

Introduction

Pourquoi ce livre ?

L'entrée dans un laboratoire de travaux pratiques constitue une épreuve tant pour l'enseignant que pour l'étudiant. Ce laboratoire est le lieu où l'étudiant pourra confronter le savoir théorique acquis en classe devant un tableau à un apprentissage à la paillasse souvent long. L'aspect au premier abord confus des résultats expérimentaux obtenus est parfois bien éloigné de la clarté d'un exposé présenté en classe et peut conduire à une certaine insatisfaction vis-à-vis de la discipline, voire son rejet. On conçoit aussi que cette confrontation avec la réalité expérimentale constitue pour l'enseignant le lieu où s'éprouve la fiabilité de son discours professoral. Ni l'étudiant ni l'enseignant ne sortent indemnes de cette épreuve de vérité.

Extrait de la préface de J. B. Baudin, directeur des études du département de chimie, ENS de Paris dans
« *Travaux pratiques de chimie tout prêts* »
édition ENS rue d'Ulm, 2009

Les activités expérimentales sont pour notre discipline une activité essentielle. Ces séances sont d'ailleurs bien appréciées par les étudiants. Nous pouvons cependant nous demander si chaque étudiant prend bien conscience du rôle de ces séances dans sa formation. Pour certains l'expérimentation proposée est « *juste une recette à suivre au mot près pour parvenir au résultat* » ; pour d'autres, c'est « *la crainte de ne pas obtenir le produit souhaité alors que ses camarades l'ont obtenu* » ; enfin, pour quelques uns, « *c'est une perte de temps puisqu'en cours on a déjà appris que...* »

Ce sentiment peut trouver son origine dans le fait qu'une grande majorité de ces activités expérimentales sont souvent trop dirigées, laissant ainsi à l'étudiant peu d'esprit d'initiative. En effet, quand on consulte les ouvrages de travaux pratiques ou les manuels scolaires, on constate que la plupart des protocoles expérimentaux restent

très guidés et ne se résument alors qu'à une succession d'étapes, de manipulations ou de gestes à effectuer dans un certain ordre. Des opérations souvent cohérentes et fiables, certes, mais pas nécessairement assimilées par l'étudiant. Cette impression est surtout très marquée en chimie organique, où le sentiment de suivre « une recette de cuisine » sans maîtriser le rôle et l'intérêt de chaque étape, semble prédominer. Il peut alors s'installer un sentiment de manque de confiance de la part des étudiants. On constate que ces activités ne permettent pas à l'étudiant d'appréhender totalement une démarche scientifique. Tout au plus, elles permettent de graver dans leur mémoire des gestes à reproduire parfaitement, sans forcément les avoir assimilés.

Or, un des objectifs des activités expérimentales est de confronter l'étudiant au travail de laboratoire, de lui faire prendre conscience qu'entre ce qu'un professeur expose au tableau et la réalisation au laboratoire, il y a souvent un long parcours.

Pratiquée dès le début XIX^e siècle pour former les chimistes puis laissée de côté pour un enseignement plus académique, la démarche d'investigation (DI, en anglais Inquiry based experiment education, IBSE) renaît aux États-Unis dans les années 1995 avant d'être mise en place dans de nombreux pays, met au premier plan l'aptitude des élèves et étudiants :

- à concevoir et à conduire une démarche scientifique pour la résolution d'un problème,
- à formuler des explications scientifiques utilisant l'expérience pour vérifier leur hypothèse,
- à communiquer leurs résultats et à les exploiter.

Cependant, si on remonte un peu plus dans l'histoire, on constate que cette façon de « faire » des sciences n'est pas nouvelle. Cette technique d'enseignement a même été la première utilisée, dès la création des premières écoles de chimie, au tout début du XIX^e siècle. Avant cette époque, les enseignements de chimie se faisaient de maître à disciple, par des cours particuliers. À la toute fin du XVIII^e siècle, en France, sous l'influence notamment des scientifiques qui entouraient Napoléon I^{er} (lui-même féru de sciences), les premières écoles enseignant la chimie furent créées : Conservatoire des Arts et Métiers, Ecole Polytechnique et d'autres. Les scientifiques comme Louis-Jacques Gay-Lussac (1778-1850), à Paris, font le choix d'enseigner de cette façon. Son élève, Justus von Liebig (1803-1873) diffusera cette pratique en Allemagne, à Giessen où il fonda le premier laboratoire d'enseignement de masse (couplé à la recherche), qui sera une plaque tournante de l'enseignement expérimental de la chimie pendant près d'un demi-siècle. On y trouvait des Français, des Russes, des Italiens, des Américains... À Londres, ce sera Humphry Davy (1778-1829), également en liaison, certes un peu tendue, avec Gay-Lussac, et son élève, Michael Faraday (1791-1867), relayé un peu plus tard par August Wilhelm von Hofmann (1818-1892) élève

de Liebig, nommé à Londres, qui enseigneront de cette façon. L'essor de la chimie et l'augmentation progressive du nombre d'étudiants pratiquant cette science feront perdre peu à peu cet esprit. Pour l'anecdote, Louis Pasteur (1822-1895), alors jeune professeur de lycée, se plaignait d'avoir des classes de 80 élèves !

En 2007 un rapport de la commission européenne (« l'enseignement scientifique aujourd'hui ; une pédagogie renouvelée pour l'avenir de l'Europe »), présidée par Michel Rocard vantait les mérites de la DI pour redonner l'envie aux étudiants de s'engager dans des filières scientifiques. Cette DI s'est aussi beaucoup développée en France à l'école primaire sous l'impulsion notamment de la « Main à la pâte », à l'initiative de Georges Charpak, et au collège, où la démarche d'investigation, quand elle est possible, est préconisée dans l'enseignement des sciences depuis 2005 (BO spécial n° 6 du 28 août 2008). Pour autant, dans la poursuite des études après le collège, notamment aux lycées général et technologique, il semble que cette démarche ne soit que trop rarement mise en place même si l'introduction générale des programmes de sciences physique de 2001 y fait déjà référence :

« Les activités expérimentales jouent un rôle important dans l'enseignement. Celles-ci peuvent s'articuler autour de deux pôles distincts :

*- l'expérience de cours,
- la séance de travaux pratiques au cours de laquelle l'élève doit manipuler seul ou en binôme.*

Pourquoi un enseignement expérimental ?

- Il offre la possibilité de répondre à une situation-problème par la mise au point d'un protocole, la réalisation pratique de ce protocole, la possibilité d'aller-retour entre théorie et expérience, l'exploitation des résultats.

- Il permet à l'élève de confronter ses représentations avec la réalité.

- Il apprend à l'élève à observer en éveillant sa curiosité.

- Il développe l'esprit d'initiative, la ténacité et le sens critique.

- Il lui permet de réaliser des mesures, de réfléchir sur la précision de ces mesures, d'acquérir la connaissance de quelques ordres de grandeur.

- Il aide l'élève à s'approprier des lois, des techniques, des démarches et des modes de pensée.

Ainsi, les activités expérimentales établissent un rapport critique avec le monde réel et incontournable, où les observations sont parfois déroutantes, où des expériences peuvent échouer, où chaque geste demande à être maîtrisé, où les mesures - toujours entachées d'erreurs aléatoires quand ce ne sont pas des erreurs systématiques - ne permettent de déterminer des valeurs de grandeurs qu'avec une incertitude qu'il faut pouvoir évaluer au mieux. L'expérience de cours permet d'établir un premier rapport entre le réel et sa représentation. Les travaux pratiques sont le seul moyen d'appropriation de techniques et de méthodes.

Deux conditions sont nécessaires pour que cet enseignement expérimental remplisse pleinement son rôle :

- les élèves doivent savoir ce qu'ils cherchent, anticiper (quitte à faire des erreurs) un ou des résultats possibles, agir, expérimenter, conclure et ainsi élaborer leurs connaissances,

- l'enseignant doit veiller à bien définir les objectifs de contenus et à limiter le nombre des compétences mises en jeu dans une séance de TP afin de bien dégager les notions qu'il veut faire acquérir. Avant toute entrée dans le processus de résolution et d'expérimentation, il doit vérifier, lors du débat, que les élèves ont bien compris la question et/ou les termes du problème à résoudre ».

BOEN hors série, 30 août 2001

Or, de nombreuses recherches ont mis en évidence un plus grand intérêt pour la discipline chez les étudiants pratiquant cette démarche ainsi qu'un goût pour formuler des hypothèses scientifiques, mettre au point des protocoles expérimentaux pour les vérifier, analyser et interpréter les résultats d'une ou plusieurs expériences. Ces étudiants font davantage preuve d'esprit d'initiative, d'esprit critique, de curiosité et de créativité. Ils se sentent davantage responsabilisés et par conséquent s'investissent davantage dans le travail qui leur est demandé et dans leur apprentissage des connaissances scientifiques. Ces étudiants comprennent ainsi comment la recherche scientifique fonctionne et comment se mettent en place les mécanismes de recherche en laboratoire.

Dès lors il faut se demander comment nous, enseignants, nous pouvons construire de telles séquences pour :

- illustrer une notion abordée en cours (à venir dans un tome ultérieur) ;
- découvrir un concept, une notion ou une technique ;
- prendre du recul par rapport à un ensemble de savoirs ou de savoir-faire.

Que trouverez-vous dans cet ouvrage ?

Vous trouverez tout d'abord des explications concernant les principes de base de la démarche d'investigation (DI). En effet, la première partie situe le contexte dans lequel cette démarche est apparue et rappelle les bases sur lesquelles elle repose. Y seront abordés notamment des points comme la mise en place de cette méthode, l'approche que peuvent en avoir des enseignants et des étudiants de différents niveaux et quelques étapes clés que l'on peut dégager lors de la pratique de cette méthode. La question de l'évaluation, le rôle des étudiants, ainsi que la grande place laissée à l'oral seront aussi mentionnés. Nous montrerons que cette démarche présente à la fois une unité et une diversité tant dans l'approche que dans la façon de la mettre en place.

Dans une seconde partie, nous avons demandé à deux scientifiques de renommée internationale leur avis sur les activités expérimentales en chimie dans l'enseignement secondaire et en filière post bac.

Dans une troisième partie, des exemples concrets illustrant cette notion de DI seront détaillés. Les activités proposées sont des séquences toutes réellement réalisées avec des étudiants, soit en BTS chimiste soit en classes préparatoires aux grandes écoles.

Enfin, dans la dernière partie, vous trouverez des pistes, des idées pour aider à la conception de telles séances. À travers un certain nombre d'exemples, plus ou moins détaillés, nous essaierons de montrer qu'il n'est pas forcément difficile de créer et/ou de modifier des activités expérimentales déjà existantes afin de les « métamorphoser » en séances dites « d'investigation », et que cela tient compte davantage d'un état d'esprit. En la pratiquant, vous constaterez que cette approche n'est finalement pas si « chronophage » et si contraignante que cela et qu'elle permet une véritable réussite de chaque étudiant en jouant notamment sur leur motivation.

Première partie

Comment mettre en place une démarche d'investigation en travaux pratiques ?

« Expérimenter ne signifie pas "manipuler". En effet, il ne faut pas confondre être actif avec ses mains et être acteur avec sa tête. Les étudiants doivent se poser des questions, émettre leur propre hypothèse [...] concevoir des montages expérimentaux pour mettre à l'épreuve leurs idées, recueillir et analyser les résultats obtenus, en tirer des conclusions et présenter leurs recherches aux autres, tout ceci n'étant pas linéaire mais en interaction. »

G. de Vecchi et A. Giordan : « **L'enseignement scientifique comment faire pour que ça marche ?** », Delagrave, 2002, p. 259.

Chapitre 1

Le contexte

Un constat

Actuellement, les séances de TP ont pour principaux objectifs d'évaluer la capacité des étudiants à effectuer tel ou tel geste technique, ainsi que de vérifier des lois établies en cours. Ce que l'on constate, c'est que la majorité des protocoles proposés laisse très peu de place à l'autonomie et noie l'étudiant sous un flot d'informations : il est alors tellement absorbé à ne pas oublier une étape qu'il en oublie la vision globale du TP, l'objectif et l'intérêt de réaliser chaque geste.

Illustrons ce constat par un exemple assez caricatural (épreuve pratique tirée d'un sujet d'examen de BTS chimiste¹) :

¹ Nous vous proposons dans la partie 3 une méthode pour transposer ce TP en une séance qui laisse plus de place à la réflexion et à l'autonomie de l'étudiant (enseignement de type démarche d'investigation). Vous pouvez trouver l'énoncé de ce TP ainsi que l'ensemble des sujets des épreuves pratiques du BTS chimiste sur le site de Ressources Nationales de Chimie, <http://www.educnet.education.fr/rnchimie/>, dans la rubrique BTS chimiste – Annales – Epreuves de TP de chimie organique.

▪ Mode opératoire

□ Préparation du 1-iodobutane

Dans un ballon tricol sec de 250 mL équipé d'un réfrigérant surmonté d'une garde à chlorure de calcium, d'une ampoule de coulée et d'un agitateur, placer 21,5 g d'iodure de sodium anhydre.

- Ajouter 120 mL de propanone (acétone) anhydre. Agiter le mélange jusqu'à complète dissolution de l'iodure de sodium.
- Ajouter par l'ampoule de coulée 12,5 g de 1-bromobutane et porter au reflux pendant 75 min.
- Laisser refroidir le ballon à température ambiante.
- Filtrer le mélange réactionnel et placer le filtrat dans un ballon monocol de 200 mL.
- Évaporer le solvant par distillation.
- Placer le résidu de distillation dans une ampoule à décanter.
- Laver le mélange avec 50 mL d'eau. Garder de côté la phase organique.
- Extraire la phase aqueuse avec 20 mL de dichlorométhane.
- Rassembler les phases organiques et les laver avec 25 mL d'eau additionnée d'un cristal de thiosulfate de sodium.
- Laver ensuite la phase organique avec 50 mL d'eau.
- Sécher la phase organique sur sulfate de magnésium puis filtrer.
- Éliminer le solvant à l'évaporateur rotatif. (Ou par distillation simple).
- Stocker le produit dans un récipient étiqueté.
- Peser la masse de 1-iodobutane formée.
- Mesurer l'indice de réfraction du 1-iodobutane.
- Donner le flacon au professeur examinateur pour l'analyse en chromatographie en phase vapeur.

□ Préparation du 2-butyl-3-oxobutanoate d'éthyle

- Peser 3,0 g de pastilles de soude dans un bécher de 100 mL et les dissoudre dans environ 10 mL d'eau.
- Laisser refroidir la solution, puis la transvaser quantitativement dans une fiole de 25 mL et ajuster son volume au trait de jauge.
- Boucher la fiole et homogénéiser la solution.
- Prélever à la pipette jaugée 10 mL de cette solution et les placer dans un erlenmeyer de 25 mL. Refroidir l'erlenmeyer dans un bain d'eau froide et ajouter 5,6 g d'hydrogénosulfate de tétrabutylammonium ; réchauffer légèrement pour dissoudre, si besoin est.
- Dans un ballon de 100 mL, équipé d'un barreau magnétique et d'une ampoule de coulée isobare, placer 1,95 g de 3-oxobutanoate d'éthyle, 4,14 g d'iodobutane commercial et 10 mL de dichlorométhane.
- Placer le contenu de l'erlenmeyer dans l'ampoule de coulée et l'ajouter goutte à goutte, en 5 minutes, sous vive agitation.
- Lorsque la phase aqueuse est devenue neutre (pH 7-8), arrêter l'agitation.