

La démarche d'investigation pour motiver les étudiants

Exemple d'un TP sur la spectroscopie infrarouge

Xavier Bataille, Erwan Beauvineau, Nicolas Cheymol, Vincent Mas et Michel Vigneron

Résumé La démarche d'investigation met au premier plan l'aptitude des étudiants à concevoir et à conduire une démarche scientifique pour résoudre un problème, à formuler des explications scientifiques utilisant l'expérimentation pour prouver leurs hypothèses, à communiquer leurs résultats et à les exploiter. Avec cette approche, ils font davantage preuve d'esprit d'initiative, d'esprit critique, de curiosité et de créativité. Ils se sentent responsabilisés par conséquent s'investissent plus dans le travail qui leur est demandé et dans leur apprentissage des connaissances scientifiques. Cet article présente une séance de travaux pratiques de 4 heures en démarche d'investigation en filière post-bac pour introduire la spectroscopie infrarouge.

Mots-clés Démarche d'investigation, mise au point d'un protocole, spectroscopie infrarouge, chimie organique.

Souvent, les protocoles expérimentaux fournis aux étudiants foisonnent de questions. Malheureusement, même s'ils y répondent sérieusement, leur but est davantage d'avoir une « bonne note » que d'approfondir véritablement leurs connaissances ou leurs savoir-faire expérimentaux sur telle technique ou tel appareil. Et même si l'étudiant arrive à répondre à certaines questions, il est bien rare qu'il en comprenne le fondement et, confronté à une nouvelle expérience du même type, il se heurte aux mêmes difficultés face aux questions posées sur le protocole qu'il a à réaliser. Ce type de problème se rencontre fortement en chimie des solutions (dosages, choix des concentrations, des indicateurs de fin de réaction, des méthodes de suivi, etc.) mais aussi en chimie organique sur les techniques mises en œuvre, par exemple l'extraction liquide/liquide (rôle et nombre des lavages), la recristallisation, le choix des conditions opératoires, solvant, durée de réaction, etc. De même, dans un TP fortement guidé, l'étudiant doit exécuter les gestes proposés dans le protocole sans toujours faire preuve d'esprit critique ou prendre du recul par rapport à sa pratique : le « niveau de tâche » reste trop modeste. Ce type de pratique peut conduire à démotiver, laisser les étudiants les plus faibles ou ceux qui ne veulent pas faire de la chimie leur métier.

Motiver les étudiants pour les séances de TP peut se faire de plusieurs manières : c'est par exemple le recours aux défis, aux projets de classe, à la confrontation entre ce qui est écrit sur un tableau et la réalité expérimentale en laboratoire. Il s'agit de faire en sorte qu'ils soient responsabilisés, qu'ils aient l'impression de ne pas travailler que pour une note mais pour un objectif plus ambitieux où chacun devra apporter sa contribution.

Enfin, les TP sont souvent perçus comme un « simple » exercice pratique truffé de questions auxquelles il faudra répondre pour espérer une bonne note. Les « bons étudiants » s'en sortent plutôt convenablement mais les plus « faibles » ou les moins scolaires n'en saisissent pas forcément l'intérêt. Dans le cadre de la démarche

d'investigation (DI), le TP change de statut. Le laboratoire devient un lieu où l'on confronte le savoir exposé sur un tableau noir au verdict de la paillasse, « au réel qui résiste ».

Après avoir présenté quelques pistes pour mettre en place des séances d'investigation, nous illustrerons notre propos sur une séance réalisée avec nos étudiants en filières post-bac. Il s'agit d'un TP qui vise à mettre en évidence l'intérêt de la spectroscopie infrarouge en chimie organique. Ce TP comporte trois phases :

- présentation par un technicien de l'appareil, réalisation d'un spectre, utilisation du logiciel ;
- travail sur le cours de spectroscopie infrarouge par binôme ;
- réalisation de spectres par les étudiants en justifiant leur choix.

Quelques pistes pour construire des séances de TP avec la démarche d'investigation

Faire appel à l'esprit critique

Lors d'une séance de TP, il est intéressant de faire appel à l'esprit critique des étudiants. Les exemples sont nombreux ; en voici quelques-uns :

- Lors d'une séance sur les titrages acido-basiques, une courbe de titrage pH-métrique est présentée pour expliquer le choix d'un indicateur coloré. L'étudiant est informé que selon le choix de l'indicateur coloré, il risque d'avoir un volume à l'équivalence sous-évalué ou surévalué... Hélas, si lors d'un autre titrage on pose à l'étudiant cette question, on s'aperçoit qu'il se trouve souvent désarmé face au choix de l'indicateur coloré et ne sait comment procéder. Dans ces conditions, il vaut mieux proposer la question suivante : comment choisir un indicateur de fin de réaction afin de ne pas sur ou sous-évaluer le volume de réactif titrant ajouté à l'équivalence ? Le même dosage peut être réalisé par des binômes qui utilisent des indicateurs colorés différents : les

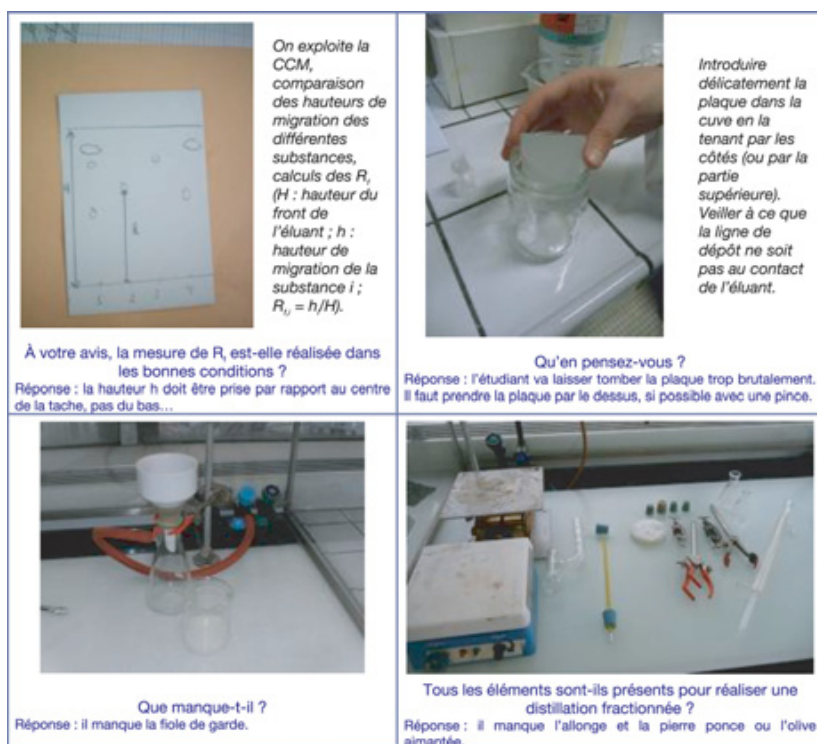


Figure 1 - Trouvez l'erreur... la preuve par l'image.

volumes à l'équivalence seront alors comparés (sans oublier de faire un test de répétabilité pour mettre en évidence la fiabilité de la méthode), avec une erreur estimée. Comment choisir le meilleur ? Soit la solution a été préparée avant par les étudiants, soit ce dosage est couplé à un suivi pH-métrique et/ou conductimétrique, ce qui permet d'avoir une valeur indépendante de l'indicateur choisi. Il peut être intéressant de réaliser les trois méthodes simultanément, au cours d'un même dosage, voire de faire un traitement de type Gran. Cette démarche peut être adaptée pour n'importe quel type de dosage (redox, complexométrie) avec toujours une idée en tête : la vérification doit être indépendante et validée.

- Des bilans de TP, photos à l'appui ! Tout au long des séances de TP, on peut prendre quelques photos pour montrer certaines erreurs de manipulation ou corriger certains gestes au moment du bilan en fin de séance (figure 1). Cela permet aussi de bien fixer les savoir-faire expérimentaux en vue d'une future évaluation.

Faire appel à la créativité

Plutôt que de donner un protocole « tout fait » aux étudiants, on peut leur proposer un protocole original issu de la littérature, en leur spécifiant qu'ils doivent réaliser sa transposition dans leur laboratoire en choisissant les conditions les plus conformes aux contraintes locales. Ils pourront ainsi, suivant les groupes, faire différents choix et les tester. Peut-être que toutes les idées ne « marcheront » pas, mais chaque groupe aura réfléchi à un problème et aura formulé une hypothèse, l'aura testée, et pourra ainsi conclure par l'analyse de ses propres résultats et/ou de ceux des autres groupes. Bien sûr, cette approche suppose la mise à disposition d'ouvrages recensant les données relatives aux solvants et à la toxicité des produits chimiques utilisés.

Un autre type de projet, interclasse celui-là, peut être la création d'un « Handbook[®] » d'établissement, où les étudiants déterminent des données thermodynamiques ou cinétiques et les compilent dans un document laissé à disposition au laboratoire. On peut ainsi envisager de faire établir expérimentalement les valeurs de pK_S , pK_A , $\log \beta_n$, E° , k , etc. par des techniques très variées.

En cours de chimie organique, on fournit souvent beaucoup de données associées à un type de réaction ou de fonction. Pour autant, l'étudiant a du mal à s'en servir pour assimiler le cours et parfois même ne les comprend pas. Bien sûr, il ne s'agit pas de toujours mettre en cause ni ce que l'on apprend ni les données fournies, mais simplement de se poser la question : comment pourrait-on valider une information vue en cours ? Ainsi, on peut aussi imaginer des séances de TP pour retrouver les résultats du cours :

- Une estérification avec un alcool tertiaire et un acide carboxylique conduit à un faible rendement : prouvons-le !
- Une substitution nucléophile de type monomoléculaire nécessite un solvant protogène : changeons de solvant !
- Une β -élimination nécessite de chauffer : ne chauffons pas !

- L'action de l'ion hydroxyde sur un halogénoalcane à froid en milieu dilué donne un produit de substitution mais conduit à un alcène si la solution est concentrée et que l'on chauffe : vérifions-le !

- Pour former un éther oxyde par la réaction de Williamson, l'halogénoalcane doit être primaire sinon on obtient un alcène : prouvons-le !

Une réaction simple en chimie organique et « qui fonctionne » (estérification, réaction de Diels-Alder, substitution nucléophile, substitution électrophile aromatique) peut être utilisée de manière comparative. En effet, il est possible de faire la même réaction pour chaque étudiant ou pour chaque binôme, en changeant juste un des réactifs (le type de réaction restant le même). Il faudra alors faire comparer aux groupes les différents résultats obtenus et essayer d'expliquer pourquoi, ce qui peut donner lieu à des discussions intéressantes.

Exemple 1 : cas de la réaction de Diels-Alder

Un protocole est habituellement distribué aux étudiants et permet d'effectuer une réaction de Diels-Alder entre le buta-1,3-diène et l'anhydride maléique (le buta-1,3-diène étant formé à partir de sulfo-3-ène).

Dans le protocole, les conditions sont données : temps de reflux, méthodes de purification et d'analyse ainsi que les questions « habituelles ». Après un inventaire des produits disponibles, nous avons choisi et répertorié un certain nombre de diènes et de diénophiles susceptibles de donner une réaction de type Diels-Alder, et nous les avons regroupés dans le *tableau 1*. Ce tableau a été distribué aux étudiants avec le protocole du TP habituel, et il leur a été demandé :

- de choisir un ensemble de trois produits ;
- de chercher toutes les données (sécurité, propriétés physico-chimiques...) de ces trois composés ;
- de choisir deux de ces produits permettant de réaliser une réaction de Diels-Alder, de donner le mécanisme de la

Tableau I.

Trinôme 1	Trinôme 2	Trinôme 3
<ul style="list-style-type: none"> ➤ 1,4-diphénylbutadiène ➤ Acide maléique ➤ Acrylonitrile 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Isoprène ➤ Acide cinnamique ➤ Méthylvinylcétone 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2,3-diméthylbuta-1,3-diène ➤ 2-méthylbut-2-ène ➤ Méthacrylate de méthyle
Trinôme 4	Trinôme 5	Trinôme 6
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Isoprène ➤ Cinnamaldéhyde ➤ Acrylate de méthyle 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 1,4-diphénylbuta-1,3-diène ➤ Acide cinnamique ➤ 2-méthylbut-1-ène 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Méthylvinylcétone ➤ Transchalcone ➤ Acrylonitrile
Trinôme 7	Trinôme 8	Trinôme 9
<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2,3-diméthylbuta-1,3-diène ➤ Acide cinnamique ➤ Acrylate de méthyle 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2-méthylbut-2-ène ➤ 1,4-diphénylbuta-1,3-diène ➤ Cinnamaldéhyde 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ sulfo-3-ène ➤ Anhydride maléique

mais aussi être capables de choisir le bon appareil de mesure.

On peut par exemple réaliser des mesures en spectrophotométrie d'absorption moléculaire. Dans un premier temps, on ouvre l'appareil pour en expliquer rapidement le fonctionnement (lampe au tungstène, au deutérium, présence d'un système diffractant, d'un détecteur, etc.). On effectue ensuite la manipulation : réalisation des « blancs » et passage d'une gamme. Il est intéressant à cette étape de passer cette gamme sur plusieurs appareils (au moins trois)

réaction et de prévoir le(s) produit(s) pouvant se former en tenant compte des différents stéréoisomères possibles ;
- de proposer un mode opératoire (sur de faibles quantités en utilisant un matériel adapté à la microchimie) en se basant sur celui fourni et en le transposant à de faibles quantités ;
- de réaliser l'expérience après validation par le professeur, de réaliser les analyses et de conclure.

Le groupe 9 devait réaliser le protocole classique, le transposer en microchimie ainsi qu'en activation micro-ondes. Pour les groupes ayant réussi à obtenir un produit, le protocole devait aussi être transposé en activation micro-ondes. Bien que certaines réactions n'aient pas fonctionné et que quelques produits formés n'aient pas pu être caractérisés formellement (obtention de produits huileux, impurifiables, goudronneux... ou alors par manque de produits de référence), ce TP a beaucoup plu aux étudiants dans le sens où ils ont eu l'impression de créer quelque chose de nouveau, d'inédit, et d'effectuer un travail de recherche. Des résultats très intéressants ont été obtenus lors de cette séance, qui feront l'objet d'une séance de TD en classe sur les orbitales frontières.

Exemple 2 : partir d'un exercice

Il est aussi envisageable de distribuer aux étudiants un extrait d'exercice, de sujet de bac, de concours, et de tester la faisabilité du protocole expérimental décrit.

Les étudiants doivent résoudre l'exercice, puis vérifier qu'il est correct d'un point de vue expérimental en testant le protocole proposé par l'énoncé (figure 2).

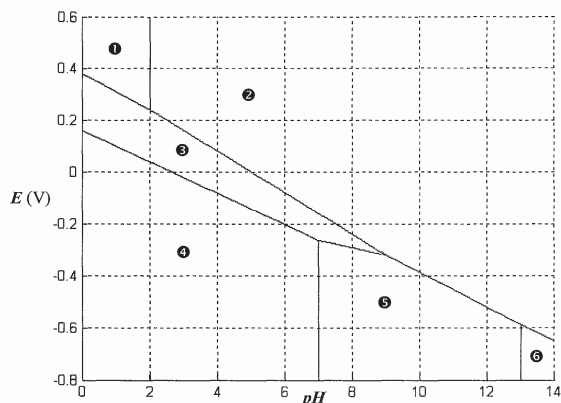
Dans chacune des séances, les étudiants ont été très intéressés par cette approche. Ils ont résolu l'exercice par groupe (2 ou 4) puis ont cherché à vérifier la validité du protocole. Ils ont dû réaliser les solutions, les analyses proposées et discuter de la qualité des résultats et de l'intérêt de la méthode décrite dans l'exercice.

Comprendre et maîtriser les appareillages

La chimie évolue toujours en parallèle des technologies qu'elle utilise. Nos étudiants sont confrontés à l'utilisation d'appareils aux technologies toujours plus élaborées. Il faut connaître préalablement des rudiments sur leur fonctionnement – et donc faire une initiation à l'instrumentation –, savoir les paramétrer, les étalonner, introduire éventuellement la notion de domaine de linéarité, et comprendre pourquoi on réalise toutes ces opérations. Ceci débouche sur la notion de validation des résultats, de fiabilité d'appareils, de nécessité d'utiliser des étalons. Les étudiants doivent pouvoir être critiques par rapport aux valeurs indiquées par les appareils,

et de comparer les absorbances mesurées. Il est aussi possible de faire déterminer expérimentalement par les étudiants les domaines de linéarité de certaines lois, comme la loi de Beer-Lambert, plutôt que d'énoncer ses conditions de validité (faibles concentrations, ce qui est très vague et dépend des produits, température constante, faisceau monochromatique, solutions non troubles, non colloïdales, non fluorescentes, non phosphorescentes, etc.). Par exemple, un binôme regarde l'influence de la concentration sur un produit, un autre groupe fait de même avec un autre produit (avec un coefficient d'absorption molaire très différent si possible), un troisième étudie l'influence de la température sur l'absorbance, ou la présence d'un trouble, d'un effet de matrice, etc.

a) Sur le diagramme $E - pH$ du soufre tracé pour une concentration en espèces dissoutes égale à $10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$, placer les espèces $S_{(s)}$, HSO_3^- , SO_3^{2-} , $H_2S_{(aq)}$, HS^- et S^{2-} . Que se passe-t-il lorsqu'on verse de la soude concentrée sur du soufre solide ?



b) Superposer sur ce diagramme le diagramme $E - pH$ de l'iode (espèces $I_{2(aq)}$, I^- et IO_3^-) en prenant sur les frontières la concentration de chaque espèce dissoute égale à $c_r = 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$. Que devient le diiode en milieu basique ?

$$E^\circ(I_{2(aq)}/I^-) = 0,62 \text{ V} ; E^\circ(IO_3^-/I_{2(aq)}) = 1,20 \text{ V}$$

c) Un mode opératoire de dosage des ions sulfure S^{2-} est :

- ① dans 20 mL d'une solution de $I_{2(aq)}$ à $0,10 \text{ mol.L}^{-1}$, on ajoute 20 mL de $NaOH$ à 2 mol.L^{-1} .
 - ② 20,0 mL de la solution de sulfure de sodium à titrer (de concentration approximative $C \approx 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$) sont ajoutés. Le mélange est légèrement chauffé tout en agitant.
 - ③ après avoir refroidi, la solution est acidifiée par addition de H_2SO_4 dilué.
 - ④ on effectue le titrage par une solution de thiosulfate de sodium $Na_2S_2O_3$ à $0,10 \text{ mol.L}^{-1}$; le volume versé à l'équivalence est de 22,4 mL.
- Indiquer les réactions mises en jeu au cours des différentes étapes de ce protocole. En déduire la concentration de la solution de sulfure.

Figure 2 - Exemple d'un énoncé à proposer.

D'après *Les mille et une questions de la chimie*, Ellipses (CPGE option PC).

On peut aussi tester des électrodes, voire en faire fabriquer une (de type électrode à hydrogène par exemple), étalonner un pH-mètre que l'étudiant aurait construit en TP d'électricité, etc. Ceci permet ensuite de créer des TP où les étudiants choisissent en toute connaissance de cause, ou presque, leur technique, leur matériel et mettent en place les étalonnages associés.

On peut aussi comparer les données issues de différentes techniques de mesure utilisées comme lors du dosage de l'aspirine par différentes méthodes (pH-métrique, direct ou en retour, par spectrophotométrie UV-visible ou autre, et conclusion sur la concordance des résultats)⁽¹⁾.

Relever un défi

Il s'agit ici de relever un défi scientifique pour amener les étudiants (ou les élèves) à se confronter sur des questions à la fois théoriques et pratiques. L'avantage de cette approche est qu'elle peut se pratiquer à tout niveau du cursus scolaire. Un dosage en solution aqueuse peut être motivant en début d'apprentissage, mais faire ce type de manipulation de manière répétée peut limiter l'intérêt qu'y portent les étudiants. Une variante possible consiste à faire préparer des solutions par des binômes ou par le professeur et d'autres binômes doivent choisir une méthode de dosage et déterminer la concentration des solutions préparées. Les exemples de défis ne manquent pas, il est même possible de faire des « concours » :

- de la meilleure séparation en CCM (avec éventuellement transposition sur colonne), du maximum de dépôts par plaque sans interférence,
- du meilleur rendement sur une estérification – le meilleur déplacement d'équilibre,
- de la méthode de dosage la plus fiable,
- de la méthode la plus efficace pour préparer une solution d'acide chlorhydrique à 1,0 mol.L⁻¹ à partir d'une solution commerciale,
- de la synthèse avec la cinétique la plus rapide,
- de la méthode la plus adaptée pour extraire une substance naturelle donnée,
- de la meilleure purification, etc.

Bilan

En TP d'investigation, le travail de la classe s'inscrit dans une démarche qui permet plus facilement de développer le **raisonnement scientifique**, le **sens critique** et l'**esprit de synthèse**. Les étudiants doivent aussi apprendre à formaliser et communiquer des résultats et des conclusions, même si ces résultats ne sont pas ceux attendus (l'erreur n'est plus assimilée à un échec mais est au contraire une source d'apprentissage). La valorisation de ces résultats n'a lieu pour l'étudiant que s'il est capable de les **communiquer** au reste du groupe, à l'aide de différents moyens. Une grande place est alors faite à l'oral et l'utilisation des différents médias (vidéoprojecteur, Flexcam®, tableau numérique interactif, etc.).

Un exemple de séance en filière post-bac

Il s'agit de découvrir, s'approprier et utiliser la technique de spectroscopie infrarouge en chimie organique.

Le TP est réalisé et testé en 4 heures par des étudiants en classe préparatoire aux grandes écoles, option PC.

Ils ont à leur disposition les cours sur la spectroscopie infrarouge (IR), des exemples de spectres, des tables de données IR.

Compétences mises en jeu⁽²⁾

Les travaux pratiques permettent d'acquérir des compétences scientifiques, la conception de grilles peut permettre un accompagnement de l'étudiant pour l'acquisition de ces compétences. Un exemple de grille est proposé dans le *tableau II*. Certaines compétences sont extraites du socle commun (disponible sur le site Eduscol⁽³⁾) et d'autres inspirées de l'ouvrage de M. Ruffenach et D. Courtillot⁽²⁾. Cette grille d'évaluation par compétences est à adapter selon les situations ; il est essentiel de la communiquer par avance aux étudiants et il est souhaitable de présenter les critères d'évaluation qui seront retenus.

Déroulement de la séance

Pendant la première demi-heure, Franck Xavier, le technicien qui en a la charge, présente l'appareil aux étudiants (Avatar 320 FT-IR, Thermo Nicolet, *figure 3*). Il montre comment préparer un échantillon (solide, liquide), réaliser un spectre, utiliser le logiciel d'acquisition et de traitement ainsi que nettoyer l'appareil.

Puis dans un deuxième temps, pendant environ 1 h 30, les étudiants, par binôme, lisent le cours distribué sur la spectroscopie infrarouge (principe physique, intérêt en chimie, lecture de spectres, exemples de spectres, tables de données spectrales...). Ils essaient d'en extraire les informations principales. Il s'agit de permettre à chacun d'avancer à son propre rythme pour comprendre cette spectroscopie et son intérêt en chimie organique. Ainsi certains groupes ont terminé la lecture un peu plus rapidement et ont commencé le travail expérimental au bout d'une heure, alors que d'autres ont posé davantage de questions et ont travaillé sur le polycopié un peu plus d'1 h 30. À la fin de cette phase, chaque binôme devait résumer les grandes idées du polycopié pour passer à la partie pratique.

Le problème suivant est posé aux étudiants : « À partir de ce que vous venez de découvrir sur la spectroscopie infrarouge, proposez un travail expérimental en chimie organique mettant à profit cette technique. Vous disposez



Figure 3 - Le spectromètre infrarouge utilisé durant la séance de TP (Avatar 320 FT-IR, Thermo Nicolet).

Tableau II - Exemple de grille d'évaluation d'un TP d'investigation.

A : acquis, ECA : en cours d'acquisition, NA : non acquis

	A	ECA	NA
Connaissances mobilisées pour résoudre un problème			
Savoir adapter ses connaissances à la situation proposée			
Savoir observer, questionner, formuler une hypothèse et la valider ou non, argumenter, modéliser			
Comprendre le lien entre les phénomènes observés, les concepts utilisés et le langage mathématique qui aide à les décrire			
Richesse et variété des idées			
Savoir extraire des informations d'un texte			
Aptitudes expérimentales			
Développer des habiletés manuelles, être familiarisé avec certains gestes techniques			
Savoir utiliser correctement le matériel mis à disposition			
Efficacité de la mise en application			
Respecter les règles de sécurité et prendre conscience des risques			
Communication			
Qualité des documents rédigés (diaporama, rapports ; orthographe, grammaire)			
Aisance à l'oral			
Aptitude à gérer un groupe (activité de superviseur à tour de rôle)			
Analyser, exprimer et exploiter correctement les résultats d'une mesure ou d'une recherche, d'une expérience			
Utiliser les langages scientifiques à l'écrit et à l'oral			
Conclusion scientifique			
Savoir interpréter des résultats et tirer une conclusion d'un travail réalisé			
Savoir présenter un travail, une production, un calcul soigné et bien structuré			

d'un spectrophotomètre IR (Avatar 320 FT-IR de chez Thermo Nicolet) ; les produits chimiques nécessaires sont à demander aux techniciens. »

Pendant 30 minutes, les étudiants cherchent ainsi un sujet, une problématique associée (voir encadré page suivante), établissent la liste des produits nécessaires pour réaliser les expériences. Ils sont donc amenés à proposer leur propre protocole expérimental. À leur demande ou pas, le professeur vient tour à tour discuter avec les différents groupes pour notamment valider leur plan de travail. Une fois le sujet approuvé, ils vont voir Filip Decaster, le technicien responsable des « produits », pour vérifier si les substances choisies sont disponibles et peu dangereuses. Dans le cas contraire, ils doivent chercher d'autres produits pour réaliser leur projet, voire retravailler leur problématique. Ils sont ainsi fortement sensibilisés à la sécurité (remplacement de l'hexane par le cyclohexane, éthanol à la place du méthanol...), au risque et au fonctionnement du laboratoire (en étant capables de s'adapter en fonction des produits disponibles).

Avant de réaliser les différents spectres, les étudiants doivent commencer à rédiger leur rapport : problématique, hypothèse, produits utilisés pour valider l'hypothèse. Puis ils vont en salle d'analyse et réalisent les spectres IR, les analysent, les insèrent dans le rapport et concluent sur la validité de leur hypothèse.

Tous les projets et résultats des étudiants sont compilés et distribués à chacun sans modification de leur travail de la part du professeur. Ils disposent ainsi de « leur propre table IR ».

Bilan

Les étudiants se sont investis tout au long de cette séance. Au début, ils ne comprenaient pas vraiment ce qui

leur était demandé. Des étudiants ont même posé la question suivante : « Monsieur, à quoi cela servirait que je fasse les spectres par exemple d'une amine primaire et d'une amine secondaire puisque dans votre fascicule vous mettez ces spectres ? » En fait, dans le fascicule qui leur était fourni, les spectres IR n'étaient pas des spectres expérimentaux mais de simples dessins de spectres (dessins que l'on rencontre fréquemment dans les manuels scolaires ou dans les énoncés d'exercices). Ce genre de remarque permet d'expliquer la démarche du scientifique, l'importance de la vérification de ce que l'on dit ou de ce que l'on propose. Chaque groupe a cherché un sujet, se l'est approprié, l'a formulé, a choisi des produits. Une nouvelle difficulté, liée à l'aspect pratique, est apparue :

- Quel(s) produit(s) choisir ? (« demander un alcool » au technicien est trop imprécis). Les étudiants doivent donc préciser leur choix en cherchant à le justifier.

- Quel(s) critère(s) pour faire un choix (type de structure, dangerosité, coût, disponibilité, état physique...)?

Ce TP a également permis de faire prendre conscience aux étudiants de l'aspect sécurité associé aux différents produits, en changeant d'approche (faire choisir aux étudiants leurs propres produits) ou en leur demandant de préciser eux-mêmes les conditions de sécurité à respecter obligatoirement avant la manipulation, après avoir vérifié les dangers associés à chacun des produits mis en jeu. Ils remplacent spontanément le produit dangereux par une autre substance présentant moins de risque : ils enrichissent ainsi leur culture sur les substances chimiques et acquièrent l'habitude de remplacer un solvant par un autre en fonction des dangers tant pour la personne que pour l'environnement.

Au cours de la réalisation des spectres, certains ont l'idée de faire des superpositions, des zooms, etc. : les étudiants ont fait preuve d'un degré d'implication impressionnant.

Quelques exemples de projets proposés par les étudiants



Dépôt sur pastille NaCl à l'aide d'une micropipette.

Placement des pastilles sur le support de la FTIR.

Utilisation d'un bloc ATR (réflexion totale atténuée) pour l'analyse d'un solide.

- Vérification de la loi de Hooke.
- Peut-on mettre en évidence des diastéréoisomères grâce à la spectroscopie IR ?
- Comment se comporte en IR une même liaison (ici O-H) dans des composés différents : alcool, acide carboxylique ?
- Influence d'une double liaison C=C conjuguée sur la liaison C=O.
- Influence de la liaison hydrogène sur la bande de la liaison O-H.
- Peut-on mettre en évidence des régioisomères grâce à la spectroscopie IR ?
- Y a-t-il une influence du squelette sur la vibration de la liaison O-H (propanol, butanol, cyclohexanol) ?
- Est-ce qu'une double liaison C=C a le même nombre d'onde qu'une liaison C=C aromatique ?
- La spectroscopie IR permet-elle de suivre l'évolution d'une transformation chimique ?
- Peut-on distinguer des amines primaires et secondaires ?
- La spectroscopie IR permet-elle de distinguer deux molécules dont les chaînes carbonées sont différentes mais portant le même groupe fonctionnel : pentanol et cyclohexanol ?

C'était **leur** projet, ce qui les a incités à s'impliquer davantage dans la réalisation expérimentale et dans l'exploitation.

Vous trouverez en annexes sur le site de *L'Actualité Chimique*⁽⁴⁾ quelques exemples de comptes rendus d'étudiants. Ils ont été photocopiés en l'état pour l'ensemble de la classe. Bien sûr, il y a certaines imperfections : contenu scientifique, interprétation des analyses, choix du vocabulaire scientifique, fautes d'orthographe, maladresse dans l'interprétation.

Il est clair que l'on peut se poser la question suivante : pourquoi distribuer à l'ensemble de la classe des comptes rendus imparfaits plutôt que la correction de ces mêmes comptes rendus ? L'objectif est de montrer aux étudiants qu'ils sont capables de mettre en œuvre une démarche scientifique pour résoudre un problème (ce dont leur rapport témoigne). En conséquence, on a cherché à valoriser leur travail tant de recherche bibliographique qu'expérimental plutôt que d'insister sur le vocabulaire ou la rédaction. Pour autant, ces comptes rendus montrent bien que, malgré un langage de temps en temps approximatif, les objectifs d'appropriation du problème et de sa résolution expérimentale ont été atteints.

En prolongement, rien n'empêche de reprendre sous forme d'exercices ces différents comptes rendus, avec cette fois comme objectifs la qualité de la rédaction et la justesse du vocabulaire...

Conclusion

L'un des intérêts de la démarche d'investigation réside dans le rapprochement entre le travail expérimental réalisé par l'étudiant et, toutes proportions gardées, celui effectué par un chercheur dans son laboratoire. Il s'agit d'une activité basée sur la créativité et l'inventivité, domaines dans lesquels les jeunes peuvent exceller, pour peu qu'on les y invite. Le rôle de l'enseignant est de canaliser leur dynamisme, voire l'effervescence engendrée, et de faire rentrer les conclusions de la séance d'investigation dans le cadre formel des acquis scientifiques. Notons que cette démarche permet d'initier la mise en place d'un cahier de laboratoire dans lequel l'étudiant consigne ses idées, ses essais, ses résultats, ses réussites comme ses échecs. La mise en place de telles séances pose la question de l'aménagement des salles de TP. En effet, celles-ci devront permettre à l'étudiant :

- de pouvoir rechercher aisément l'information, tant dans les livres que sur Internet. On peut donc imaginer une petite bibliothèque dans la salle : livres d'expériences, de données (« handbook », *Merck Index*, catalogues de produits chimiques, fiches de sécurité, données spectroscopiques...);
- d'utiliser en libre service des logiciels de simulation, des tableurs...;
- de disposer de pièces de verrerie, de produits chimiques, de rack de matériel, de tests, etc.

Bien sûr, tout ceci est à adapter en fonction du niveau...

Finalement, la démarche d'investigation (DI), c'est quoi ? : on construit des scénarios, on défriche des situations complexes, on réfléchit sur des concepts et on utilise des techniques ; on met au point des analyses, on réfléchit et on met au point des protocoles.

Toutefois, il ne faudrait pas imaginer que la DI est exclusive. Cette démarche permet de construire des connaissances ou de les consolider. Les résultats obtenus dans le cadre de séances d'investigation doivent être mis à profit dans des séances plus traditionnelles, et à des moments qui peuvent être très divers : en introduction d'une notion, en plein milieu de cours, en conclusion d'un cours...

Avant ou après les séances de DI, suivant que celles-ci sont proposées en introduction ou en conclusion, les connaissances scientifiques doivent être replacées dans le cadre d'un enseignement scientifique déductif avec une mise en forme plus « académique ».

Remerciements

Les auteurs remercient Filip Decaster et Franck Xavier pour leur aide précieuse à la mise en œuvre et à l'encadrement de ce TP, ainsi que l'ensemble des étudiants de la classe PC, année 2008-2009, qui ont participé à ces projets ou séances expérimentales quelquefois déstabilisantes, souvent différentes de ce qu'ils ont pu connaître pendant leur scolarité, mais qui se sont toujours déroulées dans le sérieux et la bonne humeur et avec beaucoup d'enthousiasme et de dynamisme.

Notes

- (1) Voir l'article « Un TP de chimie analytique en séquence d'investigation », *L'Act. Chim.*, **2009**, 333, p. 42.
- (2) Pour plus de détails, consulter le rapport de l'Inspection générale de l'Éducation nationale *Les livrets de compétences : nouveaux outils pour l'évaluation des acquis* (Rapport n° 2007-048, juin 2007), disponible sur

le site du Ministère de l'Éducation nationale, et l'ouvrage de M. Ruffenach et D. Courtilot, *Enseigner les sciences physiques - L'enseignement par compétences*, Bordas, 2009.

- (3) <http://eduscol.education.fr>
 (4) Annexes téléchargeables librement en format pdf sur www.lactualitechimique.org (page liée à l'article dans le sommaire du numéro).

Bibliographie

- Lechtanski V.L., *Inquiry-Based Experiments in Chemistry*, ACS Publication, 2000.
- Gallagher-Bolos J.A., Smithenry D.W., *Teaching Inquiry-Based Chemistry: Creating Student-Led Scientific Communities*, Heinemann, 2004.
- Ruffenach M., Courtilot D., *Enseigner les sciences physiques*, Tomes 1 et 2, Bordas, 2004 et 2006.
- Ruffenach M., Courtilot D., *Enseigner les sciences physiques, l'enseignement par compétences*, Bordas, 2009.
- *Le Bup*, numéro spécial « Démarche d'investigation au collège », 886, juillet/août-sept. 2006.
- Faire des sciences physiques et chimiques, *Les cahiers pédagogiques*, 469, E. Chevigny (coord.), 2009.
- Bataille X., Beauvineau E., Cheymol N. Mas V., Vigneron M., Un TP de chimie analytique en séquence d'investigation, *L'Act. Chim.*, 2009, 333, p. 42.

Webographie

- www.educnet.gouv.fr/rmchimie : site de ressources nationales de chimie. Depuis mars 2009, ce site hébergé sur Educnet propose une rubrique « Démarche investigation » dans laquelle vous pouvez proposer vos contributions.



X. Bataille



E. Beauvineau



N. Cheymol



V. Mas



M. Vigneron

Xavier Bataille et Erwan Beauvineau sont professeurs agrégés en BTS chimiste, et Nicolas Cheymol (*auteur correspondant*) est professeur de chaire supérieure en classes préparatoires aux grandes écoles, option PC, à l'École Nationale de Chimie, Physique et Biologie (ENCPB)*.

Vincent Mas est professeur au lycée Arago à Perpignan.

Michel Vigneron est Inspecteur d'académie – Inspecteur pédagogique régional (IA-IPR) dans l'Académie de Versailles.

* ENCPB, 11 rue Pirandello, 75013 Paris.
 Courriel : cheymol.n@aliceadsl.fr

Eplanning

Solution



La solution professionnelle de gestion de ressources

- 🕒 **Optimisez, gérez, planifiez**
 Eplanning-solution est une **solution complète de planification** qui permet, avec un simple navigateur web, de réserver des créneaux horaires pour l'utilisation d'appareils, de salles, de véhicules ou toute autre **ressource dont l'utilisation nécessite une organisation planifiée**.
- Simple à utiliser et entièrement paramétrable**, Eplanning-Solution permet de gérer et d'optimiser au mieux l'utilisation de ressources partagées.
- 📄 **Pour plus d'information ou pour tester gratuitement Eplanning-solution :**

www.eplanning-solution.com
Tél : 0 380 609 800 Email : info@systalium.com

