

Étude des systèmes techniques en enseignement secondaire : apports de la théorie de la charge cognitive

Dominique BELLEC

André TRICOT

Université Toulouse 2-Le Mirail, laboratoire Cognition, langues, langage, ergonomie-travail et cognition (CLLE-LTC), UMR 5263, École pratique des hautes études (EPHE)

RÉSUMÉ • La théorie de la charge cognitive propose d'aborder l'ingénierie didactique en se focalisant sur l'activité d'apprentissage des élèves. Plus précisément, elle propose de distinguer le coût cognitif impliqué par l'apprentissage (l'élaboration de nouvelles connaissances), de celui impliqué par la tâche (le moyen mis en œuvre pour que les élèves apprennent). Dans cet article, nous montrons comment cette théorie appliquée en ingénierie didactique permet de questionner le séquençement de l'apprentissage de systèmes techniques complexes, du tout vers les parties ou des parties vers le tout, mais aussi l'isolement temporaire des éléments du système. Deux expériences réalisées avec des lycéens sont présentées. La première porte sur l'apprentissage de la numérisation du son. 33 élèves ont participé à cette expérience, mais aucune différence entre les deux séquences testées n'est obtenue, alors que l'apprentissage réalisé est très important. La seconde expérience porte sur l'apprentissage d'un système plus complexe, la régulation thermique. 63 élèves ont participé à cette expérience. La présentation des éléments isolés avant la présentation du système complet entraîne un meilleur apprentissage que la présentation des éléments en interaction avant la présentation du système, ou même la présentation du système avant celle des éléments. Ces résultats sont discutés et les futurs travaux sont évoqués.

MOTS-CLÉS • Cognition, analyse de système, didactique.

Introduction

Dans les enseignements de technologie au collège puis en Sciences et

technologies industrielles et en Sciences de l'ingénieur au lycée, l'étude des systèmes techniques est caractérisée par une approche concrète du réel s'appuyant sur des démarches d'analyse fonctionnelle, structurelle et comportementale. Les approches de cet enseignement peuvent être qualifiées d'inductives (fondées sur des raisonnements qui vont du particulier au général) ou bien déductives (fondées sur des raisonnements qui vont du général vers le particulier). Concevoir un parcours d'enseignement, qui prenne en compte des processus d'apprentissage, implique notamment de choisir une entrée dans cette « boucle de base » (Musial & Tricot, 2008). Deux critères importants contribuent au choix d'une entrée dans la boucle de base : les niveaux de complexité et de criticité des savoirs abordés (Aublin, Rubaud & Taraud, 2003). Le programme pour le cycle terminal de la série Sciences et technologies de l'industrie et du développement durable (STI2D) des enseignements technologiques transversaux et spécifiques des spécialités, architecture et construction, énergies et environnement, innovation technologique et écoconception, systèmes d'information et numérique, préconise une approche pluri-technique adossée à une démarche à dominante inductive (MEN, 2011). Les travaux de recherche menés en psychologie cognitive de l'éducation, et notamment ceux relatifs à la théorie de la charge cognitive, permettent de questionner cette préconisation et d'apporter des réponses complémentaires sur le plan de l'ergonomie des situations d'apprentissage. Le travail présenté ici s'inscrit en ingénierie didactique (*instructional design*) : il vise à produire des connaissances utiles à ceux qui conçoivent des situations d'enseignement à partir d'expérimentations auprès d'élèves, où plusieurs versions d'un même support d'apprentissage sont comparées.

En pratique, la mise au point des séquences d'enseignement s'appuie sur la structuration des contenus d'enseignement afin d'en faciliter l'apprentissage pour atteindre les objectifs pédagogiques prédéfinis. Pour cela, trois étapes semblent nécessaires :

- l'identification du but et des objectifs spécifiques de l'enseignement (prescrits par les programmes et les référentiels) ;
- la structuration des contenus et la mise au point d'un guidage approprié (donnés à titre indicatif par les documents d'accompagnement des programmes et des référentiels en termes de repères méthodologiques) ;
- la conception des séquences d'enseignement (c'est-à-dire une tâche ou plusieurs, des supports, un discours, un dispositif de régulation et d'évaluation). Cette étape est sous la responsabilité de l'enseignant. La

recherche en ingénierie didactique vise donc à produire des connaissances qui peuvent être utilisées lors de cette étape de la conception.

La théorie de la charge cognitive (TCC) s'inscrit dans le domaine de l'ingénierie didactique (voir Chanquoy, Tricot & Sweller, 2007 pour une présentation en français et Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011 pour une présentation plus récente et plus complète en anglais). Elle relève de l'ingénierie didactique au sens de Brousseau (2008), cité par Chevallard (2009) : « L'ingénierie didactique consiste à déterminer des dispositifs d'enseignement communicables et reproductibles. Elle évoque l'existence d'une description, d'une étude et de justifications aussi précises et consistantes que possibles des conditions d'utilisation de ce dispositif [...]. L'ingénierie didactique proprement dite accompagne les dispositifs produits d'un ensemble d'études et d'analyses qui donnent les caractéristiques du produit en référence avec les connaissances scientifiques théoriques et expérimentales du moment. » La TCC s'inscrit plus précisément dans le domaine du *instructional design* où ce sont les supports et les tâches au sein des dispositifs d'enseignement qui font l'objet de l'étude. Dans le domaine de la TCC, les résultats expérimentaux montrent que l'on peut favoriser les apprentissages en limitant la charge cognitive imposée par le support et par la tâche à accomplir afin de libérer des ressources pour l'apprentissage lui-même, c'est-à-dire pour l'élaboration ou la transformation de connaissances. Pour cela, deux axes ont été privilégiés au sein de cette théorie depuis une trentaine d'années, à travers plusieurs centaines d'expérimentations :

- la réduction de la charge cognitive due à la présentation du support : par exemple, la disposition relative du texte et de l'image, l'utilisation du son, le séquençage des images dynamiques, la redondance des informations. Cette question ne sera pas explicitement traitée dans cet article ;

- la diminution de la charge cognitive liée à la complexité intrinsèque du savoir objet de l'apprentissage. Pour cela, les travaux de la TCC proposent de fractionner la complexité en utilisant des stratégies fondées sur des apprentissages en plusieurs étapes. Le support d'enseignement comporte alors des parties où sont présentés des éléments plus ou moins isolés du système et, dans un second temps, le système complet.

L'objectif de cet article est de mettre à l'épreuve cette seconde approche en comparant deux façons de fractionner un savoir complexe. Les travaux de la TCC, qui montrent l'intérêt de présenter les éléments isolés avant le système complet, semblent en effet contradictoires avec

les démarches préconisées par le ministère de l'Éducation nationale, et sans doute plus habituelles, qui présentent le système avant ses éléments. Nous montrons tout d'abord, que les travaux au sein de la TCC soulèvent, sur ce point, quelques ambiguïtés, qui permettent de remettre en cause certains résultats obtenus. Puis nous présentons deux expérimentations, conduites avec des lycéens, sur deux contenus différents : la numérisation du son et la régulation thermique.

1. Théorie de la charge cognitive et apprentissages

Le traitement cognitif d'un support d'apprentissage, que ce soit au travers des notes de cours, des manuels scolaires, des diapositives, des documents remis aux élèves, des logiciels d'apprentissage sur ordinateur ou des sites Web éducatifs, nécessite de traiter de nombreuses informations en mémoire de travail. La TCC a mené de nombreuses études pour identifier quelles conditions favorisent ces apprentissages « complexes ». Dans cette optique, la TCC s'appuie sur les propriétés de la mémoire humaine, notamment sur la dichotomie entre mémoire de travail et mémoire à long terme. La mémoire de travail a une capacité de stockage et de traitement limitée. Selon Miller (1956), elle ne peut gérer, de façon simultanée, que sept éléments d'information isolés ou même moins (environ quatre) selon Cowan (2005). La mémoire de travail est reliée à la mémoire à long terme qui, elle, peut stocker un nombre infini de connaissances sous forme de schémas (Barlett, 1932) ou de schèmes (Piaget, 1937). Ainsi, la performance d'apprentissage dépendra à la fois de la quantité de ressources nécessaires pour traiter les informations inhérentes au savoir objet de l'apprentissage mais aussi de la quantité de ressources disponibles en mémoire de travail. Un schéma est une connaissance organisée en buts et en sous-but, qui encapsule de nombreux éléments d'informations pour ne former qu'un seul élément. Un schéma peut donc constituer une connaissance à la fois complexe, déclarative et procédurale, qui est traitée comme une unité simple en mémoire de travail. Mobiliser un schéma est donc peu coûteux en ressources cognitives. Le but des apprentissages est de construire des schémas, réutilisables dans des différentes situations. L'apprentissage peut demander un effort très important aux apprenants, qui doivent partager leurs ressources cognitives disponibles en mémoire de travail entre les différentes opérations imposées par les tâches et supports qui leur sont présentés. Dans ce cadre, la TCC (Sweller & Chandler, 1994 ; Sweller, Van Merriënboer & Pass, 1998) distingue trois types de charge cognitive :

– la charge cognitive pertinente. Cette charge cognitive est imposée par les caractéristiques de la connaissance à apprendre, ou, plus exactement, par la « distance » entre la connaissance à apprendre et celle de l'individu qui apprend. Plus cette distance est importante, moins l'individu a de connaissances préalables sur le sujet, et plus la charge pertinente est importante.

– la charge cognitive intrinsèque. Cette charge cognitive est liée à la réalisation de la tâche d'apprentissage et au traitement cognitif du support de celle-ci. Elle correspond à toutes les informations qu'il faut traiter pour apprendre.

– la charge cognitive inutile. Cette source de charge cognitive est liée à l'organisation du support d'apprentissage et aux activités réalisées par les apprenants qui ne sont pas directement liées à l'élaboration de connaissances. Elle correspond à toutes les informations superflues, non nécessaires à l'apprentissage. Par exemple, dans le cas de l'étude comportementale des systèmes techniques, l'utilisation d'un nouvel appareil de mesure inconnu des apprenants va engendrer un coût cognitif supplémentaire qui viendra les perturber et dégrader la performance de l'apprentissage initialement prévu. Un apprentissage de l'utilisation de ce nouvel appareil de mesure serait à prévoir dans une séquence précédente.

Pour faciliter les apprentissages et donc favoriser l'élaboration de connaissances, l'idée est de limiter au maximum la charge cognitive inutile et de manipuler la charge cognitive intrinsèque pour dégager des ressources cognitives. De nombreux chercheurs ont proposé des stratégies pour réduire la charge cognitive inutile (pour une revue, voir Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011). Le propos du présent article est de traiter la manipulation de la charge cognitive intrinsèque en proposant des approches en plusieurs étapes, dans le but de fractionner la complexité des systèmes techniques à étudier.

1.1. Interactivité entre les éléments et effets sur la charge cognitive

Un système technique est un ensemble d'éléments qui interagissent entre eux suivant des principes ou des règles prédéfinies par le concepteur pour obtenir une fonction d'usage. Un système est défini par la nature de ses éléments constitutifs, les interactions entre eux et sa frontière avec son environnement. Quand il y a une forte interaction entre les éléments entre eux et avec l'environnement, la mémoire de travail peut se trouver en surcharge et s'il est nécessaire de traiter tous les éléments simultanément pour comprendre le fonctionnement global du système, le

but d'apprentissage sera difficilement atteint. En revanche, si les éléments constitutifs du système étudié ont de faibles interactions entre eux et avec leur environnement, l'apprentissage sera facilité car ces éléments pourront être traités de façon isolée afin de créer des connaissances facilement réutilisables et accéder à la compréhension du système global. L'effet de l'interaction entre les éléments sur l'apprentissage est largement soutenu empiriquement (voir Marcus, Cooper & Sweller, 1996 ; Leahy & Sweller, 2005 ; Sweller & Chandler, 1994). Sweller, Ayres et Kalyuga (2011) affirment que les effets de charge cognitive les plus importants se produisent lorsque la charge cognitive intrinsèque est élevée.

Pour réduire la charge cognitive intrinsèque, la solution peut être fondée sur le séquençement des informations présentées. Ce séquençement peut se réaliser sous plusieurs formes : l'isolement des éléments fortement interactifs avant la présentation du système complet, le préapprentissage, la présentation des apprentissages sous forme modulaire ou encore l'utilisation de sous-buts. Dans tous les cas, les stratégies sont fondées sur des scénarii à deux étapes. La première étape est conçue pour que les apprenants soient en situation de charge cognitive « raisonnable » pour aborder la deuxième étape avec des schémas déjà construits. Nous allons maintenant présenter ces différentes stratégies de séquençement.

1.2. L'effet d'isolement des éléments fortement interactifs

Les chercheurs ont identifié une stratégie de réduction de la charge cognitive intrinsèque en décomposant la présentation du support de l'apprentissage. Dans une stratégie en deux étapes, les éléments sont d'abord présentés isolément (étape 1), avant de les présenter en interaction complète (étape 2). Dans un certain nombre d'études, cette stratégie a été jugée plus performante par rapport à la présentation du système seul deux fois (voir Ayres, 2006 ; Blayney, Kalyuga & Sweller, 2010 ; Pollock, Chandler & Sweller, 2002). Dans cette dernière publication, les auteurs ont testé cette stratégie sur un apprentissage autour de la mesure d'isolement et de continuité du circuit électrique d'une bouilloire. Cette stratégie est connue sous le nom d'effet d'isolement des éléments (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011), elle n'a pas pour l'instant fait l'objet de nombreuses études.

1.3. L'effet de préapprentissage

Cette stratégie est, elle aussi, fondée sur une démarche d'apprentissage en deux étapes (Mayer, Mathias & Wetzell, 2002). Dans une première étape, les différentes composantes importantes du système

dynamique à étudier sont présentées aux apprenants. Chaque composante du système est considérée comme une unité qui porte un nom et qui peut se trouver dans des états différents. Dans la deuxième étape, un modèle causal de l'ensemble du système est présenté, c'est-à-dire une chaîne de relations de cause à effet entre toutes les composantes. Au cours de la première étape, chaque partie est présentée de façon statique, avec un commentaire verbal : l'enjeu est d'identifier les différents états des composants. Dans la deuxième étape, le système est présenté dans son ensemble de façon dynamique. Dans les deux premières expériences de Mayer, Mautone & Prothero (2002) ayant pour objectif l'étude d'un système mécanique de freinage pour automobile, cette présentation en deux étapes est comparée à une présentation où seule la seconde étape est exposée. Les résultats montrent que le préapprentissage entraîne de meilleures performances dans les épreuves de rappel et de transfert. Ces deux premières expériences pouvaient être critiquées, car les apprenants qui réalisent un préapprentissage passent plus de temps à apprendre. Pour répondre à cela, les auteurs ont réalisé une troisième expérience avec un « post apprentissage » (identique à celui proposé dans les deux premières expériences mais placé après la présentation du système complet dynamique). Là encore, les résultats ont montré que les apprenants qui ont reçu l'entraînement avant l'apprentissage ont obtenu de meilleurs résultats (le système technique étudié dans cette troisième expérience était une pompe à vélo). Cet effet de préapprentissage a été répliqué par Mayer, Mautone, et Prothero (2002) dans le domaine de la géologie, et par Clarke, Ayres et Sweller (2005) dans le domaine des mathématiques.

1.4. Effet de présentation des situations problèmes sous forme modulaire

Cet effet est fondé sur une stratégie qui réduit la difficulté en isolant des modules qui peuvent être compris indépendamment les uns des autres et qui peuvent être transférés dans le contexte global de la situation problème. À partir de ces modules, cette stratégie propose de présenter différentes étapes de la résolution d'un problème de façon séquentielle. Dans deux expériences, Gerjets, Scheiter et Catrambone (2006) ont montré que les meilleures performances ont été obtenues grâce à l'apprentissage modulaire par rapport à une approche opposée, que les auteurs qualifient de « molaire » où l'information est fournie totalement intégrée. Avec cette stratégie, l'apprentissage est plus rapide et conduit à de meilleures performances en transfert, et ceci quelles que soient les connaissances préalables des apprenants. Il est à noter que

cette stratégie à été expérimentée plutôt dans le domaine des traitements mathématiques des probabilités. Des réplifications dans les domaines des apprentissages techniques seraient probablement intéressantes.

1.5. Utilisation de sous-buts

Il est également possible de favoriser l'apprentissage en mettant en évidence les buts et sous-buts du problème dans le plan de résolution. Catrambone (1998) a montré que les apprenants peuvent améliorer leurs performances d'apprentissage si les problèmes qu'on leur pose sont structurés en sous-buts. Dans cette stratégie, l'important est de montrer aux apprenants l'importance des étapes d'apprentissage.

1.6. Présentation de la contribution empirique

Les résultats empiriques montrent qu'un séquençement, qui progresse des parties vers le tout, améliore sensiblement les performances d'apprentissage. Van Merriënboër, Kester et Paas (2006) soutiennent que ce sens de progression peut conduire à un paradoxe : ces approches conduisent souvent à des augmentations de performances en rappel mais diminuent les performances en situation de transfert. Ces chercheurs préconisent l'approche inverse. En s'appuyant sur le modèle 4C/ID (Four Component/Instructionnal Design) de Van Merriënboër pour les apprentissages complexes (voir Van Merriënboer & Kirschner, 2007), ces auteurs ont fait valoir que de nombreuses tâches ne sont pas toujours liées par des relations de cause à effet, et peuvent nécessiter l'intégration d'un certain nombre de connaissances au préalable. Dans ces conditions, une progression du tout vers les parties est recommandée car les apprenants ont besoin de savoir comment les différents éléments interagissent les uns avec les autres. En revanche, en adoptant une approche des parties vers le tout, de telles interactions peuvent être comprises plus facilement. Van Merriënboer, Kester et Paas (2006) soutiennent une approche du tout vers les parties, mais n'ont pas vérifié leur hypothèse empiriquement. Peu de recherches ont comparé un séquençement du tout vers les parties avec un séquençement des parties vers le tout. Une exception notable étant celle de Mayer, Mathias et Wetzell (2002), que nous venons de présenter, et qui montre qu'un post apprentissage a été, dans une expérience, moins efficace que d'une stratégie de préapprentissage. Selon ces auteurs, un séquençement des parties vers le tout devrait être plus efficace qu'un séquençement du tout vers les parties. Cette prédiction est également soutenue par la théorie de la charge cognitive. Dans le cas de l'effet des éléments interactifs présentés isolément, l'apprentissage est plus performant en isolant les

éléments avant de présenter le système complexe (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011). L'hypothèse théorique cruciale de l'effet des éléments interactifs présentés isolément est que le nombre et la complexité des interactions sont réduits. Cependant, cette stratégie n'a été utilisée que dans des séquencements qui vont du simple vers le complexe. On peut aussi se demander dans quelle mesure le degré d'isolement des éléments impacte les performances d'apprentissage. L'objectif de cet article est d'examiner si l'ordre des parties vers le tout est important ou si cet effet peut être obtenu même si le séquencement va du tout vers les parties. Dans les deux expériences présentées ci-dessous, nous testons l'effet de l'ordre du séquencement. Dans la deuxième expérience, l'isolement des éléments est étudié plus en détail.

3. Expérience 1

3.1. Méthode

3.1.1. Participants

33 élèves d'un lycée général et technologique de Poitiers (France) ont participé à cette expérience (âge moyen : 17,8 ans). Ils étaient scolarisés en première STI génie électrotechnique. Les élèves étaient volontaires pour cette expérience. Ils n'avaient reçu aucune formation au préalable dans le domaine du traitement du signal audio.

3.1.2. Matériel d'apprentissage et procédure expérimentale

Deux versions d'un support multimédia ont été élaborées à propos de l'enregistrement numérique de la musique. Les deux versions contenaient les mêmes informations, seul l'ordre de présentation des informations était différent. L'enregistrement numérique de la musique engendre des interactions entre quatre variables (le temps d'enregistrement T_e , la fréquence d'échantillonnage F_e , le taux de quantification Q et le nombre de canaux). La qualité d'un enregistrement numérique dépend de l'interaction entre ces quatre variables. Un enregistrement de haute qualité implique une grande fréquence d'échantillonnage, un fort taux de quantification et un nombre suffisant de canaux. Si une des variables est dégradée, la qualité de l'enregistrement se trouve dégradée. Pour calculer le nombre de bits nécessaires pour effectuer un enregistrement (taille du fichier d'enregistrement), il faut faire le produit de ces quatre variables (temps d'enregistrement en seconde ; fréquence d'échantillonnage en Hz ; taux de quantification en bits ; nombre de canaux).

Le matériel d'apprentissage était composé de deux jeux de diapositive (A et B). Le jeu A était composé de cinq pages :

- page A1 : définition d'enregistrement numérique ;
- page A2 : définition de la fréquence d'échantillonnage ;
- page A3 : définition du taux de quantification ;
- page A4 : définition du nombre de canaux ;
- page A5 : définition du temps d'un enregistrement.

Le jeu B était composé de trois pages :

- page B1 : présentation des avantages de l'enregistrement numérique ;
- page B2 : définition de la qualité d'un enregistrement numérique, qui résulte de l'interaction entre trois variables (Fe, Q, nombre de canaux) ;
- page B3 : définition de la taille d'un fichier d'enregistrement, qui résulte de l'interaction entre quatre variables (Fe, Q, nombre de canaux, Te).

Le jeu A correspondait à une présentation des éléments isolés (les parties), le jeu B correspondait à la présentation de l'ensemble des variables en interaction (le tout), Chaque page était construite autour d'une représentation graphique et d'un texte d'explication pour expliquer les définitions.

Les élèves ont été répartis, de façon aléatoire, dans deux groupes expérimentaux. Chaque groupe expérimental correspondait à une version de présentation soit « des parties vers le tout » (jeu A puis jeu B) ou bien « du tout vers les parties » (jeu B puis jeu A). Dans les deux cas, il n'était pas possible de passer d'un jeu à l'autre durant l'étude.

Un pré-test (une semaine avant l'apprentissage) et un post-test ont été donnés aux élèves. Les deux tests étaient identiques. Les questions posées dans le pré-test (voir un exemple tableau 1) permettaient de vérifier l'état des connaissances des élèves sur les définitions des différentes composantes individuelles qui permettent d'évaluer la qualité d'un enregistrement audio puis de faire le calcul de la taille du fichier informatique associé.

Exemple de question portant sur des définitions relatives à des composantes individuelles	La fréquence d'échantillonnage est une mesure : du nombre d'échantillons prélevé durant 1 minute du nombre d'échantillons prélevé durant – 1 seconde – du nombre de secondes que dure un échantillon – du nombre de minutes que dure un échantillon – je ne sais pas
Exemple de question portant sur des définitions relatives à la qualité des	Pour des enregistrements sonores destinés à des jouets les paramètres retenus sont :

enregistrements	<ul style="list-style-type: none"> – échantillonnage 44 KHz, Quantification 16 bits échantillonnage 22 KHz, Quantification 32 bits – échantillonnage 8 KHz, Quantification 8 bits – échantillonnage 8 KHz, Quantification 32 bits – je ne sais pas
Exemple de question portant sur des définitions relatives au calcul de la taille des fichiers audio-numériques	<p>2 enregistrements numériques sont réalisés avec les paramètres suivants :</p> <p>Enregistrement n° 1 Fréquence d'échantillonnage : 44KHz Nombre de bits de quantification : 16 bits Stéréo : oui Durée : 60 minutes</p> <p>Enregistrement n° 2 Fréquence d'échantillonnage : 44KHz Nombre de bits de quantification : 8 bits Stéréo : oui</p> <p>Durée : 60 minutes</p> <p>Ils nécessitent :</p> <ul style="list-style-type: none"> – la même capacité de stockage – L'enregistrement n° 1 nécessite deux fois plus de capacité de stockage que l'enregistrement n° 2 – L'enregistrement n° 2 nécessite deux fois plus de capacité de stockage que l'enregistrement n° 1 – je ne sais pas

Tableau 1. Exemples de questions posées dans le pré-test et le post test de l'expérience n° 1

rajouter les cases dans le tableau

Le post-test permettait de mesurer l'état des connaissances des élèves après la session d'apprentissage. Entre la fin de la session d'apprentissage et le début du post-test, une activité d'une durée de 10 minutes (une suite d'opérations arithmétiques) était donnée aux élèves pour s'affranchir de l'effet de récence. Pour la qualité des fichiers, les réponses attendues étaient en relation avec les standards professionnels (haute qualité, qualité moyenne et basse qualité). Pour le calcul de la taille des fichiers, plusieurs opérations étaient présentées sous la forme d'un QCM avec une seule bonne réponse. Un point était accordé pour chaque bonne réponse, zéro point pour une réponse erronée ou pas de réponse. Le temps de l'étude était libre.

3.2. Résultats

Les scores moyens ont été calculés pour le pré-test et pour le post-test, ils ont été ensuite convertis en scores relatifs (Voir tableau n° 2).

Tabl. 2. Taux moyen de bonnes réponses (écart type) pour l'expérience 1

	Pré-test	Post-test
a) Les parties avant le tout (n = 17)	0,15 (0,09)	0,64 (0,22)
b) Le tout avant les parties (n = 16)	0,15 (0,08)	0,63 (0,24)

Le calcul du t de Student montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre les deux groupes sur le pré-test ($t(32) = 0,15$; $p > 0,8$). Ceci indique que les sujets appartenant aux deux groupes n'étaient pas différents au plan de leurs connaissances préalables dans le domaine du traitement du signal audio numérique. Il n'y avait pas de différences non plus entre les deux groupes à l'issue du post-test ($t(32) = 0,14$; $p > 0,8$). Ce résultat montre que le sens de la présentation n'a pas eu d'effet sur les performances d'apprentissage. Les deux groupes ont bénéficié d'un fort gain d'apprentissage entre le pré-test et le post-test. La différence entre le pré-test et le post-test est significative dans les deux conditions : $t(16) = -8,72$; $p < 0,01$ pour le groupe « des parties vers le tout », $t(15) = -8,10$; $p < 0,001$ pour le groupe « du tout vers les parties ».

3.3. Discussion

Avec cette première expérience, nous avons obtenu un effet d'apprentissage important mais aucune différence significative entre les deux conditions de présentation « des parties vers le tout » et « du tout vers les parties ». L'ordre de la présentation des informations ne semble donc pas important en ce qui concerne les performances d'apprentissage. Il est à noter que même si les apprentissages axés sur la compréhension des variables élémentaires et de leurs combinaisons pour évaluer la qualité des enregistrements et la taille des fichiers associés semblait complexe (quatre variables, trois interactions), la complexité était réduite par le fait que les trois interactions étaient de même nature : une multiplication. Le fort gain d'apprentissage obtenu dans chaque condition est sans doute lié au fait que la situation d'apprentissage ne demandait pas un effort très important. Pour évaluer la complexité d'un matériel, il ne faut pas seulement s'intéresser au nombre d'interactions en présence mais aussi à leur diversité.

4. Expérience 2

Une deuxième expérience a été réalisée pour continuer à tester l'effet

de l'ordre de présentation avec un matériel d'apprentissage plus complexe. De plus, nous avons souhaité étudier plus en détail l'effet des éléments interactifs présentés isolément : est-il vraiment dû à un isolement total des éléments ou à une simplification temporaire du contenu à traiter ? Pour atteindre ces deux objectifs, nous avons comparé trois versions de présentation différentes :

- présentation des parties partiellement isolées avant le tout ;
- présentation du tout avant les parties partiellement isolées ;
- présentation des parties isolées avant le tout.

Ces trois versions de présentation d'un même contenu nous ont permis de comparer les deux ordres de présentation (« des parties vers le tout » vs « du tout vers les parties ») et de comparer les stratégies d'isolement des éléments (éléments isolés vs éléments non isolés).

4.1. Méthode

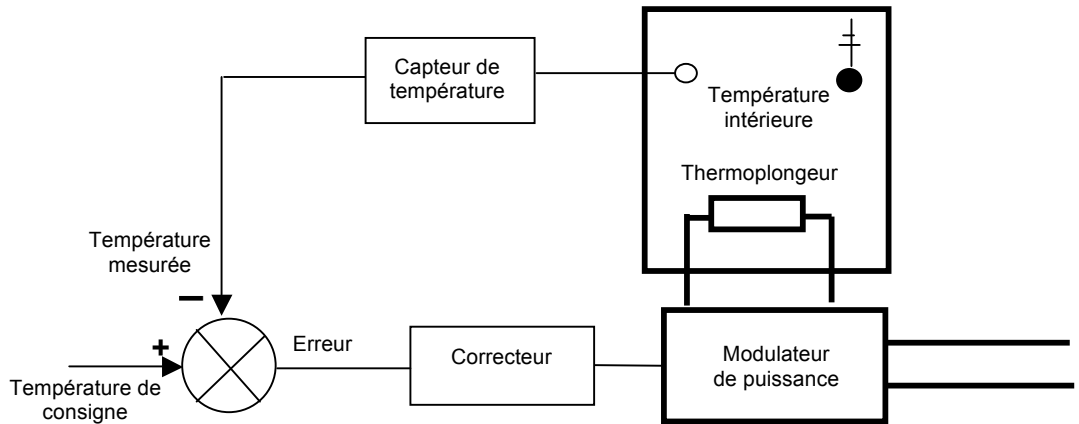
4.1.1. Participants

63 étudiants de trois établissements de Poitiers et Châtelleraut (France) ont participé à cette expérience (âge moyen : 19,5 ans). Ils étaient scolarisés en BTS Systèmes électroniques, en BTS Électrotechnique, en IUT Mesures physiques et en IUT Génie thermique et énergie. Les étudiants ont participé volontairement. Ils n'avaient reçu aucune formation au préalable dans le domaine de la régulation de température.

4.1.2. Matériel d'apprentissage et procédure expérimentale

Les étudiants avaient à étudier le fonctionnement de la régulation de température d'un bain de traitement thermique, les différents composants mis en jeu et comment ils interagissaient entre eux pour assurer la fonction de maintien en température, malgré des perturbations pouvant survenir dans les caractéristiques internes au bain (changement de nature du produit à traiter) ou externes (variations de la température ambiante). L'ensemble du système est présenté en figure 1. Par rapport à l'expérience 1 présentée ci-dessus, l'apprentissage était plus difficile car il mobilisait l'élaboration de connaissances sur le fonctionnement des composants (aspects énergétiques et informationnels), sur le traitement d'un signal d'erreur issu d'un calcul de différence entre une consigne de température et une mesure de la température réelle et enfin sur les notions de thermodynamique (mélange de produit de températures différentes et de quantités différentes).

Fig. 1 : système de régulation thermique : le système complet.



Un support multimédia, sur le thème de la régulation de température, a été développé pour réaliser cette expérience. Ce support comportait six pages de textes et de schémas. Le temps d'étude était laissé libre et la programmation de la navigation n'autorisait pas de retour en arrière. Les participants étaient répartis dans trois groupes de façon aléatoire :

- groupe A : « éléments avant système global ». Les éléments présentés étaient extraits du système global en gardant le nom des liens (voir un exemple figure 2) ;
- groupe B : « système global avant éléments ». Présentation strictement inversée par rapport au groupe A ;
- groupe C : « éléments isolés avant système global ». Les éléments sont présentés sans relations avec le système global (voir un exemple figure 3).

Fig. 2 : système de régulation thermique : un exemple d'élément.

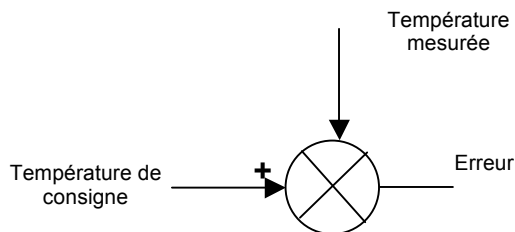
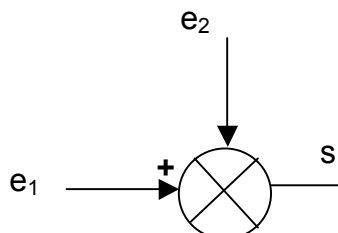


Fig. 3 : système de régulation thermique : un exemple d'élément isolé.



Un pré-test, donné une semaine avant l'apprentissage, a permis

d'évaluer les connaissances préalables des étudiants dans le domaine de la régulation de température. Ce pré-test était composé de cinq questions sur des notions générales de thermodynamique, cinq questions sur les processus de régulation et deux questions sur les composants utilisés dans les procédés thermiques industriels (voir exemples de questions tableau 3). Entre la fin de la session d'apprentissage et le début du post-test, une activité d'une durée de 10 minutes (une suite d'opérations arithmétiques) était donnée aux élèves pour s'affranchir de l'effet de récence. Ensuite, les étudiants devaient répondre à un post-test composé des douze questions posées au pré-test plus deux questions de transfert (une dans le domaine de la régulation de vitesse et l'autre dans le domaine de la régulation de pression). Un point était accordé pour chaque bonne réponse, zéro point pour une réponse erronée ou pas de réponse. Le temps de l'étude était libre.

Tabl. 3 : exemples de questions posées dans le pré-test et le post test de l'expérience n° 2.

Exemple de question sur des notions générales de thermodynamique	Si on ajoute 10 litres d'eau à 50° C dans un bac contenant 10 litres d'eau à 20° C, quelle va être la température des 20 litres d'eau ? – 0° C – Je ne sais pas
Exemple de question sur les processus de régulation	Une régulation de température dite en « tout ou rien » permet de maintenir une température égale à 0° C ou à 100° C ? – Vrai – Faux – Je ne sais pas
Exemple de question sur les composants utilisés dans les procédés thermiques industriels	Une sonde de température du type PT 100 est constituée d'une résistance égale à : – 0,01 ohm à 0° C – 100 ohm à 0° C – 0,1 ohm à 100° C – 1 ohm à 10° C – Je ne sais pas

4.2. Résultats

Les scores moyens ont été calculés pour le pré-test et pour le post-test, ils ont été ensuite convertis en score relatif (voir tableau 4).

Tabl. 4 : taux moyen de bonnes réponses (écart type) pour l'expérience 2.

	Pré-test	Post-test	Transfert
a) Éléments avant système global (n = 21)	0,45 (0,20)	0,51 (0,20)	0,21 (0,37)
b) Système global avant éléments (n = 21)	0,42 (0,18)	0,57 (0,22)	0,17 (0,37)
c) Éléments isolés avant système global (n = 21)	0,39 (0,25)	0,67 (0,18)	0,64 (0,42)

Le calcul d'ANOVA montre qu'il n'y avait pas de différence significative

entre les trois groupes sur le pré-test ($F(2,61) = 0,38$; $p > 0,6$). Ceci indique que les sujets appartenant aux trois groupes n'étaient en moyenne pas différents sur le plan de leurs connaissances préalables dans le domaine de la régulation de température. Au niveau du post-test, il y a un effet principal du matériel expérimental sur l'apprentissage ($F(2,61) = 3,18$; $p < 0,05$). Le test post-hoc de Tukey montre qu'il y a une différence entre la condition « éléments isolés avant système global » et « éléments avant système global » mais pas de différence entre la condition « système global avant éléments » et les deux autres conditions ($p > 0,1$ dans les deux cas). Il y a un effet principal du matériel sur les questions de transfert ($F(2,61) = 9,60$; $p < 0,01$). Le test post-hoc de Tukey montre une différence entre la condition « éléments isolés avant système global » et les deux autres conditions ($p < 0,01$ dans les deux cas) mais pas de différence entre ces deux autres conditions ($p > 0,1$). Comme au niveau du pré-test les écarts types étaient importants, il est possible de faire l'hypothèse que les différences non significatives observées au pré-test étaient liées à la taille de la variance plutôt qu'à la faible différence de taux moyens entre les trois groupes. Nous avons effectué une analyse de covariance, en utilisant les pré-tests comme covariables. Cette analyse confirme un effet sur les post-tests ($F(2,61) = 4,80$; $p < 0,05$) et sur le transfert ($F(2,61) = 10,21$; $p < 0,01$).

Deux groupes ont bénéficié d'un gain d'apprentissage entre le pré-test et le post-test. La différence entre le pré-test et le post-test est significative pour le groupe « éléments isolés avant système global » ($t(20) = -3,46$; $p < 0,01$) et pour le groupe « système global avant éléments » ($t(20) = -8,10$; $p < 0,001$). Il n'y a pas de gain d'apprentissage pour la condition « éléments avant système global » ($t(20) = -1,37$; $p < 0,1$).

4.3. Discussion

Il semble, qu'avec ce matériel expérimental, l'isolement des éléments a un effet important sur l'apprentissage (compréhension et transfert) et que l'ordre de présentation n'a pas d'importance. L'isolement partiel des éléments ne semble pas particulièrement efficace. Même si cette expérience ne teste pas toutes les combinaisons possibles de présentation (six versions différentes du même matériel sont possibles), elle contribue à tester simultanément l'effet de l'ordre de présentation et l'effet d'isolement des éléments.

5. Discussion générale

Ces deux expériences montrent qu'il n'y a pas de différences de performances d'apprentissage entre les présentations « des parties vers le tout » et « du tout vers les parties ». Avec la première expérience, nous avons obtenu un grand gain d'apprentissage. Avec la deuxième expérience, nous avons obtenu un faible gain d'apprentissage (un petit gain mais une différence significative entre le pré-test et le post-test). L'ordre de présentation ne semble pas jouer de rôle dans ces deux expériences. Même si nos résultats ne sont évidemment pas suffisants pour invalider l'effet d'ordre de présentation, il semble possible d'émettre des hypothèses sur le fait que l'effet d'isolement des éléments est lié à l'isolement plutôt qu'à l'ordre de présentation. Par ailleurs, nous observons dans l'expérience 2 qu'un séquençement des parties vers le tout avec une présentation des éléments isolés se distingue nettement par la supériorité des performances obtenues pour les questions de transfert et pour les questions de compréhension. Il paraît donc nécessaire, pour tester l'effet d'isolement des éléments, de comparer non seulement les conditions « éléments isolés avant le système global » et « système global présenté deux fois », mais aussi avec premièrement une présentation où le système global est présenté avant les éléments isolés comme Mayer, Mautone et Prothero (2002) dans sa troisième expérience, et deuxièmement une présentation où les éléments sont présentés de façon modérément isolés avant et/ou après le système global (voir Bellec & Tricot, 2012 ; Bellec, Tricot & Ayres, 2012, 2013). Des travaux sont actuellement en cours pour tester ces présentations avec des matériels d'apprentissages basés sur des systèmes techniques beaucoup plus complexes mettant en œuvre simultanément de nombreuses variables, de nombreux composants et de nombreuses hypothèses de fonctionnement.

Enfin, pour les concepteurs de séquences pédagogiques sur l'étude des systèmes techniques, il semble important de remarquer que l'effet d'isolement des éléments d'un système global est une stratégie qui permet d'obtenir des résultats intéressants en compréhension et en transfert avec des scénarii qui vont des éléments isolés vers le système global. Lors de la conception des séquences pédagogiques, l'isolement des éléments constitutifs d'un système technique doit être vu comme une première étape d'un apprentissage qui doit être ajustée en fonction des prérequis des élèves. La notion de degré d'isolement est donc soumise à l'appréciation de l'enseignant en charge de l'animation pédagogique au regard des connaissances préalables des élèves qui peuvent varier en fonction de nombreux paramètres (place de la situation d'apprentissage

dans le déroulement de l'année scolaire, connaissances acquises dans les autres matières, etc.). Pour l'instant, les résultats montrent que ces scénarii sont prometteurs dans le cas de systèmes peu complexes c'est-à-dire construits avec peu de composants et des interactions simples entre les variables mises en jeu. Les auteurs qui préconisent une approche qui va du tout vers les parties (voir Van Merriënboer, Kester & Paas, 2006) font valoir de meilleures performances en transfert (mais pas en rappel). Ces approches n'ont pas pour l'instant fait l'objet de vérifications empiriques mais semblent être intéressantes dans le cas d'apprentissages à partir de systèmes très complexes. Au regard des travaux présentés ci-dessus, la présentation des systèmes complets avant la présentation des éléments et des variables qui les composent ne semble pas être une stratégie contre-performante dans la mesure où les apprentissages réalisés dans les domaines techniques sont souvent mobilisés dans des conditions de transfert (les élèves réinvestissent leurs connaissances pour l'étude d'autres systèmes).

Les recherches actuelles montrent donc que les problèmes de conception seraient donc plutôt liés au degré d'isolement des éléments qu'au choix d'entrée dans la « boucle de base ». La démarche déductive permet un accès à la connaissance incontestablement plus rapide mais elle met en œuvre le processus de mise en application qui offre une garantie limitée de résultats. La démarche inductive mobilise une grande profondeur de traitement par l'étude de nombreux cas particuliers pour construire les connaissances générales. Par ailleurs, la démarche inductive implique un ancrage des connaissances à plus long terme. Le choix d'une des deux démarches semble donc être plutôt lié au niveau de complexité des savoirs abordés et aux prérequis des élèves au moment de la situation d'apprentissage.

Dominique BELLEC

dominique.bellec@ac-poitiers.fr

André TRICOT

andre.tricot@univ-tlse2.fr

BIBLIOGRAPHIE

AUBLIN M, RUBAUD M. & TARAUD D. (2003). Didactique des enseignements de sciences et techniques industrielles. Élaborer une stratégie pédagogique. *Séminaire national IGEN IPR*, Paris, octobre 2003. En ligne : <sti.ac-orleans-tours.fr/spip2/IMG/ppt/Elaborer_une_strategie.ppt>.

- AYRES P. (2006). Impact of reducing intrinsic cognitive load on learning in a mathematical domain. *Applied Cognitive Psychology*, n° 20, p. 287-298.
- AYRES P. (2013). Can the isolated-elements strategy be improved by targeting points of high cognitive load for additional practice? *Learning and Instruction*, n° 23, p. 115-124.
- BARTLETT F.C. (1932). *Remembering: An experimental and social study*. Cambridge : Cambridge University Press.
- BELLE D. & TRICOT A. (2012). From isolated interacting elements effect to part-whole effect? *5th International Cognitive Load Theory Conference*, Thallahassee, 9-11 April.
- BELLE D., TRICOT A., & AYRES P. (2012). A comparison of different levels of interactions when using the isolated-elements strategy. *EARLI SIG2 meeting*, Grenoble, 29-31 August.
- BELLE D., TRICOT A. & AYRES P. (2013). A comparison of different design when using the isolated-elements strategy. *6th International Cognitive Load Theory Conference*, Toulouse, 26-28 June.
- BLAYNEY P., KALYUGA S. & SWELLER J. (2010). Interactions between the isolated–interactive elements effect and levels of learner expertise: Experimental evidence from an accountancy class. *Instructional Science*, n° 38, p. 277-287.
- BROUSSEAU G. (2008). *Premières notes sur l'observation des pratiques de classe*. En ligne : < <http://visa.inrp.fr/visa/resau/seminaires/journees-inaugurales-14-et-15-mai-2009-1/premieres-notes-sur-lobservation-des-pratiques-de-classe>>.
- CATRAMBONE R. (1998). The subgoal learning model: Creating better examples so that students can solve novel problems. *Journal of Experimental Psychology: General*, n° 127, p. 355-376.
- CHANQUOY L., TRICOT A. & SWELLER J. (2007). *La charge cognitive*. Paris : A. Colin.
- CHEVALLARD Y. (2009). La notion d'ingénierie didactique, un concept à refonder. Questionnement et éléments de réponse à partir de la TAD. *Cours donné à la 15^e école d'été de didactique des mathématiques*, Clermont-Ferrand, 16-23 août.
- CLARKE T., AYRES P. & SWELLER J. (2005). The impact of sequencing and prior knowledge on learning mathematics through spreadsheet applications. *Educational Technology, Research and Development*, n° 53, p. 15-24.

- COWAN N. (2005). *Working memory capacity*. New York : Psychology Press
- GERJETS P., SCHEITER K. & CATRAMBONE R. (2006). Can learning from molar and modular worked examples be enhanced by providing instructional explanations and prompting self-explanations? *Learning and Instruction*, n° 16, p. 104-121.
- LEAHY W. & SWELLER J. (2005). Cognitive load and the imagination effect. *Applied Cognitive Psychology*, n° 18, p. 857-875.
- MARCUS N., COOPER M. & SWELLER J. (1996). Understanding instructions. *Journal of Educational Psychology*, n° 88, p. 49-63.
- 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*, n° 8, p. 147-154.
- MAYER R. E., MAUTONE P. & PROTHERO W. (2002). Pictorial aids for learning by doing in a multimedia geology simulation game. *Journal of Educational Psychology*, n° 94, p. 171-185.
- MEN (2011). Programme des enseignements technologiques (transversaux et spécifiques des spécialités architecture et construction, énergies et environnement, innovation technologique et éco-conception, systèmes d'information et numérique) du cycle terminal de la série STI2D. *Bulletin officiel du ministère de l'Éducation nationale*, n° spécial n° 3 du 17 mars 2011.
- MILLER G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, n° 63, p. 81-97.
- MUSIAL M. & TRICOT A. (2008a). Enseigner pour que les élèves apprennent : une évidence ? 1^{re} partie. *Technologie - Sciences et techniques industrielles*, n° 156, p. 20-27.
- MUSIAL M. & TRICOT A. (2008b). Enseigner pour que les élèves apprennent : une évidence ? 2^e partie. *Technologie - Sciences et techniques industrielles*, n° 158, p. 52-62.
- PIAGET J. (1937). *La construction du réel chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux & Niestlé.
- POLLOCK E., CHANDLER P. & SWELLER J. (2002). Assimilating complex information. *Learning and Instruction*, n° 12, p. 61-86.
- SWELLER J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, n° 4, p. 295-312.

- SWELLER J. (2010). Element interactivity and intrinsic, extraneous, and germane cognitive load. *Educational Psychology Review*, n° 22, p. 123-138.
- SWELLER J. & CHANDLER P. (1994). Why some material is difficult to learn. *Cognition and Instruction*, n° 12, p. 185-233.
- SWELLER J., AYRES P. & KALYUGA S. (2011). *Cognitive load theory*. New York : Springer.
- SWELLER J., VAN MERRIËNBOER J. & PAAS F. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, n° 10, p. 251-296
- VAN MERRIENBOER J. J. G., KESTE L. & PAAS F. (2006). Teaching complex rather than simple tasks: Balancing intrinsic and germane load to enhance transfer of learning. *Applied Cognitive Psychology*, n° 20, p. 343-352.
- VAN MERRIENBOER J. J. G. & KIRSCHNER P. A. (2007). *Ten steps to complex learning*. Mahwah : Erlbaum.

Abstracts

Study of technical systems in education: contributions of the cognitive load theory

The theory of cognitive load proposes to approach the didactic engineering by focusing on student learning activity. Specifically, it suggests a distinction between the cognitive cost involved in learning (the elaboration of new knowledge) and the cognitive cost implied by the task (the means used to ensure that students learn). In this article, we show how this theory applied in the didactic engineering is used to test the sequencing of learning about complex technical systems, from the whole to parts or parts to the whole, but also the temporary isolation of system elements. Two experiments with students are presented. The first is about a learning on digitization of sound. 33 students participated in this experiment, but no difference between the two sequences tested is obtained, while the learning achieved is very important. The second experiment deals with learning about a more complex system, thermal regulation. 63 students participated in this experiment. The presentation of isolated elements before the presentation of the complete system leads to better learning than with the presentation of interacting elements before the presentation of the system, or even the presentation of the system before elements. These results are discussed and future work are evoked.

KEY-WORDS • Cognition, system analysis, didactics.