendre comment les humains apprennent. L'ingénierie pédagogique a pour objectif de fournir des connaissances et des méthodes utiles lors de la conception de situations d'enseignement. Les deux disciplines n'ont donc ni le même objet (apprentissage vs. enseignement), ni le même statut (science vs. ingénierie). L'objectif de cet article est de montrer comment on peut articuler connaissances en psychologie cognitive et ingénierie pédagogique. La théorie de la charge cognitive est utilisée comme exemple pour montrer comment on peut produire des connaissances pour l'ingénierie pédagogique à partir d'hypothèses fondées sur une description précise des structures et des fonctions cognitives impliquées dans les apprentissages. Cette théorie illustre que les connaissances pour l'ingénierie sont conditionnelles : leur mise en œuvre dépend de la situation à concevoir et notamment des connaissances antérieures des élèves.

Abstract

When dealing with learning, cognitive psychology aims to understand how humans learn. Instructional design aims to provide knowledge and methods that are useful when designing teaching situations and materials. The two disciplines therefore have neither the same object (learning vs. instruction), nor the same status (science vs. engineering). The aim of this article is to show how knowledge in cognitive psychology and instructional design can be articulated. The cognitive load theory is used as an example to show how knowledge for instructional design can be produced from hypotheses based on an accurate description of the cognitive structures and functions involved in learning. This theory illustrates that knowledge for design is conditional: its implementation depends on the situation to be designed, and in particular on the students' prior knowledge.

Mots clés

Apprentissage, enseignement, ingénierie pédagogique, psychologie cognitive

Keywords

Learning, teaching, instructional design, cognitive psychology

Title

Linking knowledge in cognitive psychology and instructional design

Notice bio

André Tricot est professeur de psychologie cognitive à l'Université Paul Valéry Montpellier 3 et chercheur au sein du laboratoire Epsilon. Il s'intéresse aux relations entre les mémoires naturelles et

artificielles. Il essaie de comprendre comment la conception d'une mémoire artificielle (un document) peut aider la mémoire naturelle au lieu de la surcharger. Les applications relèvent de l'ingénierie pédagogique, des interactions humain-machine, de l'ergonomie et de la sécurité des transports. Il a été responsable du groupe qui a élaboré les programmes scolaires actuellement en vigueur, pour les trois premières années de l'école primaire en France.

## Introduction

Parmi les connaissances utiles aux enseignant.e.s lorsqu'elles ou ils conçoivent une situation ou un support d'enseignement, certaines relèvent de l'ingénierie (Dessus, 2006 ; Musial & Tricot, 2020), c'est-à-dire de connaissances utiles pour résoudre des problèmes complexes et mal définis. Ces connaissances peuvent relever de l'expérience professionnelle, qui permet de trouver des solutions aux problèmes complexes en utilisant de façon plus ou moins contrôlée des analogies avec des situations déjà mises en œuvre. Ce sont aussi des connaissances qui peuvent être issues de travaux scientifiques, qui peuvent être utilisées de façon plus contrôlée et méthodique. Mais l'activité de conception ne relève pas en elle-même de l'activité scientifique. Voici les principales différences entre ces deux activités (Tricot, 2017) :

- Générer des connaissances scientifiques peut être caractérisé ainsi :
  - (a) c'est une activité où les objectifs sont largement auto-décidés : c'est la ou le chercheur.e qui définit (souvent collectivement) ses objectifs de recherche, elle ou il ne répond pas à une commande.
  - (b) Le rôle du hasard est très important dans la découverte scientifique.
  - (c) La méthode utilisée pour générer cette connaissance est reconnue par une communauté.
  - (d) La validité scientifique de la connaissance est le critère majeur, qui arrive loin devant les questions de temps et de moyens mis en œuvre pour élaborer cette connaissance.
- Pour élaborer une solution à un problème de conception, la personne doit :
  - (a) définir progressivement l'objectif à atteindre à partir d'une commande qui est souvent sous-spécifiée.
  - (b) Cette personne doit tenir compte des moyens qui lui sont fournis, par exemple le temps disponible pour trouver la solution.
  - (c) La personne doit aussi tenir compte des contraintes en utilisant des connaissances et des méthodes pour construire une solution optimale. Une autre solution aurait pu être trouvée si l'on avait donné plus de moyens, ou imposé moins de contraintes.

(d) La validité de la solution réside dans son optimalité : elle est relative à un équilibre entre l'atteinte de l'objectif, l'utilisation des moyens et le respect des contraintes.

L'activité de conception est tout aussi différente de la mise en œuvre d'une solution ou d'une procédure prédéfinies, pour résoudre un problème bien défini.

Les travaux en ingénierie pédagogique (*instructional design*) considèrent que préparer un enseignement relève, le plus souvent, de la conception. La commande est ce qui se trouve dans les programmes scolaires : elle est largement sous-spécifiée. L'objectif est élaboré progressivement, il permet de répondre à la question : « qu'est-ce que mes élèves auront appris à la fin de cette séquence ? à la fin de cette séance ? » La situation d'enseignement est élaborée en fonction de moyens : « quels temps, matériels, lieux sont disponibles ? » Elle tient aussi compte de contraintes : « combien d'élèves dans la classe ? Quelles sont leurs connaissances sur le sujet ? Sont-ils intéressés par ce sujet ? Quelle confiance dans leur capacité à apprendre dans cette discipline ? » Elle utilise des connaissances et des méthodes issues de travaux de recherche en ingénierie pédagogique (un exemple sera longuement développé ci-après). L'objectif est de construire une solution optimale, qui réponde aux questions : « Quelle progression ? Quelles tâches ? Quel engagement dans ces tâches ? Quels supports ? Quelles aides ? Quelle régulation des apprentissages ? Quelle évaluation ? » (Musial & Tricot, 2020).

La combinaison de l'ensemble des objectifs, des contraintes et des moyens qu'il faut prendre en compte conduit à élaborer une solution à chaque fois unique. Il suffit de modifier une contrainte (par exemple le nombre d'élèves dans la classe) et la solution sera probablement différente. En ingénierie il est donc possible de distinguer clairement la connaissance et la solution. La validité d'une connaissance en ingénierie réside dans sa capacité à aider les personnes à élaborer des solutions. La scientificité d'une connaissance en ingénierie relève des critères habituels de la science dans le domaine où la connaissance a été générée. Par exemple, la scientificité d'une connaissance en ingénierie pédagogique qui porterait sur les apprentissages des élèves relève des méthodes utilisées dans la communauté scientifique qui travaille sur les apprentissages (des élèves).

Parmi les travaux en ingénierie pédagogique, certains font peser une double exigence sur les hypothèses qu'ils testent :

- (a) une exigence de validité externe : les hypothèses portent sur l'efficacité de telle manière de présenter un support ou des tâches qui relèvent véritablement des apprentissages scolaires ;
- (b) une exigence de validité interne : les hypothèses sont fondées sur une description précise des structures et des fonctions cognitives impliquées dans les apprentissages.

La théorie de la charge cognitive de John Sweller et la théorie cognitive de l'apprentissage multimédia de Richard Mayer font partie des travaux qui répondent à ces deux exigences. Ces théories s'opposent sur le point (a) que nous venons d'évoquer, aux travaux dans le domaine de la psychologie

cognitive qui ont comme source des expériences de laboratoire. C'est le cas par exemple de travaux sur l'efficacité des apprentissages distribués (avec des interruptions, en plusieurs sessions) vs. massés (sans interruption, en une seule session) (e.g. Donovan & Radosevich, 1999) ou de ceux consacrés au *testing effect* (e.g. Rowland, 2014). Ces travaux ne portent pas au départ sur les apprentissages scolaires mais typiquement sur la mémorisation de listes de mots. Les effets solidement établis au plan expérimental sont ensuite exportés, avec plus ou moins de bonheur, vers les apprentissages scolaires (e.g. McDaniel, Roediger, & McDermott, 2007). Cette démarche qui part des résultats de la psychologie cognitive des apprentissages peut donner lieu à des développements très aboutis en ingénierie pédagogique comme dans le grand classique de Gagne et Briggs (1974). La théorie de la charge cognitive ou celle de l'apprentissage multimédia s'opposent aussi sur le point (b) à de nombreux travaux : la recherche en ingénierie pédagogique n'a pas besoin, dans la plupart des cas, d'une architecture cognitive qui décrit précisément comment les humains apprennent. Beaucoup plus centrée sur l'activité de conception d'un enseignement, elle propose des méthodes pour celle-ci, c'est-à-dire des manières de définir des objectifs, des moyens et des contraintes, ainsi que des procédures pour atteindre ces objectifs en utilisant ces moyens et en prenant en compte ces contraintes. Cette approche est typiquement celle du modèle ADDIE (Schlegel, 1995).

Je vais maintenant prendre l'exemple de la théorie de la charge cognitive pour illustrer les connaissances que ce type de recherche en ingénierie pédagogique peut générer.

## **La théorie de la charge cognitive**

### ***Une architecture cognitive***

Dans deux publications récentes (Puma & Tricot, 2019, 2021), nous avons décrit comment cette théorie a dû, depuis le milieu des années 1980, évoluer et faire évoluer l'architecture cognitive sur laquelle elle se fonde pour tenir compte des résultats empiriques contradictoires qu'elle obtenait. Aujourd'hui, cette théorie est fondée sur une architecture cognitive avec une mémoire à long terme à capacité illimitée et une mémoire de travail à capacité limitée, selon les cinq principes suivants (Sweller, 2016).

### ***Une mémoire à long terme à capacité illimitée***

Notre mémoire à long terme stocke une très grande quantité de connaissances. Ces connaissances peuvent être extrêmement complexes ou plus simples, sans que l'effort que l'on doit fournir pour apprendre ne soit directement lié à la complexité perçue de la connaissance. Une connaissance extrêmement complexe, comme la reconnaissance de visages, s'apprend sans effort cognitif conscient. L'essentiel de l'expertise réside dans l'activation de connaissances en mémoire à long terme, et non

dans des traitements ou des raisonnements profonds (e.g. les grands maîtres aux échecs raisonnent moins que les novices, mais utilisent leurs connaissances en mémoire à long terme).

#### *Le principe d'emprunt et de réorganisation*

Beaucoup de connaissances secondaires, dans le sens où elles ont été créées récemment par les humains, sont empruntées à d'autres humains. Les humains ont une capacité naturelle à coopérer qui leur permet d'apprendre par enseignement et par imitation. « Les *homo sapiens* sont adaptés pour agir et penser de façon coopérative au sein de groupes culturels, et, en effet, toutes les grandes réalisations cognitives humaines (technologies complexes, symboles mathématiques et linguistiques, institutions humaines, ...) sont les produits non pas d'individus isolés mais d'individus en interaction » (Tomasello, 2015). Les connaissances primaires, issues de la longue évolution de notre espèce, fournissent les habiletés nécessaires pour ce type d'emprunt (e.g. aptitude à imiter et écouter les autres). Par exemple, la lecture est une connaissance secondaire, qui est fondée sur l'habileté primaire à écouter et à segmenter les sons de la parole. L'acquisition de connaissances implique invariablement un certain niveau de réorganisation des connaissances en mémoire à long terme (i.e. accommodation au sens de Piaget, 1967).

#### *Le hasard comme principe de genèse*

Si la plupart des informations stockées en mémoire à long terme ont été empruntées à autrui, il nous arrive de notre retrouver dans une situation où personne n'est disponible pour nous fournir ces connaissances. Nous devons alors les générer par l'activité de résolution des problèmes. Sans aucune indication pour résoudre le problème, nous n'avons pas d'autres choix que de procéder par analogie avec une situation connue, ou par essais au hasard, puis nous évaluons l'effet de notre tentative pour en vérifier l'efficacité. Les actions efficaces sont retenues et celles qui sont inefficaces sont rejetées.

#### *Les limites étroites du principe de changement*

La mémoire de travail (synonyme de conscience) a une capacité très limitée en quantité et en temps, pour traiter l'information en provenance des registres sensoriels, pour éviter le traitement d'une infinité de possibilités d'actions et de compréhensions contenues dans notre environnement. Nous examinons rapidement un nombre limité de combinaisons possibles. Seules celles qui « font sens » sont maintenues plus que quelques secondes (celles qui ont l'effet voulu et celles qui mobilisent des connaissances en mémoire à long terme).

#### *Le principe environnemental d'organisation et de liaison*

L'administrateur central de la mémoire de travail est une fonction des connaissances en mémoire à long terme (comme dans le modèle d'Ericsson & Kintsch, 1995). La fonction de la mémoire de travail à long terme est de fournir un lien organisé à l'environnement. Le but de l'information à long terme

(la connaissance) est de guider l'activité. Le principe environnemental d'organisation et de liaison permet de transférer très facilement et rapidement d'énormes quantités d'informations de la mémoire à long terme à la mémoire de travail et d'utiliser ces connaissances pour comprendre les situations (e.g. en lecture)

### ***Théorie de la charge cognitive et ingénierie pédagogique***

Cette architecture cognitive et ces principes fournissent un cadre théorique au sein duquel on peut analyser l'exigence cognitive de chaque situation d'apprentissage scolaire comme relevant de trois sources (Sweller, Van Merriënboer, & Paas, 1998, 2019) :

- la charge intrinsèque, liée aux informations à traiter pour réaliser la tâche ;
- la charge extrinsèque, liée aux informations inutiles pourtant présentes sur les supports ;
- la charge essentielle, liée à l'apprentissage lui-même, c'est-à-dire à la transformation de connaissances.

Au sein de cette théorie, depuis le milieu des années 1980 (par exemple Owen & Sweller, 1985) entre 7 000 et 8 000 expérimentations randomisées, où un groupe expérimental est comparé à un groupe contrôle, les deux groupes étant soumis au même prétest et au même posttest de connaissances, ont essayé de mettre au jour des « effets » pour réduire la charge extrinsèque, voire la charge intrinsèque, afin de libérer le plus de ressources cognitives possible pour l'apprentissage lui-même. Chaque effet obtenu est soumis à la réplication expérimentale, dans des pays différents, avec des élèves d'âge différents, dans des disciplines scolaires différentes. Dans la partie suivante, je présente les principaux effets obtenus et j'indique les résultats des méta-analyses disponibles qui portent sur ces effets.

### ***Les effets mis en évidence au sein de la théorie de la charge cognitive***

#### *L'effet de non-spécification du but*

Il est généralement plus efficace de ne pas trop spécifier le but d'un problème comme celui présenté dans la figure 1 (Sweller & Levine, 1982). Un énoncé comme « Calculez la valeur d'autant d'angles que vous pourrez » permet un meilleur apprentissage qu'un énoncé « Calculez la valeur de l'angle DBE ». En effet, ce type d'énoncé enlève une exigence de la tâche : celle qui consiste à identifier que l'angle DBE n'est pas calculable directement, et qu'il faut donc commencer par calculer l'angle ABC. L'apprentissage de la mise en œuvre de la somme des angles du triangle et des angles opposés par le sommet est le même.

**Problème sans but spécifié :** Dans la figure ci-contre, calculez autant d'angles que vous pouvez.

**Problème conventionnel :** Dans la figure ci-contre, calculez la valeur de l'angle DBE.

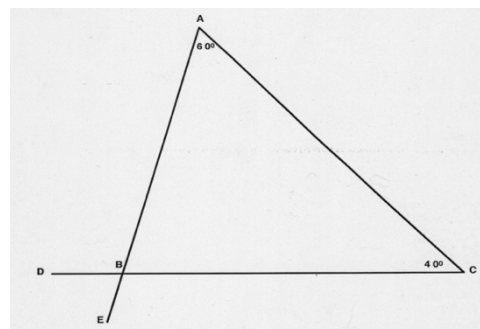


Figure 1. Résoudre un problème sans but spécifié réduit la charge cognitive intrinsèque.

#### *L'effet du problème résolu ou de l'exemple à travailler*

Il est généralement plus efficace d'étudier un problème résolu que de résoudre un problème pour apprendre : par exemple, pour le problème présenté dans la figure 2, on peut, en dessous de l'énoncé, écrire la solution du problème, qui passe par la somme des angles d'un triangle qui est égale à  $180^\circ$  ; puis par les deux angles opposés par le sommet qui sont égaux. Si on donne à des élèves cinq problèmes résolus puis un problème à résoudre, *versus* six problèmes à résoudre, le sixième problème sera mieux réussi dans la première condition que dans la seconde. Cet effet, peut-être parce qu'il peut paraître contrintuitif, a été répliqué plusieurs centaines de fois depuis Sweller et Cooper (1985 ; voir aussi la synthèse de Renkl, 2013) dans des disciplines scientifiques, technologiques, littéraires et linguistiques. Par exemple, les élèves rédigent de meilleures rédactions après avoir étudié une rédaction que s'ils rédigent directement (Kyun, Kalyuga, & Sweller, 2013). Ils apprennent plus de concepts et de mots dans une langue vivante étrangère si on leur propose de lire un texte traduit qu'un texte non traduit (Roussel, Joulia, Tricot, & Sweller, 2016). La méta-analyse de Crissman (2006) montre une taille d'effet moyenne ( $d = 0,57$ ) quand l'étude de problèmes résolus est comparée à la résolution de problèmes. Les problèmes résolus ne sont efficaces que pour les élèves novices.

#### **Problème résolu, à étudier**

Dans la figure ci-contre, trouvez la valeur de l'angle DBE.

Solution : Angle ABC =  $180^\circ - \text{Angle BAC} - \text{Angle BCA}$

(La somme des angles d'un triangle est égale à  $180^\circ$ )

$$= 180^\circ - 60^\circ - 40^\circ = 80^\circ$$

Angle DBE = Angle ABC (deux angles opposés par le sommet sont égaux) =  $80^\circ$

### Problème à résoudre

Dans la figure ci-contre, calculez la valeur de l'angle DBE.

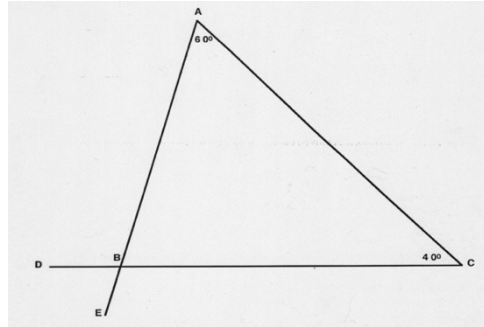


Figure 2. Étudier un problème résolu réduit la charge cognitive intrinsèque et améliore l'apprentissage.

### L'effet du problème à compléter

Il est généralement plus efficace d'alterner les problèmes résolus et les problèmes à résoudre, que de ne présenter que des problèmes résolus (van Merriënboer & Krammer, 1987). Les problèmes à compléter (solution partielle donnée ; par exemple la première étape et non les suivantes) peuvent agir comme un substitut à cette alternance.

### L'effet d'attention partagée

Il est généralement plus efficace de présenter la solution de façon intégrée au problème que de façon adjacente (Tarmizi & Sweller, 1988 ; voir fig. 3). Toutes les sources inutiles (e.g. images décoratives) nuisent à l'apprentissage. La méta-analyse de Ginns (2006) confirme l'efficacité de l'intégration des informations et montre un effet important ( $d = 0,85$ ), confirmé ensuite par Schroeder et Cenkcı (2018) ( $g = 0,63$ ).

### Présentation séparée

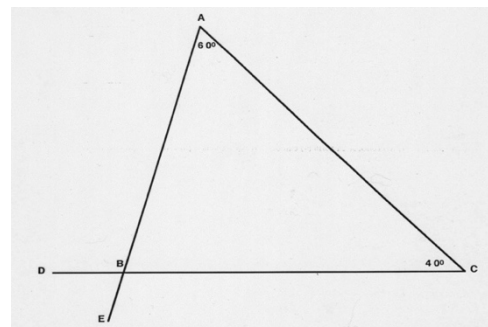
Dans la figure ci-contre, trouvez la valeur de l'angle DBE.

Solution : Angle ABC =  $180^\circ - \text{Angle BAC} - \text{Angle BCA}$

(La somme des angles d'un triangle est égale à  $180^\circ$ )

$$= 180^\circ - 60^\circ - 40^\circ = 80^\circ$$

Angle DBE = Angle ABC (deux angles opposés par le sommet sont égaux) =  $80^\circ$





### Présentation intégrée

Dans la figure ci-dessous, calculez la valeur de l'angle DBE.

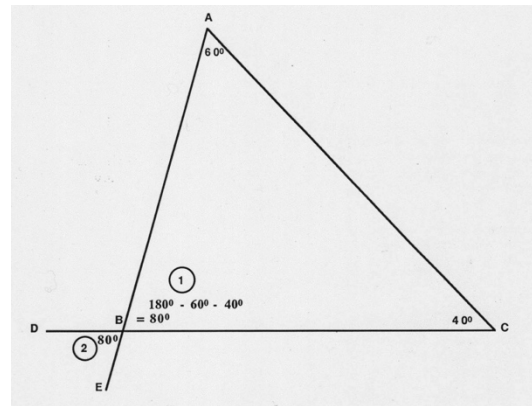


Figure 3. Quand la solution du problème est intégrée dans la figure, cela réduit la charge extrinsèque.

### L'effet de modalité

Lorsque la compréhension implique l'intégration de multiples sources d'information, il est généralement plus efficace de présenter les deux sources d'information dans des modalités différentes (auditive et visuelle), plutôt que de présenter le matériel d'une façon physiquement intégrée (visuelle seule ; Mousavi, Low, & Sweller, 1995). La méta-analyse de Ginns (2005) confirme la supériorité des présentations à deux modalités et montre un effet important ( $d = 0,72$ ).

### L'effet de redondance

L'intégration physique ou l'effet de modalité sont efficaces si et seulement si les différentes sources d'information sont complémentaires (Chandler & Sweller, 1991). L'information redondante au contraire détériore généralement l'apprentissage. Par exemple, le même énoncé verbal présenté sous une forme écrite et sous une forme orale est redondant. Cependant, la méta-analyse d'Adesope et Nesbitt (2012) montre qu'un effet positif de la redondance est obtenu chez les novices ( $d = 0,29$ ).

### L'effet de l'interactivité entre éléments

Les techniques précédentes sont efficaces si et seulement si la charge cognitive intrinsèque est élevée, *i.e.* s'il y a de nombreux éléments à mettre en relation pour comprendre la situation (Sweller, 1994). En revanche, avec une tâche simple (apprendre des définitions mathématiques puis répondre à une question), les élèves dans la condition problème à résoudre apprennent mieux que ceux à qui on présente le problème résolu.

### L'effet de variété

Souvent, l'objectif d'apprentissage est de généraliser la connaissance, de l'appliquer à des problèmes divers. Il est plus efficace de faire varier les problèmes, avec parcimonie en début d'apprentissage, plutôt que de présenter des exemples très différents entre eux dès le début. Plus les

problèmes varient, plus la charge cognitive augmente, ce qui permet d'apprendre davantage, à condition que la mémoire de travail dispose de ressources suffisantes pour faire face à cette augmentation. Au départ, l'effet de variété semblait contredire tous les effets de charge cognitive précédemment rapportés, car il combine une augmentation plutôt qu'une diminution de la charge cognitive avec des résultats d'apprentissage plus élevés. Mais Paas et van Merriënboer (1994) ont obtenu un effet d'interaction entre la présentation des problèmes (problèmes résolus, problèmes conventionnels) et la variabilité (faible, élevée) : quand on fait baisser la charge (avec les problèmes résolus), les élèves apprennent mieux avec des problèmes qui varient ; quand la charge est élevée (avec des problèmes conventionnels) les élèves apprennent mieux avec des problèmes qui ne varient pas. L'effet de variété a été répliqué depuis (Likourezos, Kalyuga, & Sweller, 2019).

#### *L'effet de disparition progressive du guidage*

Une séquence d'enseignement efficace peut consister en des problèmes initialement résolus, suivis par des problèmes à compléter, et enfin par des problèmes à résoudre, sans aucune aide. Pour les novices, les problèmes résolus améliorent l'apprentissage. Avec l'augmentation de l'expertise, ces mêmes activités peuvent devenir redondantes et imposer une charge cognitive inutile. Au-delà d'un certain point, les exemples travaillés sont contreproductifs et il convient de les remplacer par des problèmes à résoudre. La pédagogie par projet est généralement peu efficace avec des étudiants qui démarrent dans une filière (comparativement à une approche avec des cours magistraux et des travaux dirigés), alors qu'elle est efficace avec des étudiants avancés dans la même filière (Tuovinen & Sweller, 1999).

#### *L'effet d'imagination*

Imaginer qu'on réalise une procédure / comment on va la réaliser, peut parfois être aussi efficace que la mise en œuvre effective (Cooper, Tindall-Ford, Chandler, & Sweller, 2001). Cet effet bien connu en sport individuel et dans l'apprentissage de gestes a été répliqué pour des apprentissages avec une composante cognitive forte. Cependant, cette consigne d'imagination ne fonctionne qu'avec des apprenants avancés ; avec des novices, la consigne d'étude d'un problème résolu est toujours plus efficace. Pour imaginer la façon dont on va résoudre un problème, il faut déjà de solides connaissances.

#### *L'effet d'autoexplication*

Devoir s'expliquer à soi-même une procédure ou un concept est souvent plus efficace que simplement essayer de faire ou de comprendre. Cet effet a été préalablement obtenu par Chi, *et al.* (1989). Il a été importé au sein de la théorie de la charge cognitive par Renkl, *et al.* (1998). Les tâches d'étude de problèmes résolus peuvent être si peu engageantes que les élèves les traitent de façon superficielle, ce qui ne produit alors aucun effet positif sur l'apprentissage. La tâche d'étude d'un

exemple peut être présentée avec une explication qui suscite des auto-explications élaborées, de la part des élèves.

#### *L'effet de l'information transitoire*

Le fait qu'une information soit « transitoire » (par exemple un document sonore, une vidéo, par opposition à une information « fixe » comme un texte ou une image) peut altérer l'apprentissage, notamment quand la connaissance à apprendre est séquentielle : l'oral continu (enregistré) est moins efficace que l'écrit ; les animations continues, sans pause, sont souvent moins efficaces que les images fixes (Leahy & Sweller, 2011). L'information transitoire impose à l'élève, qui ne peut pas réguler son activité, de réaliser la tâche / traiter le support en même temps qu'il apprend. Il ne s'agit donc nullement de remettre en cause l'efficacité des animations pour apprendre, mais de souligner l'exigence cognitive de l'information transitoire. Il serait donc efficace d'introduire des pauses pendant la présentation d'une vidéo ou d'un fichier son. La méta-analyse de Rey, *et al.* (2019) confirme un effet modéré de l'introduction de pauses sur la rétention ( $d = 0,42$ ) et le transfert ( $d = 0,37$ ) si et seulement si les pauses sont commandées par le système. La méta-analyse de Berney et Bétrancourt (2016) montre la même chose : les animations sont plus efficaces que les images statiques lorsque le rythme (les pauses) de l'animation est imposé et non lorsqu'il est contrôlé par l'apprenant ; sinon, l'effet positif des animations est faible ( $g = 0,23$ ). La méta-analyse de Höffler et Leutner (2007) montre une supériorité des images animées, mais avec une taille d'effet modérée ( $d = 0,37$ ). Les analyses indiquent des tailles d'effet plus importantes lorsque l'animation est pertinente plutôt que décorative ( $d = 0,40$ ). Ces auteurs montrent aussi que le contrôle du défilement a un impact négatif sur l'apprentissage. L'effet positif de la vidéo est obtenu lorsque le défilement de l'animation est piloté par le système ( $g = 0,31$ ) mais pas quand l'animation est contrôlée par l'élève.

#### *L'effet de mémoire de travail collective*

Quand une tâche est complexe, le travail en groupe est plus efficace que le travail individuel. Quand la tâche est simple, le travail individuel est plus efficace (Kirschner, Paas, & Kirschner, 2009). Dit autrement, apprendre en groupe est efficace si et seulement si le même apprentissage est trop exigeant quand il est réalisé seul. Dans les autres cas, le travail en groupe impose une charge cognitive inutile. Kirschner, Sweller, Kirschner, et Zambrano (2018) ont publié une revue de la littérature sur les apprentissages collaboratifs qui recense les facteurs pouvant avoir un effet sur la charge cognitive et, conséquemment, sur la qualité de l'apprentissage réalisé (tableau 2).

<b>Principe</b>	<b>Description</b>
<b>Complexité de la tâche</b>	Une collaboration efficace se produit lorsque la tâche est suffisamment complexe pour justifier le surcroît de travail
<b>Guidage et soutien</b>	Lorsque les élèves font face à une nouvelle situation ou à un nouvel environnement de collaboration, il faut guider la réalisation de la tâche

<b>Expertise du domaine</b>	Plus l'expertise des membres du groupe dans le domaine de contenu est élevée, plus la collaboration est aisée
<b>Compétences en matière de collaboration</b>	Plus l'expertise des membres du groupe pour collaborer est élevée, plus la collaboration est aisée
<b>Taille du groupe</b>	Plus le groupe est grand plus la collaboration est difficile
<b>Rôles au sein du groupe</b>	Si chacun sait précisément ce qu'il a à faire, alors la collaboration est aisée
<b>Composition du groupe</b>	Plus la répartition des connaissances entre les membres du groupe est hétérogène, plus la collaboration est difficile
<b>Expérience antérieure de la tâche</b>	Plus les élèves ont de l'expérience de la tâche, plus ils coordonnent leurs actions sur les tâches et plus la collaboration est aisée
<b>Expérience antérieure du groupe</b>	Plus les élèves ont de l'expérience à travailler ensemble plus la collaboration est aisée

Tableau 2. Les facteurs ayant un effet de charge cognitive sur l'apprentissage en groupe, d'après Kirschner, *et al.* (2019).

### *L'effet du mouvement humain*

Il est souvent plus efficace d'apprendre un mouvement ou un geste à partir d'une animation plutôt que d'une image statique (Paas & Sweller, 2012). Cet effet serait lié à notre capacité primaire d'apprentissage par imitation. Le fait que cette capacité soit primaire limiterait la charge cognitive. Cette idée a été confirmée par une méta-analyse de Höffler et Leutner (2007), qui a montré un meilleur apprentissage lorsque les animations étaient très réalistes ( $d = 0,76$ ) et que la connaissance des procédures motrices était impliquée ( $d = 1,06$ ).

### *L'effet d'épuisement des ressources en mémoire de travail*

Chen, Castro-Alonso, Paas, et Sweller (2018) ont comparé les performances obtenues par les élèves du primaire dans des conditions d'apprentissage massé et distribué. Les chercheurs ont aussi demandé aux participants d'effectuer un test d'empan complexe de mémoire de travail (impliquant le traitement et la mémorisation) à la fin des séances d'apprentissage. Les résultats ont confirmé l'effet classique attendu (apprentissage distribué > massé). Chen, *et al.* ont également observé que les élèves de la condition massée obtiennent des performances inférieures au test de mémoire de travail. Les auteurs interprètent ce résultat comme un effet d'épuisement des ressources de la mémoire de travail. L'année suivante, Leahy et Sweller (2019) ont reproduit les résultats dans une série d'expériences sur l'effet *testing*. Ils ont montré que les performances d'apprentissage obtenues dans un posttest différé (par rapport à un posttest immédiat) étaient associées à de meilleures performances au test de mémoire de travail. Ils ont interprété cette double performance comme liée à une récupération des ressources de la mémoire de travail. Ainsi, dans ces deux publications récentes, Sweller et ses collègues argumentent en faveur d'un effet d'épuisement des ressources de la mémoire de travail général ; pour toute tâche complexe, épuisant les ressources et consommant du temps, l'effet devrait être obtenu, car il implique une partie centrale de l'architecture cognitive humaine : la mémoire de travail. Si l'idée

de l'épuisement des ressources cognitives est soutenue empiriquement, les auteurs cités ci-dessus n'expliquent pas ce qui est épuisé ni quels mécanismes régissent cet épuisement.

*L'effet de renversement dû à l'expertise*

Les effets précédents fonctionnent si et seulement si les élèves ont peu de connaissances dans le domaine. Quand les apprenants sont avancés dans le domaine, ces effets sont inefficaces, puis nocifs avec les experts. Ce dernier effet, découvert il y a plus de 20 ans (Kalyuga, Chandler, & Sweller, 1998), a donné lieu à une première synthèse et théorisation 5 ans plus tard (Kalyuga, Ayres, Chandler, & Sweller, 2003) puis à un numéro spécial (Kalyuga & Renkl, 2010). On peut appliquer l'effet de renversement dû à l'expertise à n'importe quel effet obtenu dans le cadre de la théorie de la charge cognitive. Cela permet de prédire, par exemple, que les élèves les plus avancés seront plus efficaces dans leur apprentissage avec un problème à résoudre, tandis que les élèves les moins avancés seront plus efficaces avec le même problème, mais présenté avec sa solution, pour une tâche d'étude du problème résolu (Kalyuga, Chandler, Tuovinen, & Sweller, 2001), etc. avec les autres effets. Ainsi, au sein d'une même classe, des élèves différents peuvent réaliser le même apprentissage, avec les mêmes problèmes, mais présentés différemment. On parvient de cette manière à faire porter la différenciation sur la tâche et le support, mais pas sur la connaissance à apprendre.

<b>Avec les élèves les plus en difficultés pour l'apprentissage visé</b>	<b>Avec les élèves les plus avancés pour le même apprentissage visé</b>
Ne pas trop spécifier le but du problème, indiquer plutôt à l'élève qu'il doit atteindre tous les buts qu'il peut atteindre, faire tout ce qu'il sait faire	Spécifier le but du (même) problème
Donner aux élèves le problème résolu et lui demander d'étudier la solution	
Alterner les problèmes résolus et les problèmes à résoudre	Donner le (même) problème à résoudre
Donner le problème avec une solution partielle	
Intégrer physiquement les informations que l'élève devra mettre en relation mentalement pour rendre cette information intelligible	
Éliminer toutes les informations inutiles ou décoratives	Éviter la redondance : ne pas répéter inutilement ce qui peut être présenté une seule fois d'une seule manière
Présenter les sources d'information que l'élève devra mettre en relation dans des modalités différentes (auditive et visuelle)	
Si l'information à présenter est complexe (beaucoup d'éléments et de relations), alors la présenter progressivement, partie par partie	Présenter le tout d'emblée plutôt que par parties, pour que l'élève puisse apprendre les relations entre les sections
Varier les exemples, avec parcimonie en début d'apprentissage	Présenter l'information avec beaucoup de variabilité pour que l'élève puisse apprendre quelles variables sont pertinentes et lesquelles ne le sont pas
Faire disparaître le guidage progressivement	D'emblée, ne pas guider, laisser l'élève explorer librement

Demander à l'élève de mémoriser les relations les plus importantes	Demander à l'élève de s'auto-expliquer les relations les plus importantes
Ne pas présenter d'information transitoire continue (oral, vidéo) ; présenter plutôt des informations statiques, faire des pauses aux moments pertinents et guider l'attention sur les parties pertinentes Cette restriction concerne moins l'apprentissage de mouvements et de gestes	Présenter de l'information transitoire continue (oral, vidéo)
Proposer du travail en groupe (selon un scénario précis) quand l'apprentissage visé est éloigné des élèves ; sinon, le travail peut être réalisé seul	Si l'accès aux connaissances d'autrui est nécessaire, alors le travail en groupe est utile. Sinon, le travail individuel peut être mis en œuvre.
Mettre en exergue ce qui est important Expliciter les liens entre les parties d'un tout	Ne pas tout expliquer : engager les élèves dans des activités de production d'inférences, d'hypothèses, de conjectures

Tableau 3. Présentation résumée des principaux effets obtenus au sein de la théorie de la charge cognitive, selon l'effet de renversement dû à l'expertise

### Discussion : les connaissances en ingénierie pédagogique

Les travaux conduits au sein de la théorie de la charge cognitive ont contribué à la prise de conscience des dangers d'une approche sans nuances des apprentissages par découverte ou par problèmes, une sorte de constructivisme pédagogique qui fournirait la matrice à toute situation d'enseignement (Kirschner, Sweller, & Clark, 2006 ; Tobias, & Duffy, 2009). La théorie de la charge cognitive a contribué à montrer que plus les élèves sont éloignés du but d'apprentissage, plus ils ont besoin de guidage. Réciproquement, quand les élèves sont proches du but d'apprentissage, le fait de moins les guider, de les conduire à produire des inférences ou des hypothèses, mais aussi à interagir avec des pairs, améliore les apprentissages (hors de la théorie de la charge cognitive, bien d'autres travaux ont aussi montré cela : Chi & Wylie, 2014 ; McNamara, *et al.*, 1996 ; Fiorella & Mayer, 2015). La théorie de la charge cognitive relève de l'ingénierie dans le sens où les connaissances fournies sont conditionnelles : leur mise en œuvre dépend de la situation à concevoir. J'ai donc longuement insisté dans cet article sur un aspect de la situation d'enseignement : le niveau de connaissances des élèves. Selon ce niveau, une situation d'enseignement avec un problème résolu sera plus efficace ou moins efficace qu'un problème à résoudre, une animation sera plus efficace ou moins efficace qu'une suite d'images statiques ou qu'une animation avec des pauses conçues par l'enseignant.e. L'efficacité de l'animation dépend aussi de la connaissance à apprendre, etc.

Les critiques de la théorie de la charge cognitive sont nombreuses. L'une d'elle consiste à affirmer que les effets obtenus ont déjà été montrés par Vygotsky ou, en tout cas, que la « zone proximale de développement » permet d'expliquer les effets obtenus. Il y a fort à parier que c'est à cause du

caractère souvent assez vague de l'application de cette notion vygotskienne (Dessus & Charroud, 2017). La théorie de la charge cognitive ne produit pas des recommandations générales mais des effets précis. Plus encore, contrairement à la théorie de Vygotsky, elle teste des hypothèses qui ont été soumises à la réfutation empirique. La théorie de la charge cognitive est donc une théorie scientifique au sens le plus classique : elle est fondée sur des principes qui permettent de générer des hypothèses réfutables, qui donnent lieu à des expérimentations, dont les résultats font évoluer la théorie.

La théorie de la charge cognitive n'est cependant pas une théorie de la cognition, dans le sens où elle ne cherche pas à modéliser la mémoire de travail ou l'architecture cognitive humaine, pas plus qu'elle n'essaie de comprendre l'évolution de cette architecture. La théorie de la charge cognitive emprunte aux sciences cognitives des concepts, pour aider à la conception. Quand ces concepts évoluent, la théorie de la charge cognitive intègre ou non ces évolutions, selon ses propres besoins. Par exemple, la première version de cette théorie (Sweller, 1988) était plus ou moins explicitement fondée sur le modèle d'Atkinson et Schiffrin (1968), la seconde version était explicitement basée sur le modèle de Baddeley (1992), car ce modèle permettait d'expliquer l'effet de modalité et l'effet de redondance. Le modèle de Baddeley étant incapable de rendre compte de l'effet de renversement dû à l'expertise, la théorie de la charge cognitive a évolué, se référant au modèle d'Ericsson et Kintsch (1995). Mais ces modèles ne sont pas capables d'expliquer l'effet de l'information transitoire ni l'effet d'épuisement des ressources en mémoire de travail. Puma et Tricot (2019) ont montré qu'en se basant sur le modèle de la mémoire de travail dit de « partage temporel des ressources » (TBRS ; Barrouillet & Camos, 2014), la théorie de la charge cognitive serait mieux équipée pour expliquer ces résultats récents. Mieux, elle disposerait d'une conception plus juste de la charge extrinsèque, qui ne dépend pas de la quantité d'informations non pertinentes présentes dans la situation (impossible à estimer, puisque chaque individu peut traiter ou pas telle ou telle information non pertinente), mais du ratio temporel dévolu au traitement de ces informations non pertinentes, relativement au temps total consacré à la tâche (Puma, Matton, Paubel, & Tricot, 2019).

L'objet de la théorie de la charge cognitive est donc bien de fournir des connaissances utiles à la conception de situations d'enseignement. Elle relève des sciences de l'ingénieur et non des sciences fondamentales. Sa validité externe réside dans sa capacité à améliorer des situations d'enseignement. Sa validité interne réside dans sa capacité à fonder théoriquement des hypothèses testées expérimentalement. L'amélioration de la validité externe constitue un enjeu majeur, dans le sens où l'on n'a pas la preuve, par exemple, que des enseignants que l'on formerait à l'utilisation de la théorie concevraient des situations d'enseignement plus efficaces ou même s'ils accepteraient d'utiliser quotidiennement ces connaissances. Pour le dire en d'autres termes, si l'efficacité de cette ingénierie est attestée empiriquement, son utilisabilité et son acceptabilité ne le sont pas encore. Il n'est pas

certain cependant que ce soit aux chercheurs qui génèrent des connaissances en ingénierie de s'occuper de l'évaluation de l'utilisabilité et de l'acceptabilité de ces connaissances.

### Références bibliographiques

- Adesope, O.O., & Nesbit, J.C. (2012). Verbal redundancy in multimedia learning environments : A meta-analysis. *Journal of Educational Psychology*, 104, 250-263.
- 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* (vol. 2, pp. 89-195). New York : Academic Press.
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255, 556–559.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2014). *Working memory : Loss and reconstruction*. Londres : Psychology Press.
- Berney, S., & Bétrancourt, M. (2016). Does animation enhance learning ? A meta-analysis. *Computers & Education*, 101, 150-167.
- Chandler, P., & Sweller, J. (1991). Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition & Instruction*, 8, 293-332.
- Chen, O., Castro-Alonso, J.C., Paas, F., & Sweller, J. (2018). Extending cognitive load theory to incorporate working memory resource depletion : Evidence from the spacing effect. *Educational Psychology Review*, 30, 483–501.
- Chi, M.T., & Wylie, R. (2014). The ICAP framework : Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational Psychologist*, 49, 219-243.
- Chi, M.T., Bassok, M., Lewis, M.W., Reimann, P., & Glaser, R. (1989). Self-explanations : How students study and use examples in learning to solve problems. *Cognitive Science*, 13, 145–182.
- Cooper, G., Tindall-Ford, S., Chandler, P., & Sweller, J. (2001). Learning by imagining. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 7, 68-82.
- Crissman, J.K. (2006). *The design and utilization of effective worked examples : A meta-analysis*. Thèse de doctorat en sciences de l'éducation, The University of Nebraska-Lincoln.
- Dessus, P. (2006). Quelles idées sur l'enseignement nous révèlent les modèles d'Instructional Design ? *Schweizerische Zeitschrift für Bildungswissenschaften*, 28(1), 137-157.
- Dessus, P., & Charroud, C. (2017). Quelques mythes dans la recherche en éducation. Inspé, Université Grenoble Alpes. Repéré à [http://espe-rtd-reflexpro.u-ga.fr/docs/sciedu-general/fr/latest/mythes\\_education.html](http://espe-rtd-reflexpro.u-ga.fr/docs/sciedu-general/fr/latest/mythes_education.html)
- Donovan, J.J., & Radosevich, D.J. (1999). A meta-analytic review of the distribution of practice effect : Now you see it, now you don't. *Journal of Applied Psychology*, 84(5), 795.



- Ericsson, K.A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, 102, 211–245.
- Fiorella, L., & Mayer, R.E. (2015). Learning as a generative activity : Eight learning strategies that promote understanding. Cambridge : Cambridge University Press.
- Gagne, R.M., & Briggs, L.J. (1974). *Principles of instructional design*. Oxford : Holt, Rinehart & Winston.
- Geary, D.C. (2008). An evolutionarily informed education science. *Educational Psychologist*, 43, 179-195.
- Ginns, P. (2005). Meta-analysis of the modality effect. *Learning & Instruction*, 15, 313–331.
- Ginns, P. (2006). Integrating information : A meta-analysis of the spatial contiguity and temporal contiguity effects. *Learning & instruction*, 16, 511-525.
- Höffler, N., & Leutner, D. (2007). Instructional animation versus static pictures : A meta-analysis. *Learning & Instruction*, 17, 722–738.
- Kalyuga, S., & Renkl, A. (Eds.) (2010). Special issue : Expertise reversal effect. *Instructional Science*, 38(3).
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P., & Sweller, J. (2003). The expertise reversal effect. *Educational Psychologist*, 38, 23–31.
- Kalyuga, S., Chandler, P., & Sweller, J. (1998). Levels of expertise and instructional design. *Human Factors*, 40, 1-17.
- 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.
- Kirschner, F., Paas, F., & Kirschner, P.A. (2009). A cognitive load approach to collaborative learning : United brains for complex tasks. *Educational Psychology Review*, 21, 31-42.
- Kirschner, P.A., 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.
- Kirschner, P.A., Sweller, J., Kirschner, F., & Zambrano, J. (2018). From cognitive load theory to collaborative cognitive load theory. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 13, 213-233.
- Kyun, S., Kalyuga, S., & Sweller, J. (2013). The effect of worked examples when learning to write essays in English literature. *The Journal of Experimental Education*, 81, 385-408.
- Leahy, W., & Sweller, J. (2011). Cognitive load theory, modality of presentation and the transient information effect. *Applied Cognitive Psychology*, 25, 943-951.
- Leahy, W., & Sweller, J. (2019). Cognitive load theory, resource depletion and the delayed testing effect. *Educational Psychology Review*, 1-22.
- Likourezos, V., Kalyuga, S., & Sweller, J. (2019). The variability effect : When instructional variability is advantageous. *Educational Psychology Review*, 31, 479-497.

- McDaniel, M.A., Roediger, H.L., & McDermott, K.B. (2007). Generalizing test-enhanced learning from the laboratory to the classroom. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14(2), 200-206.
- McNamara, D.S., Kintsch, E., Songer, N.B., & Kintsch, W. (1996). Are good texts always better? Interactions of text coherence, background knowledge, and levels of understanding in learning from text. *Cognition & Instruction*, 14, 1-43.
- Merrill, M.D., & Twitchell, D. (1994). *Instructional design theory*. Englewood Cliff, NJ : Educational Technology Publications.
- Mousavi, S.Y., Low, R., & Sweller, J. (1995). Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes. *Journal of Educational Psychology*, 87, 319.
- Musial, M., & Tricot, A. (2020). *Précis d'ingénierie pédagogique*. Bruxelles : De Boeck.
- Owen, E., & Sweller, J. (1985). What do students learn while solving mathematics problems? *Journal of Educational Psychology*, 77, 272-284.
- Paas, F., & Sweller, J. (2012). An evolutionary upgrade of cognitive load theory : Using the human motor system and collaboration to support the learning of complex cognitive tasks. *Educational Psychology Review*, 24, 27-45.
- Paas, F., & van Merriënboer, J.J.G. (1994a). Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills : A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 86, 122-133.
- Piaget, J. (1967). *Biologie et connaissance : essai sur les relations entre les régulations organiques et les processus cognitifs*. Paris : Gallimard.
- Puma, S., & Tricot, A. (2019). Cognitive load theory and working memory models : Comings and goings. In S. Tindall-Ford, S. Agostinho & J. Sweller (Eds.), *Advances in Cognitive Load Theory*. (pp. 41-52). Londres : Routledge.
- Puma, S., & Tricot, A. (2021). Prendre en compte la mémoire de travail lors de la conception de situations d'apprentissage scolaire. *Analyse Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 171, 217-225.
- Puma, S., Matton, N., Paubel, P.V., & Tricot, A. (2018). Cognitive load theory and time considerations : Using the time-based resource sharing model. *Educational Psychology Review*, 30, 1199-1214.
- Renkl, A. (2013). Toward an instructionally oriented theory of example-based learning. *Cognitive Science*, 38, 1-37.
- 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*, 32, 90-108.

- Rey, G.D., Beege, M., Nebel, S., Wirzberger, M., Schmitt, T.H., & Schneider, S. (2019). A Meta-analysis of the Segmenting Effect. *Educational Psychology Review*, 31, 389-419.
- Roussel, S., Joulia, D., Tricot, A., & Sweller, J. (2017). Learning subject content through a foreign language should not ignore human cognitive architecture : A cognitive load theory approach. *Learning & Instruction*, 52, 69-79.
- Rowland, C.A. (2014). The effect of testing versus restudy on retention : A meta-analytic review of the testing effect. *Psychological Bulletin*, 140(6), 1432.
- Schlegel, M.J. (1995). A handbook of instructional and training program design. Repéré à <https://eric.ed.gov/?id=ED383281>
- Schroeder, N.L., & Cenkci, A.T. (2018). Spatial contiguity and spatial split-attention effects in multimedia learning environments : A meta-analysis. *Educational Psychology Review*, 30, 679-701.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving : Effects on learning. *Cognitive Science*, 12, 275–285.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning & Instruction*, 4, 295-312.
- Sweller, J. (2016). Cognitive load theory, evolutionary educational psychology, and instructional design. In D. Geary & D. Berch (Eds.), *Evolutionary perspectives on child development and education* (pp. 291–306). Cham, Suisse : Springer.
- Sweller, J., & Cooper, G.A. (1985). The use of worked examples as a substitute for problem solving in learning algebra. *Cognition & Instruction*, 2, 59-89.
- Sweller, J., & Levine, M. (1982). Effects of goal specificity on means–ends analysis and learning. *Journal of Experimental Psychology : Learning, memory, and cognition*, 8, 463.
- Sweller, J., van Merriënboer, J.J., & Paas, F. (2019). Cognitive architecture and instructional design : 20 years later. *Educational Psychology Review*, 1-32.
- Sweller, J., Van Merriënboer, J.J., & Paas, F.G. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, 10, 251-296.
- Tarmizi, R.A., & Sweller, J. (1988). Guidance during mathematical problem solving. *Journal of Educational Psychology*, 80, 424.
- Tobias, S., & Duffy, T.M. (Eds.) (2009). *Constructivist instruction : Success or failure ?* Londres : Routledge.
- Tomasello, M. (2015). *Pourquoi nous coopérons*. Rennes : Presses universitaires de Rennes.
- Tricot, A. (2017). La connaissance et la solution. *Éducation et Didactique*, 11, 57-61.
- Tricot, A., & Sweller, J. (2014). Domain-specific knowledge and why teaching generic skills does not work. *Educational Psychology Review*, 26, 265-283.

Tuovinen, J.E., & Sweller, J. (1999). A comparison of cognitive load associated with discovery learning and worked examples. *Journal of Educational Psychology*, 91, 334.

Van Merriënboer, J.J., & Krammer, H.P. (1987). Instructional strategies and tactics for the design of introductory computer programming courses in high school. *Instructional Science*, 16, 251-285.