

Analyser des exercices corrigés pour apprendre plus efficacement à en résoudre des nouveaux

Article soumis au BUP le lundi 17 février 2025

par Étienne THIBIERGE

Lycée Blaise Pascal - 76100 Rouen

etienne.thibierge@ac-normandie.fr

et Jean-François PARMENTIER

Institut polytechnique des sciences avancées (IPSA) - 31300 Toulouse

Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT) - 31400 Toulouse

jean-francois.parmontier@irit.fr

La psychologie cognitive a montré que la méthode classique qui consiste à demander aux élèves de chercher seuls des exercices une fois le cours présenté n'est pas en accord avec la manière dont la compréhension se développe. Une approche alternative consistant à étudier la correction d'exercices avant de résoudre un exercice traditionnel améliore significativement la capacité des élèves à résoudre des problèmes nouveaux. Cet article présente les principes de l'analyse d'exercices corrigés, en s'appuyant sur des exemples à plusieurs niveaux d'enseignement, puis rapporte une mise en œuvre en deuxième année de classe préparatoire, où ce travail d'analyse de corrigé est à faire en préparation des séances de travaux dirigés.

INTRODUCTION

Pour enseigner la résolution de problèmes nouveaux à nos élèves, nous utilisons souvent la méthode suivante : l'enseignant présente un concept, puis les élèves doivent chercher seuls des exercices, souvent à la maison, avant une correction collective [1]. Pourtant, cette méthode n'est pas optimale, et des études révèlent même une absence de lien entre le nombre d'exercices réalisés et la réussite aux examens [2] ! Les recherches en psychologie cognitive réalisées depuis une trentaine d'années ont permis de comprendre les origines du problème et de proposer une piste d'amélioration : l'analyse d'exercices corrigés (« worked examples » dans la terminologie anglo-saxonne), au cours desquels l'énoncé et la correction sont présentés simultanément, sur papier ou sous forme de capsules vidéo. Ces études montrent que pour des élèves débutants l'analyse d'exercices corrigés est plus efficace que la recherche autonome d'exercices [3].

L'intérêt de l'analyse d'exercices corrigés a été démontré dans un certain nombre de domaines des sciences et techniques, notamment les mathématiques, la chimie et la physique [4-6]. La recherche s'est d'abord concentrée sur les exercices ayant une solution unique et nécessitant l'application d'une procédure avec des étapes déterminées et connues, comme la résolution d'une équation mathématique, mais l'usage des exercices corrigés s'est aussi avéré bénéfique pour la résolution de problèmes ouverts, dont il n'existe pas *a priori* de solution optimale ni de méthode générale de résolution, par exemple l'écriture d'un programme informatique, la démonstration d'un théorème mathématique ou encore le dépannage d'un circuit électrique [5]. L'élève doit alors non pas suivre des étapes déterminées, mais utiliser une variété d'heuristiques, évaluer si sa solution répond au problème posé, et éventuellement changer de méthode de résolution.

Cette efficacité peut surprendre : lorsqu'on lit la solution d'un exercice, on n'a pas l'impression de s'entraîner à en résoudre ! De fait, donner un exercice et son corrigé à lire ne suffit pas pour une réelle analyse, car la lecture seule reste au mieux passive. Le travail de l'enseignant consiste donc à engager l'élève dans une réflexion active sur la correction.

Nous allons dans une première partie expliquer les raisons qui rendent les analyses de corrigés efficaces et proposer des pistes permettant de rendre pertinente une analyse de corrigé, en les illustrant d'exemples à plusieurs niveaux d'enseignement. Dans un second temps, nous présenterons un retour d'expérience en

CPGE (Classes préparatoires aux grandes écoles), discuté à la lumière des résultats d'un sondage réalisé auprès des étudiants.

1 LES PRINCIPES DE L'ANALYSE D'EXERCICES CORRIGÉS

1.1 Comment les intégrer dans une séquence d'enseignement ?

L'analyse de corrigés constitue une étape intermédiaire avant la résolution autonome d'exercices. Le déroulé type d'une séquence pédagogique s'appuyant sur l'analyse de corrigés est donc le suivant :

- ◆ l'enseignant présente un nouveau concept aux élèves ;
- ◆ les élèves analysent eux-mêmes la correction de plusieurs exercices qui illustrent comment ce concept s'applique en pratique ;
- ◆ les élèves travaillent sur des exercices à résoudre, selon les modalités habituelles de travail sur exercices.

Ainsi, cette méthode permet d'utiliser un plus grand nombre d'exercices et de renforcer l'engagement cognitif des élèves. En effet, lorsqu'un exercice est corrigé au tableau par l'enseignant ou par un pair, l'implication des élèves reste souvent faible, alors que l'analyse de corrigés est construite pour favoriser la réflexion et la compréhension des élèves, car il est demandé explicitement à chaque élève d'analyser la correction [7].

1.2 Pourquoi et quand est-ce efficace ?

Les recherches sur la théorie de la charge cognitive et sur l'apprentissage à partir d'exemples permettent d'expliquer le succès et les limites de l'analyse d'exercices corrigés [4, 8-9].

Les élèves débutants ont des connaissances déclaratives rudimentaires sur les concepts qui viennent de leur être enseignés, mais ne savent pas encore les appliquer. Lorsqu'ils résolvent seuls des exercices à ce stade, ils utilisent des stratégies inefficaces, basées sur des ressemblances superficielles (mots-clés...) plutôt que sur des principes scientifiques [4, 10]. Utiliser ces stratégies interfère alors négativement avec l'apprentissage [8-9]. Au contraire, analyser des exercices corrigés leur montre comment ces nouvelles connaissances s'appliquent. Une fois ces bases acquises, ils peuvent alors s'entraîner à résoudre seuls de nouveaux exercices.

L'approche pédagogique doit donc s'adapter au niveau d'expertise des élèves sur le sujet enseigné, indépendamment du niveau scolaire (collège, lycée...). À chaque nouvelle leçon, l'enseignant doit évaluer si ses élèves sauront appliquer seuls les bonnes méthodes en faisant appel aux bons concepts. S'ils peinent à structurer leur raisonnement, l'analyse d'exercices corrigés est profitable. S'ils identifient spontanément les bonnes méthodes, il est préférable de les laisser résoudre les exercices seuls, ce qui leur permettra d'améliorer leur vitesse d'exécution en automatisant certaines tâches et de gagner en flexibilité en travaillant sur des situations de plus en plus diverses [4, 11].

1.3 Comment rendre actif et pertinent le travail d'un corrigé ?

Lorsqu'ils étudient un corrigé, les élèves génèrent des auto-explications, c'est-à-dire des déductions générées pour eux-mêmes qui les aident à comprendre et vont au-delà des informations données [12]. Cependant, beaucoup ne les produisent pas spontanément ou se focalisent sur des détails superficiels au détriment des principes sous-jacents. L'efficacité de l'analyse d'un exercice corrigé reposant essentiellement sur la qualité des auto-explications générées, l'enseignant doit donc mettre en place des stratégies pour favoriser l'émergence d'auto-explications pertinentes. Deux principales méthodes s'avèrent efficaces : la paire d'exercices et les questions d'analyse.

La technique de la paire consiste à proposer simultanément un exercice corrigé et un exercice analogue à résoudre, nécessitant d'appliquer les mêmes concepts et procédures mais dans des situations légèrement différentes. On constate expérimentalement que l'élève survole d'abord le corrigé, tente de résoudre le second exercice, puis revient au corrigé pour surmonter ses blocages, ce qui lui permet d'en généraliser les principes [3].

Dans la deuxième méthode, les questions d'analyse sont des questions portant sur le corrigé lui-même, qui peuvent concerner les principes scientifiques appliqués ou le rôle d'une étape du raisonnement [5]. Le choix des questions et leur formulation doivent encourager une approche méthodique des exercices. Trois manières de poser les questions sont possibles : des questions ouvertes, qui laissent la liberté à l'élève de formuler son raisonnement mais peuvent poser problème aux élèves en difficulté, qui risquent d'y apporter des réponses fausses ; sous forme de questions à choix multiples, qui comportent davantage de guidage et peuvent permettre de soulever les difficultés et les mécompréhensions les plus classiques *via* les réponses leurres ; ou enfin en proposant un texte à trous à compléter par l'élève [7]. De plus, les questions à choix multiples et les textes à trous peuvent offrir à l'élève un retour immédiat sur ses réponses, en particulier en utilisant un outil numérique. Les illustrations du paragraphe suivant proposent des questions ouvertes, qui pourraient bien sûr être déclinées dans les autres formats. Certaines de ces questions portent sur les principes scientifiques utilisés, et d'autres sur le rôle spécifique de certaines étapes.

1.4 Quelques exemples

Exemple 1 : exercice sur les équations de réaction, niveau Quatrième

Énoncé : équilibrer l'équation



Solution :

Étape 1 - liste des atomes impliqués : C, H et O

Étape 2 - équilibrer le carbone :

Trois atomes C sont présents côté réactifs, un seul côté produits.

Côté produits, C n'apparaît que dans CO_2 , on place donc un 3 devant CO_2 .

L'équation devient : $\text{C}_3\text{H}_8 + \dots \text{O}_2 \rightarrow \mathbf{3} \text{CO}_2 + \dots \text{H}_2\text{O}$

Étape 3 - équilibrer l'hydrogène :

Huit atomes H sont présents côté réactifs, deux côté produits.

Côté produits, C n'apparaît que dans H_2O et il y apparaît deux fois. Comme $8 = 2 \times 4$, on place un 4 devant H_2O .

L'équation devient : $\text{C}_3\text{H}_8 + \dots \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{CO}_2 + \mathbf{4} \text{H}_2\text{O}$

Étape 4 - équilibrer l'oxygène :

Deux atomes O sont présents côté réactifs, dix côté produits.

Côté réactifs, O n'apparaît que dans O_2 et il y apparaît deux fois. Comme $10 = 2 \times 5$, on place un 5 devant O_2 .

L'équation devient : $\text{C}_3\text{H}_8 + \mathbf{5} \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$

Étape 5 - vérifier l'équilibrage :

Atome	Côté réactifs	Côté produits
C	3	3
H	8	8
O	10	10

Questions d'analyse :

- À quoi sert l'étape 1 ?
- À l'étape 3, pourquoi fait-on la multiplication ?
- Pourquoi commence-t-on par le carbone et finit-on par l'oxygène ?
- Aurait-il été aussi efficace de commencer par équilibrer l'hydrogène ? De terminer avec ?

Exemple 2 : extrait d'exercice sur le principe d'inertie, niveau Seconde

Énoncé : après avoir sauté d'un avion et ouvert son parachute, un parachutiste descend verticalement dans l'air à vitesse constante. Quelle est la force la plus importante : la force exercée par le parachute sur l'homme ou le poids de l'homme ?

L'exercice pourrait être complété par la représentation des forces sur un schéma.

Solution : le mouvement du parachutiste étant rectiligne uniforme, les deux forces sont d'égale intensité.

Questions d'analyse :

- a) Quel élément de l'énoncé indique que le mouvement est rectiligne ?
- b) Quel élément de l'énoncé indique que le mouvement est uniforme ?
- c) Quel principe physique permet de conclure ? Pourquoi ?

Exemple 3 : extrait d'exercice sur l'enthalpie de réaction, niveau Bac+2

Énoncé : dans un moteur, la propulsion est assurée la combustion d'un mélange stœchiométrique air-essence initialement à 20 °C. L'essence peut en première approche s'assimiler à un unique alcane C₆H₁₄.

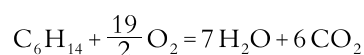
1 - Écrire l'équation de combustion de l'essence, d'enthalpie standard de réaction : $\Delta_r H^\circ = - 4200 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

2 - En raisonnant sur n mol d'alcane, déterminer la température au sein du moteur juste après combustion adiabatique du mélange.

L'exercice pourrait être complété par une étude du rendement thermodynamique ou un bilan carbone.

Solution :

1 - L'équation de réaction s'écrit



2 – Le bilan de matière s'écrit

	C ₆ H ₁₄	+	$\frac{19}{2}\text{O}_2$	→	7 H ₂ O	+	6 CO ₂
initial	n		$n' = \frac{19}{2}n$		0		0
final	0		0		7n		6n

On décompose la transformation réelle en deux étapes modèles :

- d'abord, la réaction chimique isotherme ;
- puis le changement de température de $T_1 = 20^\circ\text{C}$ à T_F .

Le bilan d'enthalpie s'écrit :

$$\Delta H = 0 = n \Delta_r H^\circ + (7n C^\circ_{p,\text{H}_2\text{O}} + 6n C^\circ_{p,\text{CO}_2} + 38n C^\circ_{p,\text{N}_2})(T_F - T_1)$$

d'où
$$T_F = T_1 - \frac{\Delta_r H^\circ}{7 C^\circ_{p,\text{H}_2\text{O}} + 6 C^\circ_{p,\text{CO}_2} + 38 C^\circ_{p,\text{N}_2}} = 2970 \text{ K.}$$

Questions d'analyse :

- a) Pourquoi le diazote n'apparaît-il pas dans l'équation bilan alors qu'il est présent dans l'air ?
- b) Pourquoi a-t-on $n' = 19 n/2$?
- c) Pourquoi peut-on décomposer la transformation en deux étapes successives alors que les phénomènes ont lieu simultanément ?

- d) Justifier l'égalité $\Delta H = 0$.
- e) Pourquoi les capacités thermiques de C_6H_{14} et O_2 n'apparaissent-elles pas ?
- f) Justifier le facteur 38 apparaissant devant C_{p,N_2}° .

2 UN EXEMPLE DE MISE EN ŒUVRE EN CLASSE PRÉPARATOIRE

2.1 Contexte et objectifs

L'utilisation des analyses de corrigés a été mise en place depuis septembre 2023 dans le cadre de l'enseignement de physique-chimie d'une classe de CPGE seconde année, filière Physique et Technologie (PT). Eût égard à la densité du programme, le volume hebdomadaire de deux heures de travaux dirigés (TD) pour quatre heures de cours magistral se doit d'être bien utilisé. Pourtant, de trop nombreux étudiants assistent au TD sans un travail minimal du cours. Lors de discussions informelles, ils arguent souvent qu'ils voient peu de bénéfice au travail préparatoire par rapport au temps à y consacrer, souvent pour des difficultés d'organisation de leur temps de travail mais aussi car ils peinent à identifier les points les plus importants du cours et tendent à se perdre dans des détails. Ces remarques sont encore plus prégnantes chez les étudiants les plus en difficulté.

Aussi, l'analyse d'exercices corrigés à faire à la maison en préparation aux TD est apparue dans ce contexte comme une solution intéressante permettant de répondre aux objectifs suivants :

- ◆ faciliter la transition entre le cours et les exercices par un format intermédiaire ;
- ◆ motiver les étudiants, leur donner confiance en eux, et les inciter à préparer la séance de TD en donnant un travail à la portée de tous ;
- ◆ orienter leur premier travail du cours vers les aspects les plus pertinents pour l'appliquer efficacement dans les exercices.

2.2 Fonctionnement

L'ensemble des exercices utilisés sont librement accessibles sur le site Internet de l'auteur [13]. Il s'agit généralement d'exercices emblématiques sur le sujet, accompagnés typiquement de cinq à huit questions d'analyse, axées sur les méthodes de résolution, les difficultés conceptuelles, et les techniques de calcul (bornes d'intégration, éléments différentiels, conversions...). La mémorisation « par cœur » de formules ou de définitions ne fait pas l'objet de questions.

Une analyse de corrigé est à faire à la maison avant environ deux séances de TD sur trois. En classe, un dialogue entre étudiants et enseignant permet de corriger les questions d'analyse, puis d'élargir le point de vue en mettant en évidence les confusions et les raisonnements erronés fréquemment rencontrés sur des exercices analogues. Une durée de dix à quinze minutes est consacrée à l'analyse de corrigé en début de séance, qui se déroule ensuite sur un format traditionnel.

En pratique, les réponses des étudiants aux questions de calcul s'avèrent majoritairement correctes. En revanche, les réponses aux questions portant sur les nouvelles méthodes à acquérir sont souvent partielles ou inadéquates, voire parfois complètement orthogonales à ce qui a été discuté en cours. Cette différence peut en partie s'expliquer par le fait que les questions sur les techniques de calculs sont transverses et agissent souvent comme des rappels, au contraire des questions portant sur les nouvelles méthodes propres à un domaine particulier. Ce taux de mauvaises réponses soulève aussi la problématique de la formulation des questions d'analyse, sans doute pas toujours suffisamment adaptée au niveau d'expertise des étudiants : des questions plus guidées pourraient sans doute permettre d'augmenter le taux de bonnes réponses. Enfin, ces mauvaises réponses assez fréquentes questionnent également l'investissement des étudiants dans le travail d'ana-

lyse de corrigé, compte tenu notamment de leur ressenti mentionné plus haut sur l'intérêt de la préparation des TD, mais aussi le déroulement de la partie « cours » et ce qu'en retirent réellement les étudiants.

2.3 Qu'en pensent les étudiants ?

Pour évaluer l'appréciation des étudiants sur cette méthode et comprendre comment ils se la sont appropriée, un sondage nominatif à participation obligatoire a été réalisé en fin d'année. Sans constituer une étude robuste sur le plan statistique, il apporte néanmoins un éclairage intéressant.

La première section du questionnaire s'intéressait aux pratiques des étudiants dans le cadre de l'analyse de corrigé. En moyenne, ils ont déclaré consacrer une vingtaine de minutes à cette activité, travaillée en grande majorité seul la veille du TD. Cette durée de travail semble sans corrélation avec leurs résultats académiques (cf. figure 1), mais se rapproche davantage de l'impression subjective de l'enseignant quant à l'implication de chaque étudiant dans son travail.

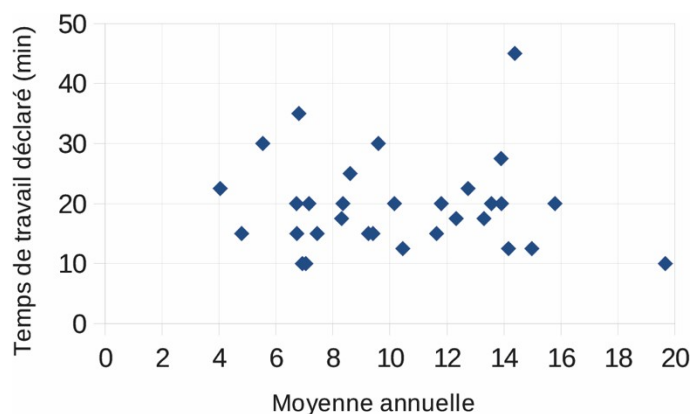


Figure 1 – Temps de travail moyen déclaré en fonction de la moyenne annuelle de chaque étudiant

Les réponses indiquent une consultation non systématique des supports de cours (cf.-figure 2) : seuls 20 % des étudiants le font « presque toujours », 65 % déclarent les avoir utilisés « assez souvent », et 15 % « rarement ». Ces comportements apparaissent de nouveau peu reliés aux résultats scolaires mais plus conformes à l'impression de l'enseignant sur l'investissement de l'étudiant. On trouve donc ici un probable élément d'explication au taux de réponses fausses proposées par les étudiants aux questions portant sur les nouvelles méthodes à acquérir. Par ailleurs, la grande majorité des étudiants retravaille rarement ou jamais le corrigé analysé après la séance de TD.

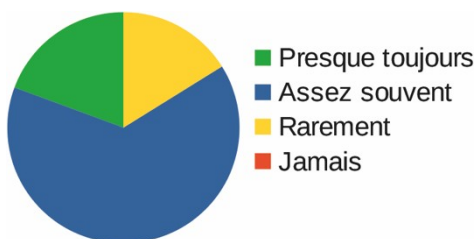


Figure 2 – À quelle fréquence consultez-vous les supports de cours en préparant une analyse de corrigé ?

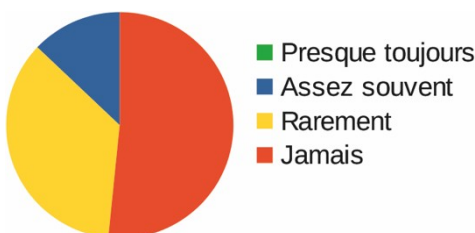


Figure 3 – À quelle fréquence retravaillez-vous l'analyse de corrigé après la séance ?

La seconde partie du sondage portait sur l'intérêt des étudiants pour les analyses de corrigés et leur perception des bénéfices qu'ils en ont tiré, mesuré par leur degré d'accord avec différentes affirmations. Les résultats montrent que les étudiants ont beaucoup apprécié la méthode. Comme le montrent les figures 4 à 6, 93 % des étudiants sont tout à fait ou plutôt en accord avec le fait qu'une analyse de corrigé est plus efficace qu'une simple relecture du cours pour préparer un TD, 83 % estiment que les analyses de corrigé permettent de gagner en efficacité sur les exercices au format traditionnel, et 61 % considèrent plutôt ou tout à fait que les analyses de corrigé aident à identifier les points importants du cours. Enfin, à l'unanimité, 100 % des étudiants recommandent de maintenir cette méthode dans les années suivantes.

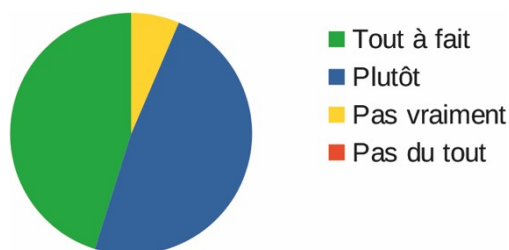


Figure 4 – Degré d'accord avec l'affirmation « Une analyse de corrigé permet de préparer la séance de TD plus efficacement qu'une simple relecture du cours ».

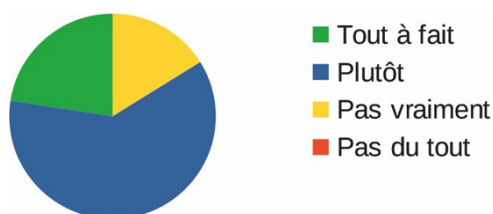


Figure 5 – Degré d'accord avec l'affirmation « Avoir travaillé une analyse de corrigé permet d'être plus efficace sur les autres exercices »

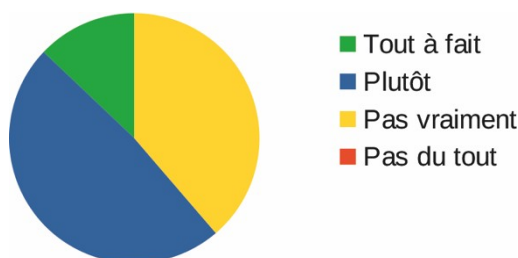


Figure 6 – Degré d'accord avec l'affirmation « Une analyse de corrigé permet de mieux identifier les points du cours les plus utiles pour les exercices »

2.4 Difficultés et limitations

L'analyse de corrigé constituant une nouveauté pour les étudiants, les objectifs et les attentes associés ont été explicités à plusieurs reprises en début d'année. Cependant, l'observation d'erreurs fréquentes, combinée à l'absence de consultation du cours par certains étudiants, suggère qu'insister encore plus régulièrement sur l'importance de l'analyse de corrigé en tant que travail permettant de revoir le cours et de préparer le TD aurait pu être bénéfique. Une attention particulière a été portée sur ce point lors de la deuxième année d'utilisation de la méthode, sans changer notablement l'impression de l'enseignant quant à la qualité d'ensemble des réponses.

Du point de vue pédagogique, calibrer le niveau de détail des corrigés en vue du travail d'analyse nécessite une réflexion spécifique. Un corrigé trop succinct peut entraver la compréhension des étapes de résolution par les étudiants, limitant ainsi le bénéfice qu'ils en tirent, tandis qu'un corrigé trop détaillé peut rendre difficile la formulation de questions d'analyse pertinentes. Il s'est donc avéré la plupart du temps nécessaire

d'élaborer des exercices et des corrigés spécifiques, car la réutilisation de matériel pédagogique déjà existant ne se prêtait que rarement à cet usage.

Un dernier aspect à considérer concerne la gestion du temps alloué aux analyses de corrigés lors des séances, une crainte naturelle étant que le temps passé sur l'analyse de corrigés ralentisse le déroulement global des TD. En pratique, le temps passé a été globalement compensé par un gain d'efficacité dans les exercices d'application, et cette approche a permis de maintenir un volume d'exercices d'application et de recherche globalement similaire aux années précédentes. Dans tous les cas, cette question soulève celle de la finalité des TD : doit-on privilégier la quantité d'exercices traités ou l'assimilation effective des méthodes de résolution par les étudiants ? Même s'il n'a pas été observé ici, un ralentissement des TD aurait-il été réellement problématique ?

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

En conclusion de cette expérimentation en CPGE, le travail d'analyse de corrigé a globalement permis d'atteindre les objectifs initiaux, en facilitant la transition entre les séances de cours et de TD, et en impliquant davantage les étudiants dans la préparation de ces séances. Le sondage réalisé a confirmé l'intérêt des étudiants pour cette approche. À l'avenir, elle pourrait également être réinvestie avec profit pour un travail de révision et consolidation des acquis des années antérieures, souvent difficile à mener en autonomie pour les étudiants. Un premier travail en ce sens a rencontré un écho positif auprès de la nouvelle promotion.

Bien sûr, les résultats du sondage d'intérêt ne constituent pas une preuve rigoureuse de l'efficacité de l'analyse d'exercices résolus sur l'apprentissage des étudiants. Cependant, comme indiqué dans la première partie de cet article, cette méthode a déjà montré son efficacité dans de nombreux contextes. Le ressenti des étudiants et les premières difficultés observées sont donc une première base de résultats qui pourraient servir à d'autres enseignants souhaitant mettre en œuvre cette méthode. En effet, au-delà du contexte spécifique de l'expérimentation décrite dans cet article, la littérature scientifique montre que le travail d'analyse de corrigés peut être transposable avec profit à tous les niveaux scolaires.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] T. S. Hilbert, A. Renkl, S. Schworm, S. Kessler and K. Reiss, "Learning to teach with worked-out examples: a computer-based learning environment for teachers", *J. Comput. Assist. Learn.*, vol. 24, n° 4, p. 316-332, August 2008.
- [2] T. Byun and G. Lee, "Why students still can't solve physics problems after solving over 2000 problems", *Am. J. Phys.*, vol. 82, n° 9, p. 906-913, September 2014.
- [3] W. M. Carroll, "Using worked examples as an instructional support in the algebra classroom", *J. Educ. Psychol.*, vol. 86, n° 3, p. 360-367, 1994.
- [4] A. Renkl, "Toward an Instructionally Oriented Theory of Example-Based Learning", *Cogn. Sci.*, vol. 38, n° 1, p. 1-37, January/February 2014.
- [5] A. Renkl, *Instruction Based on Examples*, in *Handbook of Research on Learning and Instruction*, 2nd edition, Routledge, 2017.
- [6] J. L. Booth, K. M. McGinn, L. K. Young and C. Barbieri, "Simple Practice Doesn't Always Make Perfect: Evidence From the Worked Example Effect", *Policy Insights Behav. Brain Sci.*, vol. 2, n° 1, p. 24-32, October 2015.
- [7] R. Wylie and M. T. H. Chi, *The Self-Explanation Principle in Multimedia Learning*, in *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, edited by R. Mayer, 2nd edition, Cambridge : Cambridge University Press, p. 413-432, August 2014.

- [8] J. Sweller, J. J. G. van Merriënboer and F. G. W. C. Paas, “Cognitive Architecture and Instructional Design”, *Educ. Psychol. Rev.*, vol. 10, p. 251-296, September 1998.
- [9] F. Paas and T. van Gog, “Optimising worked example instruction: Different ways to increase germane cognitive load”, *Learn. Instr.*, vol. 16, n° 2, p. 87-91, April 2006.
- [10] M. T. H. Chi, P. J. Feltovich and R. Glaser, “Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices”, *Cogn. Sci.*, vol. 5, n° 2, p. 121-152, April 1981.
- [11] S. Kalyuga, P. L. Ayres, P. Chandler and J. Sweller, “The expertise reversal effect”, *Educ. Psychol.*, vol. 38, n° 1, p. 23-31, January 2003.
- [12] B. Rittle-Johnson and A. M. Loehr, Instruction Based on Self-Explanation, in *Handbook of Research on Learning and Instruction*, 2nd edition, Routledge, 2017.
- [13] E. Thibierge, site internet professionnel : <http://www.etienne-thibierge.fr>



Étienne THIBIERGE

Professeur de sciences physiques en CPGE

Lycée Blaise Pascal

Rouen (Seine-Maritime)

Jean-François Parmentier



Maître de conférences

Institut polytechnique des sciences avancées (IPSA)

Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT)

Toulouse (Haute-Garonne)