

Simulations scientifiques pour les travaux pratiques : choix de conception et affordances pédagogiques

Cédric d’Ham¹, Sébastien Rebaudo¹, Rémi Colin de Verdière²

¹ LIG-MeTAH, Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP

² Faculté des Sciences, Université Grenoble Alpes
cedric.dham@univ-grenoble-alpes.fr

Résumé. Les travaux pratiques (TP) sont essentiels pour l’apprentissage des sciences. Les TP simulés, utilisant des simulations informatiques à la place d’expérimentations physiques, sont de plus en plus utilisés en combinaison avec les TP en laboratoire pour en améliorer l’efficacité pédagogique. Nous analysons, sous l’angle de la transposition informatique, les affordances pédagogiques d’un TP simulé prototypique avant de présenter une nouvelle approche des TP simulés. Dans celle-ci, la simulation est manipulée par l’intermédiaire d’un protocole expérimental élaboré par l’apprenant. Cette approche augmente la complexité de la tâche de l’apprenant, mais contribue à enrichir ses apprentissages. Une infrastructure logicielle a été développée pour produire des TP simulés basés sur notre nouvelle approche.

Mots-clés : enseignement des sciences, travaux pratiques, simulations, transposition informatique, affordances pédagogiques.

Abstract. Laboratories are essential for learning science. Simulated experiments, which use computer simulations instead of physical experiments, are increasingly combined with science labs to enhance pedagogical effectiveness. We analyze the pedagogical affordances of a prototypical simulated experiment through the lens of computational transposition before introducing a new approach to simulated experiments. In this approach, the simulation is manipulated via an experimental protocol designed by the learner. This approach increases the complexity of the learner’s task but promotes a richer and more diverse learning experience. A software framework has been developed to produce simulated experiments based on our new approach.

Keywords: science laboratory, simulations, computational transposition, pedagogical affordances.

1 Introduction

Les travaux pratiques (TP) constituent un élément central de l’enseignement des sciences [19]. Au cours de ces séances, les étudiants réalisent des expérimentations,

c'est-à-dire qu'ils « installent et manipulent des équipements dans le but de collecter des données » [10], données ensuite utilisées pour établir des résultats expérimentaux. Bien que l'efficacité des TP en matière d'apprentissage ait été régulièrement questionnée [2, 27], les enseignants restent attachés à cette modalité qu'ils considèrent comme centrale dans la formation scientifique [2].

L'idée de remplacer les expérimentations par des simulations est ancienne [8]. Dans les « TP simulés », les données ne sont pas mesurées par des instruments physiques, mais générées par un modèle. Une expérimentation consiste alors à choisir la valeur de paramètres, puis à lancer une simulation qui calcule des données considérées comme expérimentales. Une représentation du phénomène étudié est souvent affichée pour permettre à l'apprenant de faire le lien entre les données simulées et le phénomène (ou tout du moins sa représentation à l'écran). Comparées aux TP en laboratoire, les simulations offrent de nombreux avantages. Elles réduisent les coûts liés aux équipements, aux consommables et à l'encadrement. Elles rendent accessibles des expérimentations trop dangereuses, coûteuses ou complexes à mettre en œuvre. Enfin, il a été proposé que les simulations peuvent favoriser les apprentissages pour trois raisons principales [13] : (i) l'absence de contraintes matérielles permet de multiplier les expérimentations dans un temps réduit ; (ii) les données simulées, dépourvues d'erreurs expérimentales, sont plus faciles à analyser ; (iii) les visualisations peuvent être enrichies par la représentation de phénomènes inaccessibles à l'observation directe [24].

En raison des avantages attribués aux TP simulés, de nombreuses études ont comparé leur efficacité à celle des TP en laboratoire. Une revue de 2012 [26] rapporte un bénéfice clair en termes d'apprentissage de connaissances conceptuelles en faveur des TP simulés, lorsqu'ils remplacent des enseignements traditionnels ou des TP en laboratoire. Toutefois, les auteurs soulignent que la plupart des études présentent des biais en ne tenant pas compte des effets liés aux interventions des enseignants, aux documents de support et à la façon dont sont conçues les simulations. Une autre revue de 2013 [13] ne relève pas de différence significative entre les deux modalités et conclut à leur complémentarité, selon les phénomènes étudiés et les objectifs pédagogiques visés. Ces deux revues mettent en avant l'intérêt de combiner TP simulés et TP en laboratoire, que ce soit pour préparer les expérimentations en laboratoire ou pour leur apporter un éclairage conceptuel. Depuis, de nombreuses recherches ont cherché à évaluer les effets de cette combinaison. Une revue [31] et une méta-analyse [29] récentes montrent un effet positif sur les apprentissages de connaissances conceptuelles lorsque les deux modalités sont associées, par rapport à l'utilisation d'une seule modalité. L'ordre de présentation (simulation ou laboratoire en premier) ne semble pas influencer les résultats. Wang *et al.* [29] suggèrent que l'enjeu réside moins dans la séquence que dans la capacité de chaque modalité à fournir les informations les plus utiles selon le contexte.

Dans notre contribution, nous considérons l'ensemble des objectifs pédagogiques des TP, en élargissant notre analyse au-delà des seuls apprentissages de connaissances conceptuelles habituellement évalués. Nous examinons dans quelle mesure les simulations classiques soutiennent ces divers objectifs, et proposons un nouveau type de TP simulés visant à étendre le champ de leurs affordances pédagogiques.

2 Objectifs pédagogiques des Travaux Pratiques en sciences

Nous avons extrait de la littérature les objectifs pédagogiques les plus fréquemment associés aux TP de sciences, au niveau lycée ou licence. Selon les études, les objectifs identifiés proviennent d'enquêtes auprès d'enseignants [1, 3, 16, 20] ou d'étudiants [16], de l'analyse de fascicules de TP [28] ou d'avis d'experts [19]. Ils sont listés ci-dessous, du moins au plus spécifique aux TP de sciences, certains apprentissages ne pouvant être abordés que dans ce cadre [30].

1. *Développer des compétences transversales*, telles que la collaboration, la gestion du temps ou la rigueur.
2. *Renforcer la motivation pour l'apprentissage des sciences*, un objectif souvent associé aux TP bien qu'il ne concerne pas directement un apprentissage disciplinaire.
3. *Mobiliser des concepts et modèles scientifiques*, qui constituent le cœur des connaissances conceptuelles visées en sciences. Ces apprentissages ne sont pas spécifiques aux TP puisqu'ils sont aussi l'objectif des cours et travaux dirigés. La littérature montre que, pendant la phase de manipulation, les étudiants se focalisent souvent sur la réussite technique au détriment de la compréhension [21, 27], ce qui limite l'atteinte de cet objectif, ou le reporte à la phase de rédaction.
4. *Identifier et nommer des phénomènes scientifiques*, en s'appuyant sur la perception directe d'objets ou d'événements caractéristiques d'un champ disciplinaire, par exemple un précipité, une colonie bactérienne, un laser, etc.
5. *Reconnaître et manipuler le matériel de laboratoire*, en développant des compétences techniques de laboratoire, notamment la gestuelle et les pratiques garantissant la qualité des données produites et la sécurité des individus.
6. *Connaître les méthodes expérimentales courantes*, telles que la modification d'une seule variable à chaque nouvelle expérimentation [14], l'utilisation de contrôles positifs et négatifs, d'étalons ou de références [4], ou encore le calcul d'incertitudes pour comparer des résultats. Ces méthodes, bien que fondamentales, sont rarement comprises ou même conscientisées par les étudiants lorsqu'elles sont simplement exécutées en suivant des consignes prescriptives fournies dans des fascicules qualifiés de « cookbook¹ » [2, 27].
7. *Comprendre en quoi l'application d'une démarche articulant théorie et expérimentation fonde la validité des savoirs scientifiques*, dans une perspective épistémologique qui se manifeste à la fois dans la conduite d'une démarche expérimentale et dans sa mise en forme lors de la communication des résultats expérimentaux.

La liste ci-dessus montre que l'intérêt pédagogique des TP dépasse la seule mobilisation de connaissances conceptuelles. Ce constat questionne le choix des revues mentionnées en introduction de restreindre la comparaison entre TP simulés et TP en laboratoire à l'évaluation de cet unique type d'apprentissage.

¹ À la manière d'une recette de cuisine, où les actions à réaliser sont listées chronologiquement.

3 Affordances pédagogiques d'une simulation prototypique

Les simulations peuvent-elles couvrir l'ensemble des objectifs pédagogiques des TP ? Rutten *et al.* [26] donnent une première réponse en indiquant que « l'acquisition de compétences de laboratoire constitue souvent un objectif en soi, qui ne peut pas être entièrement remplacé par des simulations ». Dans cette partie, nous proposons d'analyser une simulation prototypique afin d'identifier ses affordances pédagogiques, c'est-à-dire sa capacité à servir de support à divers objectifs pédagogiques [22]. Cette analyse peut être réalisée sous l'angle de la transposition informatique² [5, 6] qui décrit les transformations subies par un savoir lorsqu'il est intégré dans un EIAH. L'analyse de la transposition informatique nécessite d'explicitier comment les objets de savoir (les concepts et relations de la discipline) sont codés et réifiés à l'interface du logiciel pour être visualisés et manipulés par les apprenants. Les représentations retenues et les contraintes de manipulation déterminent les affordances pédagogiques du dispositif, et donc les apprentissages que la simulation peut favoriser ou limiter.

Pour sélectionner un exemple prototypique de simulation, nous avons retenu un thème classique de TP : le dosage spectrophotométrique. Sur PhET [25], plateforme de référence proposant 171 simulations pédagogiques, une recherche avec le mot-clé « spectrophotometer » renvoie à la simulation « Beer's Law Lab » (fig. 1). Celle-ci est accompagnée d'une fiche de TP intitulée « Visible Spectrophotometry of Nickel (II) Chloride », fournissant les consignes pour réaliser un dosage spectrophotométrique.

Commençons par identifier les principaux objets de savoir accessibles (données d'entrée de la simulation) et leur mode de manipulation :

- Longueur d'onde de mesure (λ) : saisie au clavier ou réglage par curseur.
- Largeur de la cuve de mesure (l) : réglage par curseur.
- Nature de la solution dans la cuve de mesure (S) : choix parmi 8 solutions via un menu déroulant.
- Concentration de la solution (C) : réglage par curseur.

La simulation représente également trois objets de savoir calculés à partir de ces données, non manipulables directement :

- Couleur de la solution et intensité (phénomènes – dépendent de S et C).
- Absorbance (A) ou transmittance (mesures – dépendent de S , l , λ et C).
- Couleur du rayon lumineux et intensité avant et après la cuve (phénomènes – dépendent de λ et A).

La simulation ne comporte pas de scénarisation pédagogique. C'est la fiche de consigne qui gère cet aspect. Le scénario, très directif, indique à l'apprenant les valeurs à entrer, les données à collecter et leur mode de traitement : il s'agit d'un TP de type « cookbook ».

À partir de la description de la simulation en termes d'objets de savoir, nous pouvons évaluer ses affordances pédagogiques au regard des objectifs disciplinaires des TP (objectifs 3 à 7). Les objectifs 1 (compétences transversales) et 2 (motivation) ne relèvent

² Le mot « transposition » est utilisé avec le sens qu'il a dans l'expression « transposition didactique ».

pas directement de la transposition informatique, car ils dépendent davantage du scénario pédagogique que de la manipulation des objets de savoir. Notons que pour la motivation (objectif 2), il est établi que les TP simulés ont un impact moins favorable que les TP en laboratoire [7].

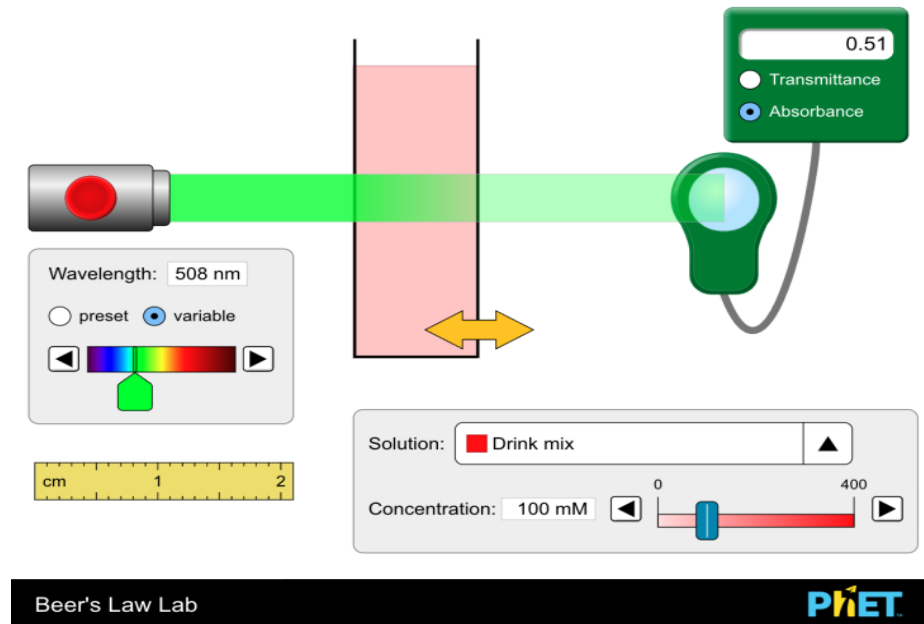


Fig. 1. Interface de la simulation de spectrophotomètre proposée par PhET.

Objectif 3 – Mobiliser des concepts et modèles. À partir des consignes de la fiche de TP et des manipulation possibles, la simulation engage les apprenants à mobiliser les concepts d'absorbance A et de spectre $A = f(\lambda)$, ainsi que le modèle de Beer-Lambert $A = \epsilon_{\lambda} \cdot l \cdot C$. Des informations de réalité augmentée sont affichées aux apprenants : visualisation du rayon lumineux dont la couleur dépend de la longueur d'onde et dont l'intensité dépend de l'absorbance. Ces informations ont pour fonction de faciliter la compréhension du concept d'absorbance et des paramètres d'influence dans le modèle de Beer-Lambert.

Objectifs 4 et 5 – Identifier et nommer des phénomènes ; reconnaître et manipuler le matériel. La simulation ne soutient pas ces objectifs et risque même d'induire des conceptions erronées chez l'apprenant par les représentations du rayon lumineux visible et de la cuve de mesure non translucide.

Objectif 6 – Connaître les méthodes expérimentales courantes. Dans le contexte présenté, cet objectif n'est pas travaillé par les apprenants en raison des limites de la simulation et du scénario. La simulation ne requiert pas certaines actions essentielles, telles que l'enregistrement d'une référence. Les mesures d'absorbance, exemptes d'erreur, permettent de tracer une courbe étalon à partir de seulement deux points. Ces simplifications constituent des erreurs méthodologiques dans un environnement de laboratoire

réel et nuisent à la compréhension des exigences propres aux expérimentations. Au niveau de la fiche de consigne, la procédure, présentée sous forme prescriptive, relève d'une approche « cookbook », peu favorable à la compréhension des enjeux et des justifications des méthodes expérimentales [2, 27].

Objectif 7 – Comprendre en quoi l'articulation théorie/expérimentation fonde la validité des savoirs. Dans la mesure où la simulation remplace l'expérimentation par un modèle théorique, aucune réelle articulation entre théorie et pratique n'est engagée. Cet objectif ne peut donc être travaillé.

L'analyse d'une simulation classique montre qu'elle ne soutient que l'apprentissage des concepts et modèles (objectif 3). Cela explique sans doute pourquoi les études comparant simulations et TP en laboratoire se concentrent sur cet objectif. Par ailleurs, des recherches ayant montré que les connaissances conceptuelles sont généralement peu mobilisées par les apprenants lors des TP en laboratoire [21, 27], les simulations peuvent renforcer ce type d'apprentissage et donc avoir un effet synergique lors de leur combinaison avec ces TP [29, 31]. Cependant, nous avons identifié que la simulation analysée peut avoir des effets négatifs sur d'autres objectifs (notamment 4, 5 et 6), en sursimplifiant la situation expérimentale. Comme le notent certains auteurs, les apprenants peuvent alors construire une représentation trop simplifiée de ce qu'est une investigation expérimentale [9, 10]. Il apparaît évident qu'un TP simulé ne peut pas remplacer un TP en laboratoire.

4 Proposition d'un nouveau type de TP simulés

Dans la section précédente, nous avons analysé une simulation qualifiée de prototypique. Toutefois, les simulations ne sont pas toutes équivalentes et, comme certains auteurs le formulent, « l'espace pour la conception des simulations est très vaste » [26]. Dans notre équipe, nous développons un nouveau type de TP simulés visant à élargir le spectre des affordances pédagogiques de ces environnements.

La figure 2 illustre une partie de l'interface d'un TP simulé fondé sur notre modèle et portant sur le même thème que précédemment : le dosage spectrophotométrique. Nous analysons ici, sous l'angle de la transposition informatique, les principaux objets de savoir accessibles et leur mode de manipulation. C'est à ce niveau que se situe la principale différence avec la simulation PhET. Dans la partie supérieure de la capture, sont visibles les étapes 3 et 4 d'un protocole expérimental constitué d'une succession d'actions [17]. Ce protocole est construit par les apprenants en ajoutant et paramétrant ces actions à partir d'actions prédéfinies, à la manière du logiciel Scratch pour l'enseignement de l'informatique. Les paramètres des actions sont saisis au clavier (valeurs) ou sélectionnés via des menus (matériel). Par exemple, l'action paramétrée « Conditionner un(e) cuve en quartz... » est en cours de modification dans l'étape 4. Les actions du protocole et leurs paramètres sont les données d'entrée de la simulation.

Concernant les données calculées par la simulation, les seuls objets de savoir affichés sont les résultats fournis par le modèle. Par exemple, la partie inférieure de la figure 2 montre un spectre généré en réponse à une mesure spécifiée dans l'étape 2 du protocole

(non présentée dans la figure). Dans le TP « dosage spectrophotométrique », l'objet de savoir « dispositif expérimental » n'est pas représenté, bien qu'il puisse l'être dans d'autres TP simulés conçus selon notre modèle.

Étape 3 - Mesures sur les solutions étalon
Réaliser les actions de cette étape 8 fois.

	1	2	3	4	5	6	7	8
sol-étalon	sol1	sol2	sol3	sol4	sol5	sol6	sol7	sol8

- Conditionner un(e) cuve en quartz avec sol-étalon
- Remplir la cuve du spectrophotomètre UV-visible avec sol-étalon . Effectuer une mesure d'absorbance de cette solution à 510 nm.

Étape 4 - Mesures sur le sirop de grenadine

- Conditionner un(e) fiole jaugée de 5 mL avec eau distillée
- Prélever 500 μL de sirop de grenadine avec un(e) micropipette et l'introduire dans un(e) fiole jaugée de 5 mL . Compléter avec eau distillée jusqu'à un volume de 5 mL . Boucher le récipient et homogénéiser par agitation. Nom de la solution créée : sirop dilué

Conditionner un(e) cuve en quartz avec sirop dilué

Commentaire

- Remplir la cuve du spectrophotomètre UV-visible avec sirop dilué . Effectuer une mesure d'absorbance de cette solution à 510 nm.

Ajouter une action

[▶ Simuler l'expérience](#) [? Obtenir une aide](#)

Félicitations ! votre protocole est optimisé.
Utilisez les données simulées pour déterminer la concentration recherchée

Fig. 2. Extrait de l'interface d'un TP simulé conçu selon notre modèle.

Contrairement aux simulations classiques, notre modèle intègre systématiquement un scénario pédagogique : à partir d'une question initiale, l'apprenant élabore un protocole expérimental, génère des données simulées, puis les exploite pour répondre au problème posé. L'élaboration d'un protocole pour définir les données d'entrée de la simulation rend le TP simulé nettement plus proche d'une activité de laboratoire que les simulations conventionnelles.

Evaluons les apports de notre TP simulé en termes d'affordances pédagogiques comparativement à la simulation PhET :

Objectif 3 – Mobiliser des concepts et modèles. Les mêmes concepts et modèles sont manipulés dans les deux situations : absorbance, spectres et loi de Beer-Lambert. Si la simulation PhET apporte une plus-value informationnelle via la réalité augmentée,

notre TP exige des apprenants qu'ils comprennent et mobilisent activement ces notions pour concevoir leur expérimentation.

Objectif 4 – Identifier et nommer des phénomènes. Aucun des deux dispositifs ne permet d'atteindre cet objectif.

Objectif 5 – Reconnaître et manipuler le matériel. L'aspect perceptivo-gestuel de la manipulation du matériel n'est pas accessible dans une simulation. Toutefois, notre modèle engage l'apprenant à choisir lui-même le matériel, nécessitant qu'il en comprenne la fonction.

Objectif 6 – Connaître les méthodes expérimentales courantes. Il s'agit du principal apport de notre TP simulé. L'élaboration d'un protocole par l'apprenant favorise l'acquisition de connaissances spécifiques à la pratique expérimentale et notamment au niveau des méthodes [15]. Cette activité, centrale dans notre modèle, n'est pas demandée dans le TP PhET, et rarement dans les TP en laboratoire car difficile à encadrer.

Objectif 7 – Comprendre en quoi l'articulation théorie/expérimentation fonde la validité des savoirs. Malgré la réflexion pratique requise pour élaborer un protocole, les résultats expérimentaux étant simulés, cet objectif reste difficilement atteignable.

En conclusion de notre analyse, une simulation classique permet de faire mobiliser, voire découvrir des concepts et modèles aux apprenants (objectif 3). Notre modèle permet lui aussi des apprentissages de connaissances conceptuelles mais également des apprentissages méthodologiques en termes de méthodes expérimentales (objectif 6) et de fonctions des matériels de laboratoire (une partie de l'objectif 5).

L'élargissement des affordances pédagogiques dans notre modèle repose sur l'activité de conception d'expérience confiée aux apprenants. Cette tâche, complexe, nécessite un étayage adapté [11, 18] afin que les apprenants produisent des protocoles suffisamment élaborés pour être simulables. Un premier étayage est assuré par la structuration du protocole, fondée sur des actions paramétrées. Un second est proposé via le bouton « Obtenir une aide » (fig. 2) : sur demande, le protocole est évalué par un système de contraintes [23] qui renvoie une rétroaction en fonction de l'historique de travail de l'apprenant.

Notre modèle de TP simulés est plus complexe à développer qu'une simulation classique. Pour faciliter ce développement, nous avons mis en place un framework logiciel qui réutilise les outils de la plateforme LabNBook [12], notamment ceux dédiés à l'élaboration de protocoles et au traitement de données. Des outils-auteur ont été intégrés dans ce framework pour que le concepteur puisse définir la structure du protocole, la spécification des contraintes à appliquer et les messages de rétroaction à destination de l'apprenant. Contraintes et simulations sont spécifiquement implémentées pour chaque TP. Deux TP ont été développés sur la base de ce framework (titrage acide-base et dosage spectrophotométrique) et ont été utilisés par 540 étudiants de licence 1 en préparation de séances de laboratoire où l'expérimentation est à concevoir. Trois autres TP simulés sont en cours de production (évaluation bactériologique d'une eau, dilution, dissolution).

5 Conclusion

Les travaux pratiques occupent une place centrale dans l'enseignement des sciences, en particulier pour développer des compétences qui dépassent la simple acquisition de connaissances conceptuelles. À partir d'une revue des objectifs pédagogiques usuellement associés aux TP, nous avons montré, par une analyse fondée sur la transposition informatique, que les simulations classiques ne permettent de soutenir qu'un nombre restreint de ces objectifs et en particulier celui lié aux apprentissages de connaissances conceptuelles.

Pour répondre à cette limite, nous avons proposé un nouveau modèle de TP simulés, centré sur la conception d'expérience par les apprenants. Ce modèle repose sur l'environnement numérique LabNBook, et permet d'étendre les affordances pédagogiques des simulations à des objectifs liés aux méthodes expérimentales et à la compréhension des fonctions du matériel. La structuration des protocoles sous forme d'actions paramétrées, associée à un système de rétroactions adaptatives, offre un étayage adapté à la complexité de la tâche. Un framework logiciel a été conçu pour permettre la production de tels TP simulés, en facilitant leur création par les enseignants et développeurs. Plusieurs TP ont déjà été réalisés et testés, et d'autres sont en cours de développement.

Cette dynamique ouvre de nombreuses perspectives de recherche : appropriation du framework par les enseignants, identification des caractéristiques d'un TP permettant de le transposer au format simulé, impact sur les apprentissages méthodologiques, ou encore optimisation de la stratégie de rétroaction pour soutenir la réussite et les apprentissages. Certaines de ces questions sont actuellement explorées au sein de notre équipe, tandis que d'autres restent à ouvrir pour de futurs travaux.

References

1. Abraham, M. R.: What can be learned from laboratory activities? Revisiting 32 years of research. *Journal of Chemical Education*, 88(8), 1020-1025 (2011).
2. Abrahams, I., Millar, R.: Does practical work really work? A study of the effectiveness of practical work as a teaching and learning method in school science. *International Journal of Science Education*, 30(14), 1945-1969 (2008).
3. Agustian, H. Y., Pedersen, M. I., Finne, L. T., Jørgensen, J. T., Nielsen, J. A., & Gammelgaard, B.: Danish university faculty perspectives on student learning outcomes in the teaching laboratories of a pharmaceutical sciences education. *Journal of Chemical Education*, 99(11), 3633-3643 (2022).
4. Baker, L. M., Dunbar, K.: Experimental design heuristics for scientific discovery: The use of "baseline" and "known standard" controls. *International Journal of Human-Computer Studies* 53(3), 335-349 (2000).
5. Balacheff, N.: La transposition informatique, un nouveau problème pour la didactique. In M. Artigue, R. Gras, C. Laborde, P. Tavnogot (eds.) *Vingt ans de didactique des mathématiques en France*, pp. 364-370. La Pensée Sauvage, Grenoble (1993).
6. Balacheff, N., Kaput, J. J.: Computer-based learning environment in mathematics. In A. Bischof (ed.), *International Handbook of Mathematics Education*, pp. 469-501. Kluwer Academic publisher, Dordrecht (1997).

7. Corter, J. E., Esche, S. K., Chassapis, C., Ma, J., Nickerson, J. V.: Process and learning outcomes from remotely-operated, simulated, and hands-on student laboratories. *Computers & Education*, 57(3), 2054-2067 (2011).
8. Boblick, J. M.: The use of computer simulations in the teaching of high school physics. *Science Education* 54(1), 77-81 (1970).
9. Chen, S., Chang, W.-H., Lai, C.-H., Tsai, C.-Y.: A Comparison of Students' Approaches to Inquiry, Conceptual Learning, and Attitudes in Simulation-Based and Microcomputer-Based Laboratories. *Science Education* 98(5), 905-935 (2014).
10. Crippen, K. J., Archambault, L. M., Kern, C. L.: The nature of laboratory learning experiences in secondary science online. *Research in Science Education* 43(3), 1029-1050 (2013).
11. d'Ham C., Girault I., Berthet A.: Modèles et étayages pour l'élaboration de protocoles par les élèves : cas des titrages acide-base. *Recherche en Didactique des Sciences et des Technologies*, 19, 165-186 (2019).
12. d'Ham C., Wajeman C., Girault I., Marzin-Janvier P.: LabNBook, plateforme numérique support des pédagogies actives et collaboratives en sciences expérimentales. In : Actes de la 9ème Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, Paris, pp. 49-60 (2019).
13. de Jong, T., Linn, M. C., Zacharia, Z. C.: Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science* 340, 305-308 (2013).
14. Efstathiou, C., Hovardas, T., Xenofontos, N. A., Zacharia, Z. C., deJong, T., Anjewierden, A., van Riesen, S. A. N.: Providing guidance in virtual lab experimentation: The case of an experiment design tool. *Educational Technology Research and Development* 66(3), 767-791 (2018).
15. Etkina, E., Karelina, A., Ruibal-Villasenor, M., Rosengrant, D., Jordan, R., Hmelo-Silver, C. E.: Design and Reflection Help Students Develop Scientific Abilities: Learning in Introductory Physics Laboratories. *Journal of the Learning Sciences* 19(1), 54-98 (2010).
16. George-Williams, S. R., Ziebell, A. L., Kitson, R. R. A., Coppo, P., Thompson, C. D., Overton, T. L.: 'What do you think the aims of doing a practical chemistry course are?' A comparison of the views of students and teaching staff across three universities. *Chemistry Education Research and Practice* 19(2), 463-473 (2018).
17. Girault, I., d'Ham, C., Ney, M., Sanchez, E., Wajeman, C.: Characterizing the experimental procedure in science laboratories: a preliminary step toward students experimental design. *International Journal of Science Education* 34 (6), 825-854 (2012).
18. Girault, I., d'Ham, C.: Scaffolding a complex task of experimental design in chemistry with a computer environment. *Journal of Science Education and Technology* 23 (4), 514-526 (2014).
19. Hofstein, A., Lunetta, V. N.: The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science Education*, 88(1), 28-54 (2004).
20. Josephsen, J.: Experimental training for chemistry students: does experimental experience from the general sciences contribute? *Chemistry Education Research and Practice*, 4(2), 205-218 (2003).
21. Kluge, A.: Combining Laboratory Experiments with Digital Tools to Do Scientific Inquiry. *International Journal of Science Education*, 36(13) 2157-2179 (2014).
22. Nagashima, T., Yang, K., Bartel, A., Silla, E., Vest, N., Alibali, M., & Aleven, V.: Pedagogical affordance analysis: Leveraging teachers' pedagogical knowledge to elicit pedagogical affordances and constraints of instructional tools. In *The Interdisciplinarity of the Learning Sciences, 14th International Conference of the Learning Sciences (ICLS) 2020* (Vol. 3) (2020).

23. Ohlsson, S.: Constraint-Based Student Modeling. In: Greer, J.E., McCalla, G.I. (eds) *Student Modelling: The Key to Individualized Knowledge-Based Instruction*. NATO ASI Series, vol 125. Springer, Berlin, Heidelberg (1994).
24. Olympiou, G., Zacharias, Z., de Jong, T.: Making the invisible visible: Enhancing students' conceptual understanding by introducing representations of abstract objects in a simulation. *Instructional Science* 41(3), 575-596 (2012).
25. PhET Homepage, <https://phet.colorado.edu/>, dernier accès le 9/05/2025.
26. Rutten, N., van Joolingen, W. R., van der Veen, J. T.: The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education* 58(1), 136-153 (2012).
27. Séré, M.-G., Beney, M.: Le fonctionnement intellectuel d'étudiants réalisant des expériences : observation de séances de travaux pratiques en premier cycle universitaire scientifique. *Didaskalia* 11, 75-102 (1997).
28. Tiberghien, A., Veillard, L., Le Maréchal, J.-F., Buty, C., Millar, R.: An analysis of labwork tasks used in science teaching at upper secondary school and university levels in several European countries. *Science Education* 85(5), 483-508 (2001).
29. Wang, X.-M., Yu, X.-H., Yu, D.-D. Hwang, G.-J., Lan, M.: Does combining real and virtual experiments improve learning achievement in physics? Evidence from a meta-analysis (2001-2021). *Educational Research Review* 46 (2025).
30. White, R.T.: The link between the laboratory and learning. *International Journal of Science Education*, 18, 761-774 (1996).
31. Wörner, S., Kuhn, J., Scheiter, K.: The best of two worlds: A systematic review on combining real and virtual experiments in science education. *Review of Educational Research* 92(6), 911-952 (2022).