

Conception d'un protocole expérimental avec un logiciel dédié : apprentissages réalisés et difficultés rencontrées par des élèves de terminale S

D'HAM Cédric, maître de conférences, Université Joseph Fourier, Leibniz/MeTAH, Grenoble.
ERGUN Mustafa, doctorant, Université Joseph Fourier, Leibniz/MeTAH, Grenoble.
GIRAULT Isabelle, maître de conférences, Université Joseph Fourier, Leibniz/MeTAH, Grenoble.
MARZIN Patricia, maître de conférences, IUFM, Leibniz/MeTAH, Grenoble.
SANCHEZ Eric, professeur agrégé, INRP, Lyon.

Introduction

Les activités de travaux pratiques (TP) tiennent une place importante dans l'apprentissage des sciences expérimentales. En effet, elles constituent des moments au cours desquels les apprenants ont la possibilité de mettre en relation des observables expérimentaux avec les éléments théoriques adaptés. Comme l'ont montré des travaux de didactique (Tiberghien *et al.* 2001), ces activités peuvent prendre de multiples formes, sans qu'il n'y ait de forte corrélation entre la forme de l'activité et son contexte (niveau des apprenants, matière scientifique ou pays dans lequel est effectué le TP). Les objectifs visés par l'enseignant peuvent également être de natures diverses (White 1996) : motiver, donner du sens aux apprentissages, acquérir des techniques ou des connaissances spécifiques, aider à la mémorisation ou permettre de relier des sujets abordés indépendamment les uns des autres.

Aujourd'hui, les TP sont de plus en plus souvent liés à l'utilisation de l'outil informatique, que ce soit pour le contrôle de la manipulation, pour le traitement des résultats, ou pour les rendre accessibles à distance. Dans notre communication, nous décrivons une séance de TP que nous avons mise en place et qui a la particularité de pouvoir être réalisée intégralement à distance par les apprenants grâce à un logiciel accessible par Internet. Nous nous attachons à caractériser les apprentissages réalisés ainsi que les difficultés rencontrées par des élèves de terminale ayant effectué ce TP.

Contexte de la recherche : le TP Educafix.net

Le projet Educafix.net a consisté à construire pour des apprenants de niveau terminale scientifique ou première année universitaire, une séance de TP de chimie qui puisse être effectuée en autonomie à partir d'un ordinateur connecté à Internet. La partie manipulation est réalisée à distance par l'intermédiaire d'un robot manipulateur. Les apprenants sont en présence de ce qui est convenu de nommer un « laboratoire virtuel » mais pour lequel la manipulation est effectuée réellement. Les résultats obtenus à partir de cette manipulation sont donc de même nature que pour un TP « classique » réalisé en présentiel. Cependant, la manipulation étant déportée, elle perd la position emblématique qu'elle a dans les TP présentiels, au cours desquels les apprenants consacrent généralement une grande partie de leur temps à manipuler des objets de nature expérimentale. La tâche de l'étudiant dans la

séance de TP Educafix.net est donc modifiée par rapport à un TP présentiel. En nous fondant sur les travaux antérieurs qui soulignent l'importance de la planification dans un travail complexe (Arce et Betancourt, 1997, Hmelo *et al.* 2000, Séré, 2002) nous avons donc choisi d'assigner comme tâche principale à l'apprenant la conception du protocole expérimental qui sera ultérieurement réalisé par le robot manipulateur. Son travail s'effectue donc en amont de la manipulation réalisée par le robot. Nous faisons l'hypothèse que le fait de s'engager dans une activité de conception du protocole aide l'apprenant à s'appropriier l'ensemble de la démarche expérimentale, et à structurer les différentes connaissances associées à la manipulation.

Au lancement du logiciel Educafix.net, l'apprenant prend tout d'abord connaissance du problème qui lui est proposé : « déterminer par spectrophotométrie la concentration du colorant E124 dans un sirop de grenadine ». Nous avons fait l'hypothèse qu'il était nécessaire de fournir des aides à un apprenant du niveau considéré pour lui permettre de concevoir un protocole expérimental adéquat pour répondre à cette question. Ces aides sont de plusieurs types. Tout d'abord, les données théoriques nécessaires pour réaliser le dosage sont accessibles dans un fichier qualifié de « cours ». Ensuite, l'interface de conception de protocole structure précisément la tâche de l'apprenant en mettant à sa disposition des actions manipulatoires pré-sélectionnées et en précisant les paramètres à spécifier pour chaque action (par exemple, si l'apprenant choisit l'action « réaliser un spectre » il doit spécifier les paramètres « λ_{\min} », « λ_{\max} » et « solution de mesure »). Finalement, un tuteur artificiel aide l'apprenant à concevoir le protocole en notifiant, à la demande, les incohérences du protocole proposé.

Pour plus de détails sur le système Educafix.net et sur la caractérisation de la tâche de conception de protocole expérimental se reporter à la littérature (d'Ham *et al.* 2004).

Cadre théorique

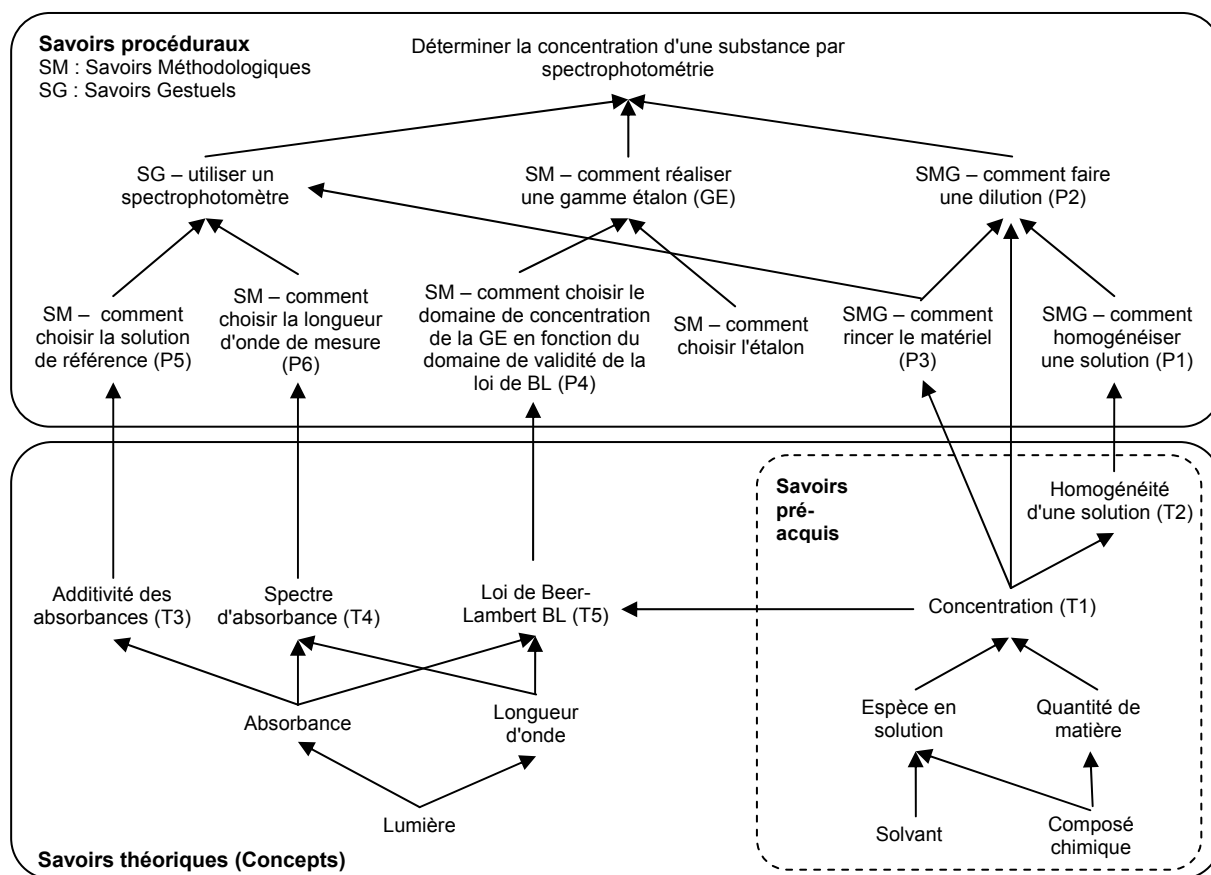
Le logiciel Educafix.net a été conçu à partir des hypothèses de travail décrites au paragraphe précédent. Son évaluation a été prévue selon deux axes : d'une part la caractérisation de la tâche de conception du protocole sur l'interface logicielle par les apprenants, et d'autre part la caractérisation des apprentissages qui sont favorisés au cours de ce type de tâche.

Le premier axe d'évaluation a trait à la caractérisation de la tâche de conception de protocole par les apprenants. L'activité de conception de protocole est une des activités constitutives de la démarche expérimentale. En ce sens, nous nous inscrivons dans les travaux qui tentent de caractériser le concept de démarche expérimentale et de le transposer dans l'enseignement (Develay, 1989, Darley, 1996). Il faut cependant noter que la tâche de conception de protocole sur laquelle nous avons fondé notre travail est rarement mise en exergue dans la littérature traitant de la démarche expérimentale (Séré, 2002).

Le point principal de l'évaluation du logiciel Educafix.net concerne les apprentissages qui sont favorisés au cours du TP proposé. Nous devons tout d'abord différencier les apprentissages visés par les concepteurs des TP (Tiberghien, 2001) du fonctionnement intellectuel des étudiants réalisant les TP et les apprentissages corrélés (Séré et Beney, 1997). Afin de rentrer plus dans le détail des apprentissages spécifiques au TP Educafix.net, nous nous sommes attachés à décrire, sous forme de carte conceptuelle (Novak, 1988), les savoirs nécessaires à la réalisation du type de tâche demandé : déterminer la concentration d'une substance par spectrophotométrie. Dans notre carte, les savoirs ont été classés en deux catégories : savoirs théoriques et savoirs procéduraux ; de plus, les savoirs procéduraux

peuvent avoir une composante méthodologique et/ou une composante gestuelle. Les savoirs théoriques sont descriptifs, indépendants des usages et assez éloignés de l'action concrète. Ils représentent des faits et des principes. Les savoirs procéduraux consistent en une association entre des buts, des actions et des situations. Ils sont prescriptifs et spécifiques dans leurs usages. Les deux composantes des savoirs procéduraux que nous avons appelées "gestuelles" et "méthodologiques" correspondent d'une part, aux compétences perceptivo-gestuelles et d'autre part, à la conceptualisation des actions perceptivo-gestuelles (Vergnaud, 1996). Il faut noter que les savoirs gestuels n'interviennent que lors de l'exécution du protocole de manipulation ; pour la tâche de conception du protocole, seuls les savoirs théoriques et méthodologiques sont mis en œuvre.

La différenciation de ces types de savoirs permet de préciser à quels niveaux se font les évolutions dans la connaissance des apprenants ayant réalisé le TP Educaffix.net.



Savoirs théoriques et procéduraux à mettre en œuvre dans le TP Educaffix.net.
 Les flèches indiquent qu'un savoir est pré-requis par rapport à un autre savoir.

Questions de recherche

Deux questions de recherche ont fait l'objet d'une investigation. La première concerne l'évaluation de la capacité d'élèves de Terminale scientifique à concevoir un protocole expérimental cohérent par rapport au problème qui leur est soumis lorsqu'ils utilisent Educaffix.net. Il s'agit de repérer la nature des difficultés rencontrées, de manière à distinguer celles qui relèvent de la discipline elle-même de celles qui relèvent du contexte. Ainsi, les hypothèses peuvent elles s'énoncer comme suit :

Les difficultés rencontrées vont être liées :

- aux concepts mis en jeu ;
 - conceptions des élèves sur les notions en jeu,
 - contrat didactique lié à la tâche de conception de protocole ;
- à la déportation de la manipulation en temps et en lieu ;
- à l'ergonomie de l'interface.

La seconde question de recherche porte sur les apprentissages liés à la tâche de conception de protocole avec le logiciel Educafix.net. Au stade actuel de notre recherche, une seule hypothèse a été retenue et testée :

- la tâche de conception de protocole favorise les apprentissages de connaissances procédurales.

Méthodologie

Expérimentation

Deux expérimentations en classe ont eu lieu en février et mars 2004 avec 56 élèves, âgés de 17-18 ans, issus de deux classes de terminale S de deux lycées différents (Echirolles et Villefranche-sur-Saône). Les élèves ont travaillé, en binômes autonomes, à la conception d'un protocole expérimental en réponse au problème posé. Pour cela, ils ont utilisé, durant 1h30, le dispositif Educafix.net pour sa partie interface de conception de protocole. Les interventions des enseignants ont été limitées au maximum ; elles ont cependant été ponctuellement nécessaires en cas de blocage important dans la progression des élèves du fait de problèmes informatiques (plantage du logiciel), de problèmes de navigation à l'interface ou de problèmes liés à la compréhension des retours fournis par le tuteur artificiel. Le corpus qui a été obtenu au cours de ces expérimentations est le suivant :

- protocoles construits par les binômes après 1h30 de travail ;
- traces logicielles du cheminement des élèves dans le système Educafix.net ;
- enregistrements audio du dialogue des binômes et des interventions des enseignants.

Les protocoles construits, en tant que productions finalisées, permettent d'évaluer le niveau d'avancée des élèves pour la tâche qui leur a été assignée. Les traces logicielles et les enregistrements audio, donnent accès à l'historique du travail des élèves et par là même des indications précieuses sur les stratégies employées ainsi que sur la nature des difficultés qu'ils ont eu à surmonter.

En parallèle au travail sur le logiciel, un pré-test et un post-test "papier" ont été effectués quatre semaines avant et cinq semaines après l'expérimentation avec le logiciel. Ces deux tests ont pour fonction d'évaluer les connaissances des élèves avant l'expérimentation, ainsi que l'évolution de ces connaissances après l'expérimentation. Six questions ont été posées aux élèves, de façon identique dans le pré-test et post-test, pour connaître l'état de six connaissances procédurales : P1 à P6. Ces dernières sont formulées ci-dessous, avec la référence aux connaissances théoriques (T) sur lesquelles elles s'appuient, tel que défini dans la carte conceptuelle.

- Comment homogénéiser (P1) \diamond homogénéité (T2) \diamond concentration (T1)
- Comment diluer (P2) \diamond concentration (T1)
- Comment rincer (P3) \diamond concentration (T1)
- Comment choisir le domaine de concentration de la gamme étalon en fonction du domaine de validité de la loi de Beer-Lambert (P4) \diamond loi de Beer-Lambert (T5)

- Comment choisir la solution de référence (P5) \Leftrightarrow additivité des absorbances (T3)
- Comment choisir la longueur d'onde de mesure (P6) \Leftrightarrow spectre d'absorbance (T4)

De même, cinq questions ont été posées pour vérifier l'état des connaissances théoriques des élèves, supposées connues avant l'expérimentation. Il s'agit des connaissances théoriques T1 à T5, nécessaires à la construction des connaissances procédurales citées P1 à P6 :

- T1 : Concentration molaire : $C = n/V$
- T2 : Homogénéité : la valeur de la concentration est identique en toute partie d'un volume.
- T3 : Additivité des absorbances : l'absorbance d'un mélange est égale à la somme des absorbances des différents composants du mélange.
- T4 : Spectre d'absorbance : l'absorbance d'un composé varie de manière non aléatoire avec la longueur d'onde. Cela définit un spectre d'absorbance.
- T5 : Loi de Beer-Lambert, $A = \epsilon.l.C$ (ou $A = k.C$) : à une longueur d'onde donnée, l'absorbance d'une solution est proportionnelle à sa concentration.

Méthodologie d'analyse

Les enregistrements obtenus lors du travail sur le logiciel ont été transcrits, et tout le corpus (protocoles construits, traces logicielles, enregistrements audio, pré-tests, post-tests) a été analysé suivant une grille faite à partir de nos hypothèses de recherche.

Pour la première question de recherche concernant les difficultés rencontrées par les élèves, les indicateurs recherchés se situent principalement dans l'historique des actions et dans les verbalisations des apprenants. Ces indicateurs permettent d'identifier les types de difficultés et notamment de faire apparaître les conceptions des élèves issues de notre analyse a priori. Si besoin, l'étude des réponses des élèves au pré-test et au post-test permet d'affiner notre analyse. Le tableau ci-dessous donne un aperçu de la grille utilisée pour analyser les difficultés des élèves.

Corpus	Indicateurs	Difficultés
- Traces logicielles - Réponses au pré-test	Rincer le matériel uniquement avec de l'eau	Conception : l'eau n'a pas d'influence sur le système chimique
- Traces logicielles - Enregistrements audio	Rincer l'aiguille avec la solution adéquate, une seule fois, avant l'ensemble des actions de dilution. Verbalisation faisant référence au contrat appliqué en classe	Contrat didactique non adapté à la méthode employée

Exemples d'indicateurs utilisés pour déterminer les types de difficultés rencontrées par les élèves.

Concernant la seconde question de recherche qui s'attache à déterminer les apprentissages liés à la tâche de conception de protocole, l'évolution des apprentissages testés est déterminée à partir de l'analyse des réponses au pré-test, des traces logicielles et des réponses au post-test. Des scores de réussite ont été attribués aux différentes réponses aux questions des pré-test et post-test afin d'évaluer l'acquisition des connaissances avant et après le travail sur le logiciel. Quant à l'évolution des connaissances procédurales au cours du travail sur le logiciel Educaffix.net, elle est évaluée à partir des traces logicielles, en fonction de la réussite à certaines tâches de conception de protocole.

Résultats

Les résultats présentés ici sont issus des premières analyses réalisées sur notre corpus de données.

Le premier point à relever est que le système proposé aux élèves leur permet de réaliser la tâche de conception de protocole qui leur est demandée. En effet, sur les 28 binômes utilisateurs, 14 réussissent en 1h30 à concevoir un protocole qui va jusqu'à la dernière action nécessaire (mesure de l'absorbance de la solution de concentration inconnue). Sur ces 14 binômes, 7 proposent un protocole permettant d'obtenir un résultat expérimental valable (score total > 95 %).

Difficultés rencontrées par les apprenants

Les conceptions des apprenants peuvent être à l'origine de difficultés à concevoir le protocole. Lors de l'analyse a priori, nous avons proposé les conceptions regroupées dans le tableau ci-dessous.

Conception	Savoirs associés	Fréquence d'apparition
c1 : l'eau n'a pas d'influence sur le système chimique	T1 / P3	60 %
c2 : dans une solution, la concentration en soluté est homogène	T2 / P1	40 %
c3 : le domaine de validité de la loi de Beer-Lambert est illimité	T5 / P4	45 %
c4 : la longueur d'onde n'a pas d'influence sur l'absorbance d'une solution	T4 / P6	15 %
c5 : l'eau en tant que solvant n'a pas d'influence sur l'absorbance de la solution	T3 / P5	20 %
c6 : la solution de référence est constituée de la solution mère	P5	45 %

Conceptions à l'origine de difficultés rencontrées par les élèves lors de la conception de protocole.

Les fréquences d'apparition indiquées dans le tableau des conceptions correspondent aux pourcentages de binômes d'étudiants chez lesquels nous avons pu détecter les indicateurs qui ont été définis a priori comme étant révélateurs de la conception correspondante. Ces indicateurs ont été principalement recherchés dans les traces logicielles, mais aussi dans les verbalisations et dans les réponses au pré-test.

Certaines difficultés peuvent être engendrées par l'application du contrat didactique en vigueur dans la classe à la situation Educaffix.net. Ce point concerne principalement les aspects de rinçage : le logiciel demande à ce que le matériel soit rincé avec un produit adapté avant utilisation (par exemple, rincer une aiguille de prélèvement avec la solution qui va être prélevée, pour ne pas modifier la concentration de la solution). Le contrat didactique en vigueur en classe, tel que déterminé lors d'un entretien avec les enseignants, est très différent : le matériel est généralement considéré comme propre et sec avant utilisation, et un lavage à l'eau est demandé après utilisation du matériel. Le rinçage préalable du matériel est donc une action qui n'est pas spontanément spécifiée par les élèves lorsqu'ils conçoivent leur protocole. Cette difficulté doit probablement être renforcée par le fait que la manipulation est déportée en temps et en lieu : l'éloignement du matériel utilisé ne favorise pas la réflexion concernant son utilisation adéquate.

Une difficulté qui a été rencontrée par une grande partie des élèves (45 % des binômes) concerne le choix de la longueur d'onde pour effectuer les mesures d'absorbance. Il faut noter que la procédure à utiliser (acquérir un spectre et choisir la longueur d'onde correspondant au maximum d'absorbance λ_{Amax}) n'a pas été traitée de manière approfondie au cours des enseignements de chimie de terminale suivis. La difficulté est importante dans le sens où elle a pu bloquer l'avancement du travail des binômes durant de longues périodes. Nous expliquons cette importance par le fait que la manipulation est déportée en temps. En effet, les élèves doivent spécifier une action de protocole qui leur permet d'obtenir un résultat expérimental (λ_{Amax}) qui servira à spécifier les actions de protocole concernant les mesures d'absorbance. Cet aller-retour entre l'activité de conception de protocole et l'acquisition des résultats expérimentaux est délicat à anticiper pour les élèves.

Le dernier point pouvant générer des difficultés et que nous avons proposé dans nos hypothèses est lié à l'ergonomie de l'interface. Les résultats obtenus montrent que ce type de difficulté apparaît de temps à autre, mais qu'il est vite surmonté par les élèves et qu'il n'est pas un frein important à la conception du protocole.

Après cette première analyse, nous pouvons donc dire que les sources de difficultés pour les apprenants se situent principalement à trois niveaux : (i) les connaissances mobilisées à mauvais escient pour résoudre un problème (conceptions, contrat didactique) ; (ii) les contraintes liées à l'utilisation d'un robot manipulateur à distance (matériel différent du matériel habituel et non accessible physiquement aux élèves) ; (iii) la tâche de conception de protocole qui fait appel aux capacités d'anticipation des étudiants, et notamment l'utilisation de résultats expérimentaux à venir pour pouvoir spécifier certaines actions du protocole.

Apprentissages liés à la tâche de conception de protocole

L'hypothèse proposée pour cette question de recherche établit que la tâche de conception de protocole devrait favoriser les apprentissages de connaissances procédurales.

Les résultats obtenus à partir des pré-tests et post-tests, montrent l'évolution des connaissances théoriques et procédurales des élèves. Il apparaît que les connaissances théoriques sont pour la plupart acquises par les apprenants dès le pré-test (score global pour toutes les connaissances théoriques et pour tous les élèves de 61 %). On observe une légère augmentation du score global concernant les connaissances théoriques au niveau du post-test (70 % soit +9 %). Pour les connaissances procédurales, leur acquisition au niveau du pré-test est moins importante (score global de 54 %) mais leur évolution est plus forte comme indiqué par le résultat du post-test (72 % soit + 18 %).

Au cours du travail sur le logiciel Educaffix.net, il y a une évolution positive (+7 % à +67 %) de la réussite aux tâches nous servant d'indicateurs pour l'acquisition de chaque connaissance procédurale. Il semble donc que l'acquisition des connaissances procédurales des élèves est bien favorisée par le travail de conception de protocole et que cet apprentissage a lieu lors de la résolution des problèmes pratiques liés au protocole, à l'aide du logiciel et, plus particulièrement, à l'aide des retours du tuteur artificiel.

Ces premiers résultats concernant les apprentissages réalisés sont maintenant à approfondir, notamment en essayant de mettre en évidence la réalité de l'apprentissage (en opposition à une stratégie type essai-erreur qui pourrait être envisagée) et le mécanisme de l'apprentissage des connaissances procédurales. Nous envisageons de tester l'hypothèse selon laquelle l'apprentissage des connaissances procédurales se fait par la mise en relation de connaissances théoriques avec des problèmes liés à la tâche à réaliser. Afin de tester cette hypothèse, nous projetons de rechercher dans les enregistrements audio, des verbalisations de binômes qui

explicitent un lien entre des connaissances théoriques et des éléments du problème expérimental.

Bibliographie

ARCE Josefina et BETANCOURT Rosa, novembre 1997, "Student-designed experiments in scientific lab instruction", *Journal of College Science Teaching*, n°27(2), pp. 114-118.

D'HAM Cédric, DE VRIES Erica, GIRAULT Isabelle et MARZIN Patricia, décembre 2004, "Exploiting distance technology to foster experimental design as a neglected learning objective in labwork in chemistry", *Journal of Science Education and Technology*, n°13(4), pp. 425-434.

DARLEY Bernard, décembre 1996, "Exemple d'une transposition didactique de la démarche scientifique dans un TP de biologie en DEUG 2^{ème} année", *Didaskalia*, n°9, pp. 31-56.

DEVELAY Michel, 1989, "Sur la méthode expérimentale", *Aster*, n°8, pp. 3-15.

HMELO Cindy E., HOLTON Douglas L. et KOLODNER Janet L., 2000, "Designing to learn about complex systems", *The Journal of the Learning Sciences*, n°9(3), pp. 247-298.

NOVAK, Joseph D., 1988, "Learning science and the science of learning", *Studies in Science Education*, n°15, pp. 77-101.

SERE Marie-Geneviève, septembre 2002, "Towards renewed research questions from the outcomes of the European project labwork in science education", *Science Education*, n°86(5), pp. 624-644.

SERE Marie-Geneviève et BENEY Michel, décembre 1997, "Le fonctionnement intellectuel d'étudiants réalisant des expériences : observation de séances de travaux pratiques en premier cycle universitaire scientifique", *Didaskalia*, n°11, pp. 75-102.

TIBERGHIEU Andrée, VEILLARD Laurent, LE MARECHAL Jean-François, BUTY Christian et MILLAR Robin, septembre 2001, "An analysis of labwork tasks used in science teaching at upper secondary school and university levels in several European countries", *Science Education*, n°85(5), pp. 483-508.

VERGNAUD Gérard, 1996, "Au fond de l'action, la conceptualisation", in : Jean-Marie Barbier (coord.), *Savoirs théoriques et savoirs d'action*, Paris, PUF, pp. 275-292.

WHITE Richard T., 1996, "The link between the laboratory and learning", *International Journal of Science Education*, n°18(7), pp. 761-773.