Des environnements numériques pour étayer l'investigation scientifique et la conception expérimentale : de copex-chimie à LabBook

Cédric d'Ham[1], Isabelle Girault[2], Patricia Marzin[3]

Equipe MeTAH, Modèles et Technologies pour l'Apprentissage Humain – LIG, Laboratoire d'Informatique de Grenoble – Université Grenoble-Alpes.

[1] *cedric.dham@imag.fr* [2] *isabelle.girault@imag.fr* [3] *patricia.marzin@imag.fr*

Résumé

Deux logiciels d'aide à la conception expérimentale au sein d'une démarche expérimentale sont présentés. Le premier encadre le travail des étudiants pour une tâche particulière de conception expérimentale en chimie. Diverses stratégies d'étayage sont implémentées dans le logiciel et testées sur la base d'une expérimentation avec 39 étudiants de Licence 1. Les résutats montrent la complexité de la conception expérimentale pour des étudiants n'ayant qu'une aide minimale sur la base de documents papier : les protocoles produits restent très imprécis. La pré-structuration de la tâche par le logiciel force les étudiants à se confronter à la complexité de la conception expérimentale, mais ne leur permet pas de mener à bien leur tâche. Seul l'apport de rétroactions sur les erreurs identifiées dans les protocoles leur permet d'aller au bout de la tâche de conception expérimentale. Un second logiciel est évoqué, qui reprend certains principes du premier, mais élargit son domaine d'utilisation à toute séance expérimentale, qu'elle comprenne ou non de la conception expérimentale.

Mots clés

Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) – Investigation scientifique – Conception expérimentale – Etayage – Praxéologies

Abstract

Two computer environments whose aim is to scaffold inquiry learning and more specifically experimental design by learners are presented. In the first environment students are engaged in a particular task of experimental design in chemistry. In this environment, diverse strategies of scaffolding have been implemented. They are evaluated in a test with 39 first-year University students. The results show that experimental design is a complex task for students when they are working with minimal guidance and no computer environment. The outcome is a very imprecise procedure. A pre-structuring of the procedure by the computer environment forces the students to face the complexity of the experimental design but this is not sufficient for them to succeed. The students only succeed when they are provided with individualized feedbacks on the errors detected in their procedures by an artificial tutor. We mention a second computer environment, based on similar principles than the first one, that extends its area of application to any experimental activity that includes experimental design or not.

Key words

Technology-Enhanced-Learning Systems – Scientific inquiry – Experimental design – Scaffolding – Praxeologies

Introduction

Lorsque des étudiants sont engagés dans une démarche d'investigation, ou plus spécifiquement dans la résolution d'un problème scientifique par une expérimentation, ils peuvent être confrontés à la tâche de conception expérimentale. Koretsky, Amatore, Barnes, et Kimura (2008) observent des activités cognitives de plus haut niveau lorsque les élèves sont confrontés à ce type de tâche. Karelina et Etkina (2007) trouvent que, lorsque les étudiants conçoivent leurs propres expérimentations, ils passent plus de temps à discuter à propos de concepts du domaine que les étudiants suivant des travaux pratiques traditionnels. Arce et Betancourt (1997) ont observé que, dans les examens, les étudiants montrent une meilleure compréhension des concepts liés aux expérimentations qu'ils ont conçues eux-mêmes. Etkina, Karelina et Ruibal-Villasenor (2010) montrent que lorsque les étudiants ont l'habitude de concevoir des expérimentations, ils réussissent de façon identique aux examens que ceux qui n'ont pas conçu leurs expérimentations, mais ils développent d'autres compétences scientifiques autour des méthodes, telles que celles utilisées par les scientifiques.

La conception expérimentale est une tâche complexe pour les élèves (Séré & Beney, 1997), ce qui peut expliquer pourquoi cette activité est peu pratiquée en classe (Girault et al., 2012). Certaines difficultés ont été recensées chez les élèves, comme analyser correctement le but ou écrire un texte bien construit (Marzin & De Vries, 2008), prendre en compte la question de la précision de la mesure (Girault et al., 2007) ou bien encore mobiliser les concepts appropriés (Laugier & Dumon, 2003).
Par conséquent, si nous voulons que les étudiants conçoivent des expérimentations, cette tâche a besoin d'être étayée : « *Design activities, when embedded in an inquiry cycle and appropriately scaffolded and supplemented with reflection, can promote the development of scientific abilities that are an important part of scientific practice* » (Etkina et al., 2010).
Les environnements informatiques peuvent accompagner les élèves dans leur démarche d'investigation en étayant leur activité et leur compréhension. Reiser (2004) considère deux catégories pour les étayages : (a) structurer la tâche pour aider l'élève à la mener à bien ; (b) problématiser la tâche pour rendre certains aspects du travail des élèves plus complexe, dans le but de renforcer l'apprentissage. D'après Reiser, il est nécessaire de trouver un équilibre entre ces deux types d'étayage. Hmelo-Silver, Duncan et Chinn (2007) considèrent les possibilités d'étayage par des environnements informatiques pour structurer les tâches complexes : (a) une tâche peut être structurée de façon à permettre à l'élève de focaliser son attention sur des aspects en lien avec des objectifs d'apprentissage ; (b) l'environnement informatique peut restreindre les possibilités offertes à l'élève. Ceci est en cohérence avec la vision de Quintana et al (2004), qui envisagent l'environnement informatique agissant lui-même comme étayage, plutôt que des fonctionnalités d'aide implémentées dans le logiciel.
Graesser, McNamara, et VanLehn (2005) sont convaincus que les tuteurs artificiels sont nécessaires, même si un équilibre est à trouver entre le tuteur artificiel et le tuteur humain : "*One-on-one scaffolding is not always a viable option in a classroom with a single instructor*." (Morgan & Brooks, 2012). Cependant, la plupart des outils d'étayages ont une capacité limitée à individualiser leur aide (Reiser, 2004). Fournir des supports adaptés aux besoins d'un individu – ce qu'il faut, au moment opportun – est un défi majeur : pour cela, le processus d'étayage doit évaluer à tout instant l'état de connaissance de l'apprenant (de Jong & van Joolingen, 1998).

copex-chimie : un EIAH pour étayer une tâche particulière de conception expérimentale

Nous avons développé un environnement informatique copex-chimie qui étaye l'activité de conception expérimentale pour une expérimentation spécifique en chimie. Copex-chimie est une application web (http://copex-chimie.imag.fr) dans laquelle les apprenants doivent déterminer, par dosage spectrophotométrique, la concentration du colorant E124 dans un sirop de grenadine. Cette situation expérimentale en chimie appartient aux problèmes de conception (Apedoe & Ford, 2010) pour lesquels la question à résoudre est déjà donnée aux élèves et il n'est pas nécessaire de formuler des hypothèses. Par conséquent les étudiants doivent se concentrer sur la conception de l'expérimentation et l'analyse de données expérimentales pour résoudre le problème. Dans notre situation, ils n'ont pas à réaliser physiquement l'expérience puisque ils obtiennent les données expérimentales par simulation, suivant le protocole qu'ils ont produit.

Etayage par la pré-structuration du protocole à concevoir

Un modèle de protocole expérimental a été décrit précédemment (Girault et al., 2012) basé sur le modèle de l'activité de Leont'ev (1978). Dans notre modèle, un protocole comprend deux types de tâche : étapes et actions, ces dernières étant décrites par des paramètres. Pour étayer l'activité de conception expérimentale, copex-chimie pré-structure le protocole à deux niveaux, en accord avec ce modèle. A haut niveau, le protocole doit être décrit en suivant trois étapes imposées à l'apprenant : (1) préparer les solutions de la gamme étalon, (2) obtenir les points de la courbe étalon et (3) déterminer la concentration en E124 dans le sirop. A plus bas niveau, les actions constituant le protocole doivent être choisies parmi une liste de huit actions imposées (par exemple, préparer une solution par dilution, mesurer une absorbance …). Pour chaque action ajoutée au protocole, l'apprenant doit spécifier les paramètres associés (deux à cinq paramètres). Par exemple, pour l'action « préparer une solution par dilution », il est nécessaire de spécifier les paramètres suivants : nom de la nouvelle solution, volume de solution mère, nature de solution mère, solvant et volume total de la nouvelle solution (voir Figure n°1). Dans ces conditions, pour répondre au problème posé, un protocole valable est composé d'au moins 26 actions ordonnées avec leurs paramètres.

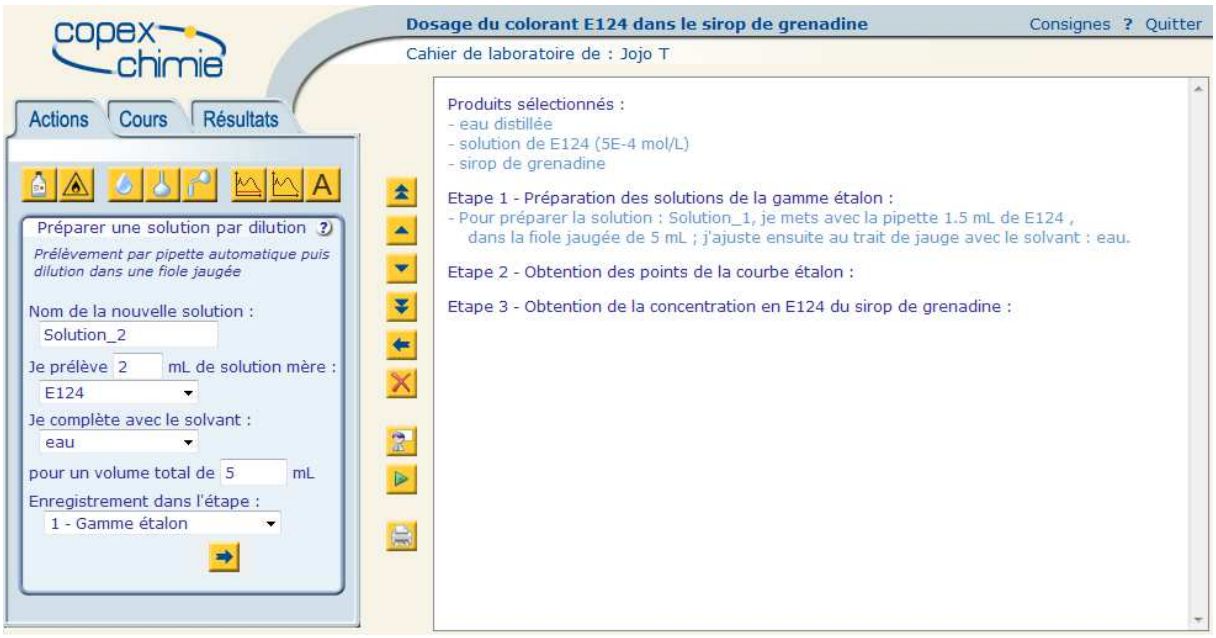


Figure n°1. *copex-chimie au début du travail de l'apprenant : à droite se trouve le protocole expérimental de l'apprenant pré-structurée selon trois étapes (lignes foncées) ; à gauche se trouve l'espace utilisé par l'apprenant pour définir une nouvelle action en remplissant les cases libres correspondant aux paramètres de l'action. Lorsque les paramètres sont spécifiés, l'action apparaît automatiquement dans le protocole du côté droit, sous l'étape choisie (lignes avec puce).*

L'étayage par pré-structuration correspond à ce que divers auteurs appellent la structuration de la tâche dans le but de faciliter la réussite à des tâches complexes (Reiser, 2004, Quintana et al, 2004).

Etayage par des rétroactions sur des données simulées ayant le statut de résultats empiriques

Une autre stratégie d'étayage intégrée dans copex-chimie correspond aux rétroactions données aux apprenants. Il existe deux sortes de rétroaction : (a) des résultats expérimentaux en lien avec le protocole et (b) les erreurs détectées dans le protocole par un tuteur artificiel. Dans cette section, nous décrivons le premier type de rétroaction.

A tout moment de leur travail et sans limitation, les apprenants peuvent demander au système de fournir les résultats expérimentaux correspondant au protocole qu'ils ont décrit jusque là. Ces résultats sont issus d'un simulateur de spectrophotomètre qui donne des valeurs d'absorbances et des spectres (voir Figure n°2). Ceci est rendu possible par la pré-structuration en action et paramètres qui peuvent être utilisés par la simulation.

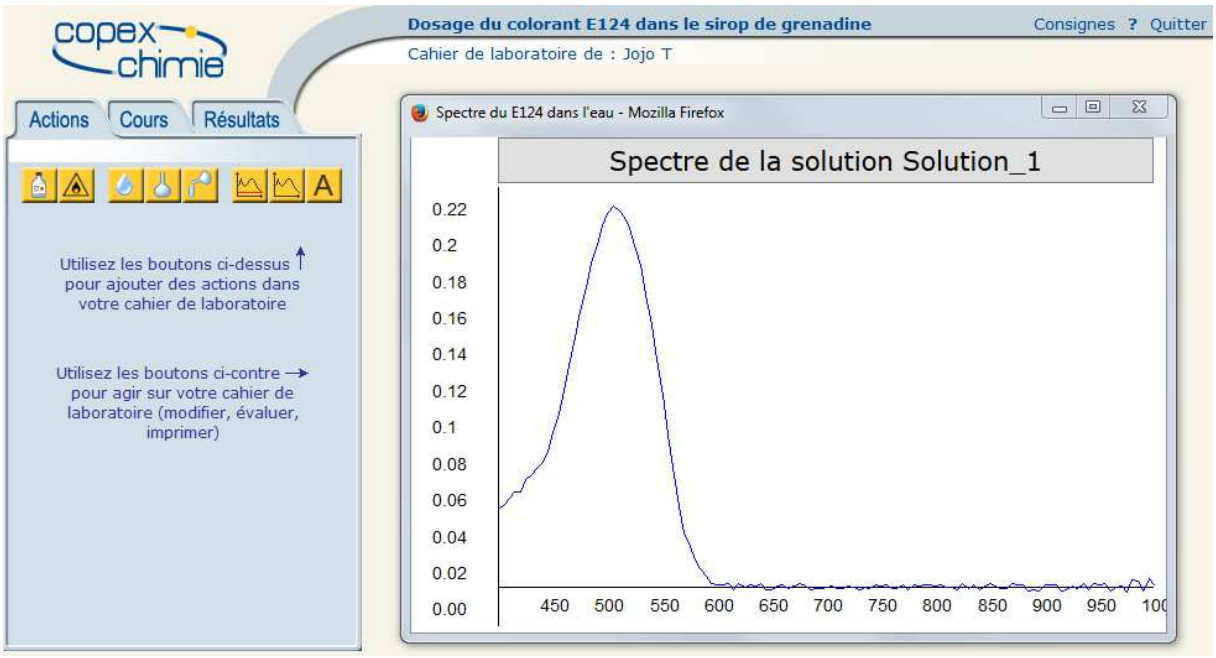


Figure n°2. *copex-chimie avec une fenêtre de résultat ouverte. Celle-ci montre un spectre d'absorption simulé sur la base des paramètres des actions spécifiées par l'apprenant dans son protocole.*

Etayage par des rétroactions sur les erreurs détectées dans les protocoles

Sur demande, l'apprenant peut obtenir les rétroactions détectées dans son protocole par un tuteur artificiel. Le tuteur évalue les trois étapes du protocole selon un système de contraintes tel que décrit par Ohlsson (2002). Avec ce dispositif, les erreurs habituelles des apprenants sont détectées, cela même s'il n'existe pas un protocole unique valable.

Lorsque le diagnostic est effectué, le tuteur artificiel indique à l'apprenant les erreurs détectées dans le protocole (voir Figure n°3). L'enseignant peut initialement paramétrer la rétroaction du tuteur artificiel par le nombre maximal d'accès total au tuteur durant la session, et par le niveau de détail utilisé pour décrire les erreurs. Le niveau 1 indique l'avancement global pour chaque étape grâce à une jauge. Le niveau 2 fournit le nombre d'erreurs dans chaque étape, les erreurs étant organisées dans six catégories (objectifs, problèmes pratiques, rinçages, gamme étalon, homogénéisations, spectrophotométrie). Finalement, le niveau 3 donne des détails pour chaque erreur. Il est possible de donner aux élèves accès aux trois niveaux, ou bien de limiter l'accès au niveau 1 ou aux niveaux 1 et 2. De plus, le tuteur artificiel fournit des liens vers des pages de cours dans copex-chimie, en relation avec les erreurs détectées. Ces pages de cours peuvent également être consultées à tout moment en accès direct.

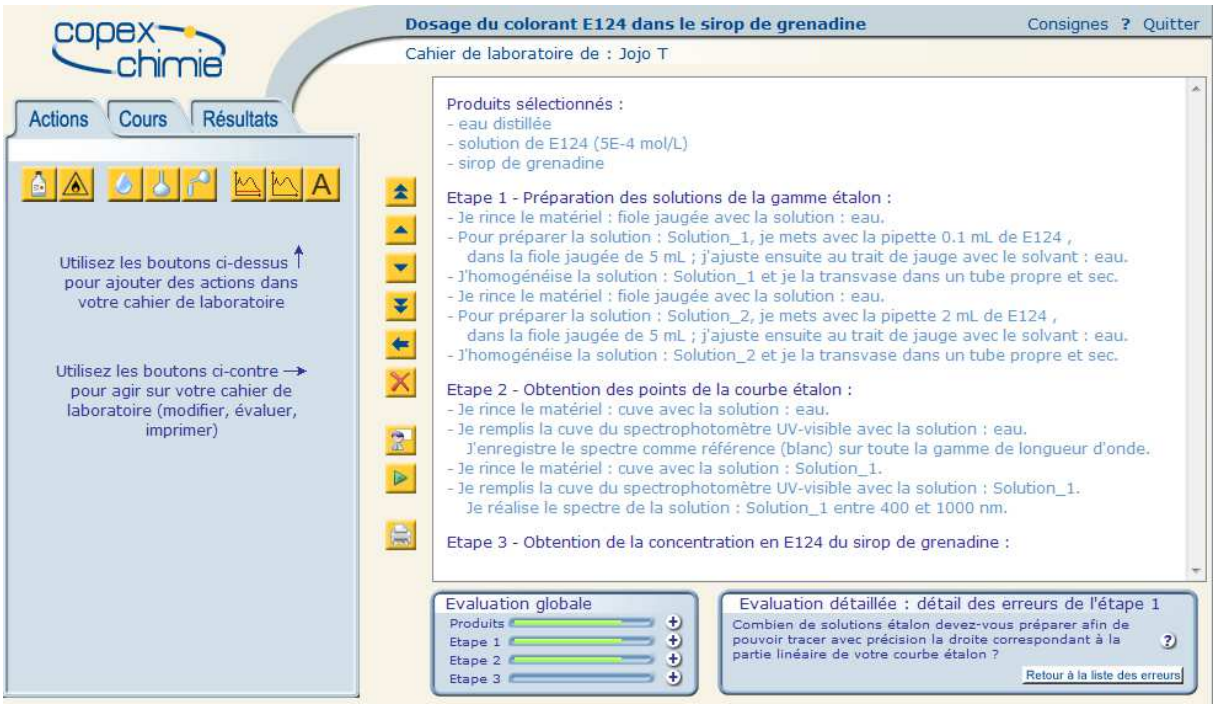


Figure n°3. *copex-chimie avec le cadre du tuteur artificiel ouvert sous le protocole : sur la gauche, se trouve l'évaluation globale étape par étape avec les jauges d'avancement (niveau 1) ; le détail d'une erreur (niveau 3) apparaît sur la droite à la demande de l'élève. Le niveau 2 n'est pas visible sur cette figure.*

Le contenu des messages donnés au niveau 3 est basé sur la théorie anthropologique du didactique (TAD) (Chevallard, 1999 ; Rodriguez, Bosch, & Gascon, 2007). Le modèle épistémologique général fournit par la TAD propose une description de l'activité et de la connaissance en terme de praxéologies dont les quatre composantes principales sont les tâches, les techniques, les technologies et les théories : une tâche est un problème que l'apprenant doit résoudre ; la technique est le processus suivi pour accomplir la tâche ; la technologie est le discours qui permet de décrire, expliquer, justifier la technique utilisée ; la théorie est un discours plus général nécessaire pour comprendre les concepts mis en jeu dans la technologie.
Ce modèle de l'activité permet l'analyse des connaissances de chimie liée à la conception expérimentale dans copex-chimie. Nous caractérisons chaque erreur avec deux critères : la dimension activité (la tâche est absente ou présente avec une technique erronée) et la dimension connaissance (la tâche et la technique concernée sont-elles objectifs d'apprentissage ?). A partir de ces deux critères, nous adoptons alors la stratégie décrite dans le tableau n°1 pour produire le message de rétroaction à destination de l'apprenant.

Caractéristiques de l'erreur	**Contenu du message de rétroaction**
Tâche non-considérée	Contenu centré sur le type de tâche non-considérée
Technique incorrecte / objectif d'apprentissage	Des indications au niveau technologique, à propos de la tâche dont la technique est incorrecte.
Technique incorrecte / pas un objectif d'apprentissage	Des indications au niveau technique, à propos de la tâche dont la technique est incorrecte.

Tableau n°1. *Stratégie adoptée pour produire les messages de rétroaction selon les caractéristiques de l'erreur et l'analyse praxéologique de l'activité et des connaissances.*

Les principes suivis pour créer les messages de rétroactions sont cohérents avec les recommandations d'Ohlsson (1996) pour la correction d'erreurs. Cet auteur recommande que le système prévienne l'apprenant lorsqu'il ou elle effectue quelque chose d'erroné. Il ajoute que les instructions données doivent se situer au niveau des aspects décisionnels de la situation et non au niveau de l'action elle-même. Nous avons adopté ce type de stratégie dans copex-chimie pour les erreurs liées aux tâches enjeu d'apprentissage. Le tuteur ne dit pas ce qui aurait dû être fait mais fait réfléchir les élèves aux aspects inappropriés du protocole avec un message situé au niveau technologique. Ceci correspond également au deuxième mécanisme d'étayage proposé par Reiser (2004)

qui vise à problématiser le sujet traité. Une caractéristique importante de ces rétroactions centrées sur les erreurs des apprenants est qu'il y a une individualisation de l'aide en lien avec le besoin de l'individu.

Questions de recherche

L'objectif de notre étude est de vérifier si les étayages implémentés dans l'environnement informatique copex-chimie facilitent la tâche de conception expérimentale. Par cette recherche, nous voulons répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les difficultés rencontrées par les étudiants quand ils conçoivent une expérimentation ?
- Comment ces difficultés évoluent-elles quand les étudiants conçoivent cette expérimentation avec un environnement informatique comportant différents types d'étayages ?

Méthodes

Mise en place de l'expérimentation

L'expérimentation a été mise en œuvre à l'université Grenoble-Alpes en janvier 2010 avec 39 étudiants de première année scientifique. Dans le cadre d'un module transdisciplinaire sur le thème de l'eau, ces étudiants suivent une séance de 120 min destinée à préparer un TP de spectrophotométrie. Durant cette séance, les étudiants doivent écrire individuellement un protocole expérimental pour doser par spectrophotométrie le colorant E124 d'un sirop de grenadine. L'enseignant expose rapidement le travail à effectuer, puis laisse les étudiants répondre au problème sans leur apporter plus d'information. Les étudiants connaissent le sujet des dosages spectrophotométriques, étudiés en terminale et qui ont fait l'objet d'un rappel dans le module.
Trois groupes expérimentaux ont été mis en place.
Le premier groupe est composé de 9 étudiants travaillant sans copex-chimie (groupe "papier-crayon"). Ces étudiants ont des documents papier similaires à ceux présents dans le logiciel : objectif du travail, principe de la méthode de dosage, liste des produits et matériel disponibles, un livret reprenant des informations théoriques et pratiques et fournissant la valeur approximative du coefficient d'absorbance du E124 à son maximum d'absorbance, et finalement une pré-structuration du protocole attendu en grandes étapes comme dans le logiciel.
Dans le deuxième groupe, 16 étudiants travaillent sur copex-chimie sans avoir accès au tuteur artificiel (groupe "copex-limité"). Dans cette configuration, l'étayage est la pré-structure du protocole implémentée dans copex-chimie au niveau des étapes et des actions, ainsi que les rétroactions sur les résultats simulés.
Dans le troisième groupe (groupe "copex-tuteur"), 14 étudiants travaillent sur copex-chimie avec un accès illimité au tuteur sur les 3 niveaux de rétroaction.
Les différents étayages proposés aux trois groupes sont résumés dans le tableau n°3.

Indicateurs issus des traces logicielles

Pour les étudiants travaillant sur copex-chimie, les traces logicielles ont été enregistrées. Les indicateurs suivants en ont été tirés :

- La durée de travail des étudiants : certains étudiants arrêtent de travailler avant la fin de la séance, soit qu'ils considèrent avoir complété la tâche, soit qu'ils abandonnent.
- Le succès à la tâche (score sur 20). Le tuteur calcule ce score afin de pouvoir ajuster le niveau des jauges de progrès.

Pour les étudiants du groupe "papier-crayon" les deux indicateurs précédents ont été obtenus par analyse manuelle des protocoles étudiants en suivant le même algorithme que le logiciel.
Pour les étudiants travaillant sur copex-chimie, nous avons extrait des traces deux indicateurs supplémentaires : le nombre d'accès à la simulation ainsi que le nombre de fois où la simulation fournit un retour simulé.

Indicateurs issus de l'analyse des protocoles finaux conçus par les étudiants : les difficultés

Afin de déterminer les difficultés des étudiants en situation de conception expérimentale, nous avons analysé les protocoles finaux des étudiants à partir d'une analyse praxéologique de la tâche à exécuter. Dans celle-ci, sept sous-tâches ont été identifiées comme étant reliées à des objectifs d'apprentissage :

T1. Choisir la nature des solutions étalon.
T2. Choisir la nature de l'échantillon à mesurer.

T3. Choisir les concentrations des solutions de la gamme étalon en accord avec la gamme de mesure du spectrophotomètre.
T4. Choisir la solution de rinçage de la fiole jaugée.
T5. Choisir la solution de rinçage de la cuve de mesure.
T6. Choisir la solution de référence pour les mesures spectrophotométriques.
T7. Choisir la longueur d'onde des mesures spectrophotométriques à partir d'une analyse spectrale.

Nous cherchons les difficultés des étudiants dans ces sept tâches. Une difficulté peut être la cause de l'absence de considération d'une tâche (tâche non-considérée) ou de l'application d'une technique erronée pour accomplir une tâche. Les tâches non-considérées sont détectées à travers l'absence d'une action de protocole ou d'un paramètre, et les techniques erronées sont détectées à travers la valeur erronée d'un paramètre d'action.

Afin de caractériser les difficultés des étudiants à un plus haut niveau d'agrégation, nous utilisons un ensemble de critères proposés pour l'évaluation des protocoles expérimentaux produits par les étudiants (Girault et al., 2012), présentés dans le tableau n°2.

A. Communicabilité: la description de l'expérimentation (le lecteur cible doit être précisé)
• Structure : organisation temporelle ou logique des actions du protocole / facilité de lecture • Complétude : le protocole donne-t-il suffisamment de détails pour être exécuté par le lecteur cible ?
B. Pertinence : la fonction de l'expérimentation
• Pertinence externe : cohérence entre les hypothèses et le choix des grandeurs mesurées • Pertinence interne : stratégie de mesure (choix des méthodes et matériels) • Qualité de l'acquisition des données : justesse et fidélité
C. Exécutabilité: l'expérimentation dans les conditions du laboratoire
• Adéquation entre les échantillons et le domaine de validité des méthodes et matériels de mesure • Observation des contraintes matérielles (disponibilité, coût, faisabilité, contrôle des risques) • Observation des contraintes temporelles

Tableau n°2. *Critères utilisés pour évaluer un protocole expérimental produit par un étudiant (extrait de Girault et al., 2012)*

Certains des critères présentés ci-dessus ne concernent pas les protocoles produits par les étudiants au cours de notre expérimentation : la structure du protocole (communicabilité) est donnée par les étapes imposées ; la pertinence externe n'a pas lieu d'être car il n'est pas nécessaire de produire d'hypothèses au cours de la séquence ; les contraintes matérielles (exécutabilité) sont cadrées par la liste de matériels fournie ; les contraintes temporelles n'ont pas cours car les résultats simulés sont fournis instantanément. Seuls quatre critères sont donc concernés par notre séquence : communicabilité-complétude, pertinence interne, qualité d'acquisition des données et exécutabilité-adéquation échantillons / domaines de validité des mesures.

Les tâches non-considérées identifiées dans un protocole expérimental posent problème. Elles peuvent être rapprochées du critère de communicabilité-complétude si l'étudiant envisage de mettre en œuvre les actions manquantes mais n'a pas jugé nécessaire de les écrire ou de faire apparaître tous leurs paramètres. Elles peuvent aussi être associées à tout autre critère si l'étudiant n'envisage pas de les mettre en œuvre. Sans information additionnelle pour trancher, nous avons choisi de faire apparaître les tâches non-considérées sous le critère de communicabilité-complétude. Pour ce critère les tâches T1 à T7 sont donc concernées (*cf.* tableau n°3).

Pour les difficultés reliées aux critères de pertinence et d'exécutabilité, nous donnons dans le tableau n°3 le nombre de tâches auxquelles nous avons attribué une technique erronée. Les tâches ont été attribuées à chaque critère de la façon suivante : T1, T2 et T7 relèvent de la pertinence interne ; des techniques erronées pour T4, T5 et T6 influent sur la qualité d'acquisition des données ; T3 est directement liée à l'exécutabilité-adéquation échantillon / domaines de validité des mesures.

Résultats et discussion

Le tableau 3 présente une vue synoptique des conditions expérimentales pour chacun des trois groupes, ainsi que les résultats obtenus à partir de l'analyse des traces logicielles et des protocoles expérimentaux produits par les étudiants.

		Groupe papier-crayon (9 étudiants)	Groupe copex-limité (16 étudiants)	Groupe copex-tuteur (14 étudiants)
Etayages	Pré-structuration au niveau des étapes	+	+	+
	Pré-structuration au niveau des actions	–	+	+
	Rétroactions : résultats simulés	–	+	+
	Rétroactions : erreurs (tuteur artificiel)	–	–	+
Résultats issus des traces logicielles	Durée du travail de conception expérimentale (moyenne, en minutes)	69 (e.t.7)	77 (e.t. 22)	98 (e.t. 6)
	Réussite à la tâche de conception expérimentale (moyenne, sur 20)	8,8 (e.t. 2)	10,8 (e.t. 4)	17,1 (e.t. 3)
	Nombre de demandes d'accès à la simulation (moyenne)	–	9,7 (e.t. 8)	3,7 (e.t. 5)
	Nombre de fois où un résultat simulé est fourni en comparaison du nombre total de demandes	–	22 / 155 (14 %)	31 / 52 (60 %)
Difficultés identifiées dans les protocoles en regard du nombre possible	Communicabilité : tâches non-considérées (T1-7)	34/63 (54 %)	31/112 (28 %)	11/98 (11 %)
	Pertinence interne : stratégie de mesure (T1, T2, T7)	5/17 (29 %)	13/30 (43 %)	5/33 (15 %)
	Pertinence : qualité d'acquisition des données (T4, T5, T6)	2/3	6/35 (17 %)	0/40 (0 %)
	Exécutabilité : adéquation entre les échantillons et le domaine de validité des appareils de mesure (T3)	5/9 (56 %)	8/16 (50 %)	4/14 (29 %)

Tableau n°3. *Tableau synoptique des conditions expérimentales et des résultats obtenus pour les trois groupes d'étudiants. Etayages : un (+) indique que l'étayage est présent. Difficultés : pour les tâches non-considérées, le nombre possible de difficultés est le nombre total de tâches (7 tâches considérées × le nombre d'étudiants du groupe) ; pour les autres difficultés, le nombre possible de difficultés est le nombre total de tâches identifiées dans les protocoles de tous les étudiants du groupe.*

Les résultats ci-dessus sont discutés en fonction des trois stratégies d'étayage étudiées : étayage par des rétroactions avec des données simulées ; étayage par la pré-structuration du protocole à concevoir ; étayage par des rétroactions sur les erreurs détectées dans les protocoles. Pour l'étayage par pré-structuration du protocole, seule la pré-structuration au niveau des actions est considérée, puisque la pré-structuration au niveau des étapes est commune aux trois groupes.

Etayage par des rétroactions avec des données simulées ayant le statut de résultats empiriques

En première analyse, nous nous attendions à ce que les étudiants ayant accès aux résultats empiriques simulés améliorent l'exécutabilité de leurs protocoles : lorsque les spectres ou absorbances simulés se trouvent hors du domaine de mesure du spectrophotomètre simulé, les étudiants devraient réfléchir à l'adéquation entre leurs échantillons et le domaine de validité de l'appareil de mesure. Il n'en est rien : les difficultés d'exécutabilité sont au même niveau pour les étudiants des groupes "papier-crayon" (56%) et "copex-limité" (50%). En regardant de plus près l'utilisation de la simulation, il apparaît que les étudiants du groupe "copex-limité" demandent de nombreuses fois des retours simulés : en moyenne 9,7 demandes par étudiant par session (avec une très grande variabilité de ce nombre). Cependant, les étudiants ne reçoivent un résultat simulé que pour 14% de leurs demandes, ce qui correspond à 1 à 2 retours simulés obtenus sur l'ensemble de la session : les protocoles des étudiants sont trop éloignés des protocoles attendus pour pouvoir être utilisés par la simulation. Autrement dit, la simulation n'apporte que peu de rétroactions pour les étudiants n'ayant pas le tuteur dans copex-chimie. Les différences observées entre les groupes "papier-crayon" et "copex-limité" sont donc principalement dues à l'étayage par pré-structuration du protocole.

Etayage par la pré-structuration du protocole à concevoir

L'étayage par pré-structuration du protocole au niveau des actions correspond à la liste de 8 actions paramétrées donnée aux étudiants dans copex-chimie. L'effet de cet étayage est évalué par comparaison des indicateurs des groupes "papier-crayon" et "copex-limité".

Les étudiants ayant un protocole pré-structuré par copex-chimie passent un peu plus de temps (77 min) à concevoir leur expérimentation que les étudiants du groupe "papier-crayon" (69 min). Ce résultat peut être expliqué par le temps de prise en main du logiciel. Cependant, cela n'explique pas la disparité de durée entre les étudiants du groupe "copex-limité" (écart-type de 22 min). Nous expliquons ce phénomène par le fait que

certains étudiants de ce groupe se retrouvent démunis et abandonnent rapidement, alors que pour d'autres, l'étayage proposé est suffisant pour les maintenir en activité. Cependant, comme le montre le score de réussite des étudiants du groupe "copex-limité" (10,8 sur 20), l'étayage proposé ne suffit pas pour leur faire mener à bien la tâche proposée.
Par rapport au critère de complétude du protocole, il y a beaucoup plus de tâches non-considérées pour le groupe "papier-crayon" que pour les étudiants utilisant le logiciel. Ce résultat indique que la liste d'actions aide les étudiants à envisager le contenu de leur protocole. Ceci doit être évalué à la lumière des résultats de Jordan, Ruibal-Villasenor, Hmelo-Silver, et Etkina (2011) qui ont montré qu'une liste de matériel guide fortement la conception du protocole avec, comme inconvénient de limiter la créativité des étudiants, ceux-ci cherchant à accomplir leur tâche sans forcément y associer du sens.
L'étayage par pré-structuration du protocole a aussi un impact sur la pertinence interne du protocole. Nous nous attendions à ce que la pré-structuration aide les étudiants, mais les résultats montrent un effet inverse. En fait, les étudiants travaillant sans logiciel évitent de décrire les tâches complexes de conception, comme, par exemple la tâche T7 : "choisir la longueur d'onde pour les mesures d'absorbance par l'analyse d'un spectre". Ceci explique que les protocoles de ces étudiants comportent plus de tâches non-considérées, mais aussi moins de techniques incorrectes. Pour le groupe "copex-limité", la pré-structuration du protocole invite les étudiants à se confronter aux tâches complexes, mais ils échouent à proposer une technique correcte pour de telles tâches.

Etayage par des rétroactions sur les erreurs détectées dans les protocoles

L'augmentation du temps de conception expérimentale des étudiants du groupe "copex-tuteur" peut être expliquée par le temps pris pour explorer les retours du tuteur artificiel : celui-ci est appelé en moyenne 32 fois au cours d'une session. De plus, les étudiants de ce groupe ne semblent pas être découragés comme peuvent l'être les étudiants des autres groupes. Ils n'abandonnent pas leur travail, et proposent des protocoles en moyenne corrects (17,1 sur 20 au score de réussite).
Le tuteur semble avoir un impact positif sur chacun des critères que nous avons évalués : le nombre moindre de tâches non-considérées et de difficultés des étudiants du groupe "copex-tuteur" par rapport aux autres groupes peut être attribué à l'effet du tuteur artificiel. Les rétroactions sur les erreurs semblent avoir un impact plus important que les autres étayages. Ceci s'explique par deux aspects de cet étayage. A la différence de l'étayage par pré-structuration, les retours sur les erreurs sont individualisés pour chaque étudiant ce qui est un gage de leur efficacité (Reiser, 2004). D'autre part, les étudiants ayant accès au tuteur parviennent à obtenir beaucoup plus de résultats simulés. Ceci contribue à l'amélioration des protocoles produits, notamment par rapport au critère d'exécutabilité comme discuté précédemment.

Application des stratégies d'étayage à un environnement plus ouvert : la plateforme LabBook

Les résultats précédents montrent que les différents étayages implémentés dans le logiciel copex-chimie peuvent aider les étudiants à concevoir une expérimentation. Cependant, la situation proposée dans copex-chimie est unique (dosage spectrophotométrique du colorant d'un sirop de grenadine) et le logiciel n'a pas été prévu pour permettre la mise en œuvre d'autres travaux pratiques.
LabBook est une nouvelle plateforme logicielle pouvant être configurée pour différentes situations expérimentales. LabBook est organisée autour de la production collaborative d'un rapport expérimental, en amont et/ou en aval de l'expérimentation. Pour construire leur rapport, les étudiants ont accès à quatre outils spécialisés pour la production scientifique : un outil pour la conception expérimentale, un outil pour le traitement et l'analyse des résultats expérimentaux, un outil de dessin et un outil de texte libre, ainsi qu'à deux outils plus génériques : un outil de partage de ressources et un outil de communication instantanée. L'enseignant a accès à une interface auteur afin de configurer LabBook (consignes, ressources, pré-structuration du rapport, contraintes…). La plateforme est en cours de production, et des versions prototypes ont été testées au niveau de l'utilisabilité avec 15 étudiants de Licence 2 au cours des deux dernières années.
Les outils de production scientifique de LabBook étant en phase finale de développement, le problème de l'étayage se pose à présent. Les trois formes d'étayages que nous avons testées dans copex-chimie peuvent être transposées à LabBook. Il est déjà possible, dans la nouvelle plateforme, de pré-structurer le rendu des étudiants, que ce soit au niveau du rapport dans son ensemble, ou au niveau des protocoles expérimentaux produits avec l'outil adapté, notamment par la pré-structuration du protocole au niveau des étapes. Pour la pré-structuration du protocole au niveau des actions, les prototypes des actions accessibles aux étudiants seront définis dans une interface enseignante. Pour les étayages par rétroaction, il est envisagé de coupler des simulations et un tuteur artificiel à l'outil de conception expérimentale de LabBook. Le tuteur artificiel sera configurable à partir de contraintes produites par l'enseignant. Pour le couplage de simulations, le travail devra être réalisé au cas par cas,

à partir d'un jeu d'actions pré-structurées et d'un tuteur définis, afin de déterminer les paramètres à prendre en compte pour la simulation.

Conclusion

L'étude que nous avons menée montre à quel point la tâche de conception expérimentale est complexe pour des étudiants de première année d'université. Quand ils sont mis en situation de conception expérimentale sans support particulier, on observe que les étudiants finissent rapidement leur travail avec un résultat généralement pauvre : les protocoles décrivent l'expérimentation à un niveau très général et ressemblent plus à un principe d'expérimentation qu'à une procédure pouvant être utile pour mettre en place la manipulation. Il manque de nombreux paramètres d'actions, et certaines parties sont même complètement éludées, que ce soit pour éviter la complexité des raisonnements à mettre en œuvre, ou parce que les étudiants ne sont pas capables de maîtriser une telle complexité sans aide.

Nous avons décrit un environnement informatique, copex-chimie, comportant des étayages à divers niveaux pouvant aider les étudiants à concevoir une expérimentation particulière. Le premier niveau d'étayage est un étayage par pré-structuration du protocole à bas niveau : les étudiants doivent choisir leurs actions parmi huit actions paramétrées proposées. Cet étayage force les étudiants à prendre à leur charge la complexité inhérente à la conception du protocole. Les actions pré-définies aident les étudiants à aborder certains aspects de l'expérimentation, et, comme ces actions sont caractérisées par des paramètres imposés, les étudiants sont forcés de proposer des valeurs pour ces paramètres. Cependant, comme le montrent nos résultats, cet étayage ne permet pas aux étudiants de fournir un protocole de meilleure qualité que les étudiants travaillant sans logiciel. Les étudiants travaillant avec copex-chimie cherchent à obtenir des rétroactions à travers les résultats simulés. La qualité médiocre de leurs protocoles ne permettant pas de fournir de tels résultats, les étudiants se découragent et abandonnent leur tâche sans parvenir au terme.

Un niveau d'étayage supplémentaire est constitué par un tuteur artificiel fournissant des retours individualisés aux étudiants, sur la base des erreurs détectées dans leurs protocoles. Ces rétroactions se sont avérées être la forme d'étayage la plus efficace. Elle a permis aux étudiants de travailler sur toute la durée de la séance sans être découragé par la complexité de la tâche et de produire des protocoles bien au dessus de ceux produits dans les autres groupes. Nous arrivons à une conclusion similaire à celles d'Etkina et al. (2010) qui mettent l'accent sur l'importance d'un étayage approprié avec des supports à la réflexion pour que la conception expérimentale soit mise en œuvre de façon positive dans les classes.

Les recherches envisageables suite à ce travail sont à de multiples natures. Tout d'abord, nous espérons que les étudiants dans copex-chimie, non seulement réussissent mieux à la tâche de conception expérimentale, mais apprennent aussi de manière plus efficace. Une expérimentation a été menée à ce sujet, sur les stratégies d'utilisation du tuteur artificiel et sur la corrélation avec les apprentissages (résultats à publier). Une autre piste de recherche concerne la place de l'enseignant dans le système qu'il compose avec l'environnement informatique pour étayer le travail de conception expérimentale. Dans les expérimentations faites précédemment, l'enseignant ne devait pas intervenir, à des fins expérimentales. Nous souhaitons maintenant étudier dans quel cadre un co-étayage peut se mettre en place et ce qui doit être à la charge du tuteur humain et du tuteur artificiel. Finalement, sur un versant technologique, nous souhaitons continuer à développer la plate-forme LabBook en implémentant les étayages efficaces, en termes de réussite et d'apprentissage, dans la perspective d'un co-étayage avec l'enseignant.

Références bibliographiques

Apedoe, X., & Ford, M. (2010). The empirical attitude, material practice and design activities. *Science and Education, 19*, 165–186.

Arce, J., & Betancourt, R. (1997). Student-designed experiments in scientific lab instruction. *Journal of College Science Teaching, 27(2)*, 114–118.

Chevallard, Y. (1999). L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques, 19(2)*, 221–266.

De Jong, T., & van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research, 68(2)*, 179 – 201.

Etkina, E., Karelina, A., & Ruibal-Villasenor, M. (2010). Design and reflection help students develop scientific abilities: learning in introductory physics laboratories. *The Journal of the Learning Sciences, 19*, 54–98.

Girault, I., Cross, D., & d'Ham, C. (2007). Students' adaptation to a new situation: the design of an experimental procedure. *ESERA Conference. Malmö, Sweden, August, 21-25: Proceedings.*

Girault, I., d'Ham, C., Ney, M., Sanchez, E., & Wajeman, C. (2012). Characterizing the Experimental Procedure in Science Laboratories: A preliminary step towards students experimental design. *International Journal of Science Education, 34(6),* 825–854.

Graesser, A. C., McNamara, D. S., & VanLehn, K. (2005). Scaffolding Deep Comprehension Strategies Through Point&Query, AutoTutor, and iSTART. *Educational Psychologist, 40(4),* 225–234.

Hmelo-Silver, C. E., Duncan, R. G., & Chinn, C. A. (2007). Scaffolding and Achievement in Problem-Based and Inquiry Learning: A Response to Kirschner, Sweller, and Clark (2006). *Educational Psychologist, 42(2),* 99–107.

Jordan, R. C., Ruibal-Villasenor, M., Hmelo-Silver, C. E., & Etkina, E. (2011). Laboratory materials: Affordances or constraints? *Journal of Research in Science Teaching, 48(9),* 1010–1025.

Karelina, A., & Etkina, E. (2007). Acting like a physicist: Student approach study to experimental design. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 3(2),* 12 pages (online journal : http://prst–per.aps.org/).

Koretsky, M. D., Amatore, D., Barnes, C., & Kimura, S. (2008). Enhancement of Student Learning in Experimental Design Using a Virtual Laboratory. *IEEE Transactions on Education, 51(1),* 76–85.

Laugier, A., & Dumon, A. (2003). Résolution de problème et pratique expérimentale : analyse du comportement des élèves en début de seconde. *Chemistry Education: Research and Practice, 4(3),* 335–352.

Leont'ev, A. N. (1978). Activity, Consciousness, and Personality. *Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.*

Marzin, P., & De Vries, E. (2008). How can we take into account student conceptions of the facial angle in a palaeontology laboratory work? *International Conference on Learning Science (p. 567).* Utrecht, Netherlands, 23-28 juin.

Morgan, K., & Brooks, D. (2012). Investigating a Method of Scaffolding Student-Designed Experiments. *Journal of Science Education and Technology, 21(4),* 513–522.

Neber, H., & Anton, M. (2008). Promoting pre-experimental activities in high-school chemistry: focusing on the role of students' epistemic questions. *International Journal of Science Education, 30(13),* 1801–1821.

Ohlsson, S. (1996). Learning from error and the design of task environments. *International Journal of Educational Research, 25(5),* 419–448.

Ohlsson, S. (2002). Constraint-based student modelling. *International Journal of Artificial Intelligence in Education, 3,* 429–447.

Pea, R. D. (2004). The social and technological dimensions of scaffolding and related theoretical concepts for learning, education, and human activity. *The journal of the learning sciences, 13(3),* 423–451.

Quintana, C., Reiser, B. J., Davis, E. A., Krajcik, J., Fretz, E., Duncan, R. G., Soloway, E. (2004). A Scaffolding Design Framework for Software to Support Science Inquiry. *Journal of the Learning Sciences, 13(3),* 337–386.

Reiser, B. J. (2004). Scaffolding Complex Learning: The Mechanisms of Structuring and Problematizing Student Work. *Journal of the Learning Sciences, 13(3),* 273–304.

Rodriguez, E., Bosch, M., & Gascon, J. (2007). An anthropolical approach to metacognition: the "study and research courses." In D. P.-P. & G. Philippou (Ed.), *Fifth Congress of the European Society for Research in Mathematics Education.* Larnaca, Cyprus, http://ermeweb.free.fr/CERME5b/.

Séré, M. G., & Beney, M. (1997). Le fonctionnement intellectuel d'étudiants réalisant des experiences : observation de séances de travaux pratiques en premier cycle universitaire scientifique. *Didaskalia, 11,* 75–102.