

Un laboratoire pédagogique à grande échelle

Les ateliers bidisciplinaires

Résumé Un enseignement bidisciplinaire obligatoire a été mis en place en première année de licence, basé sur la réalisation en petits groupes de projets en autonomie partielle. Ces « ateliers » sont centrés sur l'acquisition des compétences liées à l'initiation à la recherche : auto-apprentissage, construction et mise en place d'une démarche d'investigation scientifique, présentation des résultats et justification/défense des choix et conclusions présentées. L'approche bidisciplinaire encourage l'étudiant à s'approprier les langages et problématiques propres aux deux disciplines et à établir des liens entre les différentes notions abordées. Le format de l'enseignement, en petits groupes sur des thématiques différentes au choix des enseignants, a permis le développement d'expériences pédagogiques impossibles dans le cadre des enseignements disciplinaires ou méthodologiques classiques.

Mots-clés **Activités expérimentales, bidisciplinarité, compétences transversales, autonomie.**

Abstract **Large-scale educational laboratories: a bi-disciplinary approach**

Compulsory bi-disciplinary teaching was introduced in the first year of the "license" degree, based on the implementation of partially autonomous projects. These "workshops" aim at initiating students to research in order to develop transversal skills such as self-learning, scientific investigation, results analysis and defending conclusions. The bi-disciplinary approach encourages the student to take ownership of the issues and vocabulary specific to both disciplines, and to establish links between the different concepts covered. Teaching is taking place in small groups, each of them associated to a different theme chosen by the teachers. It allows the development of pedagogical experiences that would have been impossible within the framework of classical disciplinary or methodological mass-teaching.

Keywords **Experimental activities, bi-disciplinarity, transversal skills, autonomy.**

Dans le cadre de la réforme du cycle Licence de l'Université Pierre et Marie Curie (Sorbonne Université depuis janvier 2018) et de la mise en place à grande échelle d'un système de type Majeure-Mineure [1], un enseignement bidisciplinaire obligatoire visant à renforcer la capacité d'auto-apprentissage des étudiants et à développer leur démarche d'investigation et de raisonnement a été mis en place durant l'année 2013 pour la totalité de la promotion de première année de licence [2]. L'objectif de cet enseignement, librement inspiré des méthodes d'apprentissage par projets ou par problèmes, est d'initier ce public à la démarche scientifique de recherche [3]. Fondés sur une moitié de travail personnel et sur une part importante de tutorat, réalisés en petits groupes, avec de grandes libertés de contenu et de format offertes aux enseignants, ces « ateliers de recherche encadrée » se sont transformés en autant de « laboratoires pédagogiques » qu'il y avait de groupes. Quelques leçons et expériences tirées des activités expérimentales développées pour six de ces ateliers, mettant tous en jeu la chimie, sont présentées ici.

Quand l'étudiant fait le lien

Le positionnement des projets ou problèmes mis en place est volontairement bidisciplinaire. Les équipes enseignantes sont formées de binômes de disciplines différentes, chaque enseignant intervenant dans son domaine de spécialité pour délivrer connaissances et compétences aux étudiants dans le cadre d'une thématique interdisciplinaire, allant de sujet d'intérêt général (ex : communication) à des problèmes de pointe en recherche (ex : nanoparticules). Chaque discipline développe le contenu pédagogique avec le langage et les exigences qui lui sont propres, aucune ne se positionnant

comme un « outil » pour l'autre discipline. Par exemple, alors que les mathématiques sont le plus souvent considérées comme un outil pour la résolution des équations de cinétique chimique, leur introduction par un mathématicien dans le cadre de l'atelier « réactions oscillantes » offre un éclairage différent sur les systèmes d'équations couplées et les points stationnaires, notamment en introduisant les portraits de phase et d'attracteur [4-5]. En ce sens, l'approche bidisciplinaire qui est appliquée ici est fondamentalement différente d'une approche classique interdisciplinaire qui nécessite préalablement à l'enseignement un travail conséquent fait par les enseignants de mutualisation des concepts et des approches.

En revanche, dans notre cas bidisciplinaire, c'est le groupe d'étudiants qui doit réaliser « le lien » entre les deux disciplines, ce qui les place en position d'intermédiaires de communication entre les deux enseignants. Prenons le cas de l'atelier « chimie-informatique » décrit dans l'encadré 1, des problématiques fondamentales des deux disciplines (caractéristiques des nombres quantiques [6] pour la chimie et typage de variables pour l'informatique [7]) sont abordées séparément par chacun des enseignants. Néanmoins, la réalisation du projet final nécessite la maîtrise de ces deux notions par les étudiants. Une dynamique de groupe se met alors en place, avec une répartition des rôles au sein du groupe d'étudiants amenant chacun d'entre eux à réfléchir sur ses propres compétences et aspirations à la lumière des compétences et aspirations des autres membres.

Cet exercice à l'interface entre deux disciplines et deux enseignants est l'un des objectifs pédagogiques poursuivi dans cet enseignement, et certainement son aspect le plus difficile pour les étudiants. C'est en revanche une position de confort pour l'enseignant qui lui permet en outre de renforcer la rigueur

Les hydrogénoïdes, atelier informatique (H. Chevreau) – chimie (F. Fuster)

Des introductions à la structure de l'atome et à la classification périodique (pour la chimie) et à des fonctions de base de Linux (création de répertoire, listage des fichiers, etc.) sont tout d'abord réalisées.

Ces notions de base sont ensuite utilisées pour calculer l'énergie de l'électron dans des systèmes hydrogénoïdes [6], cations monoatomiques ne possédant qu'un seul électron comme l'hydrogène. Ces énergies permettent de calculer/approximer les énergies d'ionisation, les différentes transitions entre les niveaux d'énergie qui constituent le spectre d'émission de ces espèces, ainsi que les longueurs d'onde associées.

Ces valeurs sont obtenues en suivant les étapes ci-après :

- *Étape 1 – Chimie* : une recherche bibliographique est demandée aux étudiants afin de résumer, sous forme de fiches de cours, les différentes notions abordées. Des exemples applicatifs simples sont ensuite proposés par l'enseignant.

- *Étape 2 – Informatique* : la réalisation par l'étudiant d'exercices simples lui permet de se familiariser avec le langage de programmation (Fortran) tout en testant son programme directement sur ordinateur (autoévaluation) [7]. L'enseignant en informatique vérifie la validité du programme et intervient lors de la compilation (traduction du programme en langage machine).

- *Étape 3* : le projet est réalisé et évalué dans le cadre d'un rapport écrit et à l'oral. Sa réalisation nécessite une attention particulière au typage des variables (nombre entier vs. nombre réel) qui joue un rôle essentiel dans ce cadre. Par exemple, lorsqu'une propriété chimique nécessite la réalisation de division de deux entiers, le résultat obtenu sera tronqué si la transformation de ces entiers en nombre réel n'est pas réalisée correctement. Un autre exemple d'échange entre chimie et informatique réside dans la vérification de la validité chimique des variables entrées par l'utilisateur : le nombre quantique principal n doit être un entier non nul, l'énergie d'ionisation doit être toujours positive...

scientifique de son discours. L'enseignant n'est en effet pas contraint, durant la période d'enseignement qui lui est dévolu, d'introduire des notions ou de répondre à des questions concernant une discipline dont il n'est pas expert. Il doit, pour « jouer le jeu », renvoyer le groupe d'étudiants vers son collègue de la discipline en question. Qui a enseigné en chimie la cinétique imagine aisément le confort de pouvoir renvoyer les étudiants vers un mathématicien à chaque fois qu'il faut intégrer une équation différentielle ! Ainsi, l'« écart » entre les deux disciplines – bien évidemment partiellement artificiel : c'est parce que chaque enseignant possède suffisamment de compréhension de la discipline de l'autre que le projet a pu être monté ! – doit être comblé par le groupe d'étudiants, dégageant ainsi aux enseignants une marge de manœuvre pédagogique leur permettant d'adapter l'activité au niveau du groupe d'étudiants.

Il est possible d'illustrer cette démarche sur l'exemple de l'atelier « chimie-français ». Dans cet atelier, les étudiants doivent présenter un sujet (scientifique dans un cas, d'actualité dans un autre) de façon pédagogique et élégante, sans rien perdre en rigueur scientifique. Cette présentation se fait sous l'œil de la caméra, à la fois moteur de leur élan et témoin de leur progression. Ils sont conseillés dans cet exercice par leur enseignant de français sur l'art de communiquer et par leur enseignant de chimie sur les aspects scientifiques. Ils doivent donc arriver finalement à se faire comprendre par l'enseignant de

français sans se faire reprendre par leur enseignant de chimie. En réalité, les deux compétences ne sont opposées qu'en apparence, puisqu'elles sont toutes deux nécessaires à la transmission d'un message exact, qualité requise bien au-delà des deux seules disciplines mises en avant dans la thématique.

Au-delà des connaissances : les comportements, savoir-être et compétences

Cette « expérience de communication filmée » illustre que l'aspect « expérimental » des ateliers s'entend au sens large puisqu'il englobe, au-delà de l'aspect manipulation, des expériences numériques, voire conceptuelles. L'autre objectif associé à cet enseignement est l'apprentissage de la démarche scientifique par la mise en œuvre autonome et encadrée de ses différentes étapes : formulation d'une hypothèse, construction d'un protocole opératoire (qui devra lui aussi être compris au sens large), réalisation de l'expérience, collecte et traitement des données, puis analyse, synthèse et discussion des résultats, et ce pour des thématiques variées, comme l'illustrent les exemples fournis dans les quatre encadrés. C'est la part « recherche » de l'enseignement qui est mise en avant ici et qui joue un rôle essentiel dans l'organisation de certains ateliers. C'est le cas pour « la matière à l'échelle nanométrique » : la synthèse des nanoparticules [8] et leur caractérisation par spectroscopie de photoélectrons (XPS) [9] sont faites dans les laboratoires de recherche de l'université [10]. Il ne faut néanmoins pas tomber ici dans la démagogie. L'hétérogénéité du public de la première année de licence générale (non sélective) interdit d'envisager une formulation du projet de recherche conduisant les étudiants, après un temps plus ou moins long, et plus ou moins d'aide, à aboutir directement à un résultat... à moins d'accepter le risque, au final, d'évaluer dans certains cas le travail de l'enseignant plus que celui de l'étudiant.

Il est donc nécessaire de « tronçonner » le projet en étapes, évaluées séparément et pour lesquelles une correction complète (qui pourra prendre des formes aussi variées qu'un protocole, un programme-type, un produit de réaction, un plan d'expérience...) sera fournie pour permettre à l'étudiant, quel que soit son résultat sur une étape, de repartir sur de bonnes bases pour l'étape suivante. Ceci est mis en évidence par le découpage en séquences décrit dans les exemples fournis dans les encadrés. Ce séquençage est en outre propice à une approche bidisciplinaire, permettant une alternance de disciplines en fonction des étapes, utilisant à chaque moment les compétences de chacun pour résoudre le problème rencontré. Ainsi, la compréhension de l'apport que chaque discipline met à disposition de l'autre et gagne de l'autre est renforcée par ce cadencement.

Réalisé en petits groupes autonomes (de 32, dédoublés pour les séances pratiques, et répartis en « équipes » pour les projets) et à grande échelle (dispensé à 1 500 étudiants environ chaque année), cet enseignement a donné naissance à une quarantaine de thèmes bidisciplinaires. Modulable et extrêmement adaptable aux aléas divers (groupe, contraintes d'emploi du temps, de matériel...), il a conduit nombre d'enseignants à tester des pratiques pédagogiques qu'il aurait été très difficile d'expérimenter dans le cadre des enseignements « classiques ». Ainsi, 66 % des enseignants sondés à l'issue de sa première année de mise en place avaient déjà introduit des méthodes pédagogiques particulières dans le cadre de cet enseignement. Citons par exemple l'atelier

Modélisation des réactions oscillantes, atelier mathématiques (S.M. Kaber) – chimie (H. Gérard)

Des introductions sur les équations différentielles non linéaires et couplées, l'utilisation des fonctionnalités de Scilab [11] (dont la résolution numérique d'équations différentielles couplées et les fonctionnalités de traitement de données et tracé de courbes) et les lois cinétiques des réactions élémentaires et des mécanismes réactionnels sont fournies en amont de l'étude.

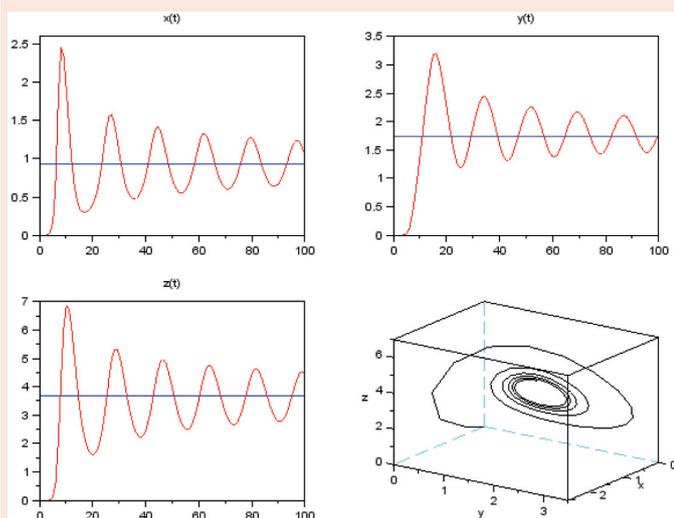
Ces bases sont ensuite utilisées pour étudier numériquement puis analyser le comportement chimique du système de réactions élémentaires dénommé « Orégonator » [4], qui a été mis en place, à partir des données expérimentales, pour décrire le comportement des réactions oscillantes de Belousov-Zabotinsky :

- (1) $A + Y \rightarrow X$
- (2) $X + Y \rightarrow D$
- (3) $B + X \rightarrow 2X + Z$
- (4) $2X \rightarrow E$
- (5) $Z \rightarrow Y$

L'étude est organisée en plusieurs étapes :

- **Étape 1 – Chimie** : c'est la détermination de l'équation-bilan, des réactifs, des produits et des intermédiaires. Puis en se plaçant à des concentrations en réactifs constantes (conditions entretenues), le système d'équations différentielles non linéaires dont les (trois) concentrations en intermédiaires sont solution est mis en place.

- **Étape 2 – Mathématiques** : les équations différentielles sont implémentées. Les états stationnaires (qui annulent les dérivées de concentrations des trois intermédiaires) sont déterminés (soit numériquement, soit analytiquement). Le tracé de courbes de concentrations oscillantes (qui peut être obtenu soit en utilisant des conditions initiales proposées par l'enseignant, soit en utilisant un petit déplacement par rapport à l'état stationnaire) est réalisé, de même que le portrait de phase (tracé à trois dimensions des concentrations des trois intermédiaires), ce qui conduit à la définition de cycles limites.

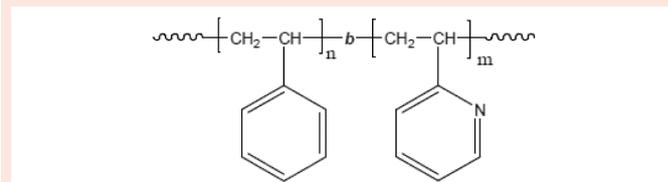


Exemple de tracés obtenus (cas d'oscillations amorties) : x , y et z sont les concentrations des trois intermédiaires, l'état stationnaire est représenté en bleu.

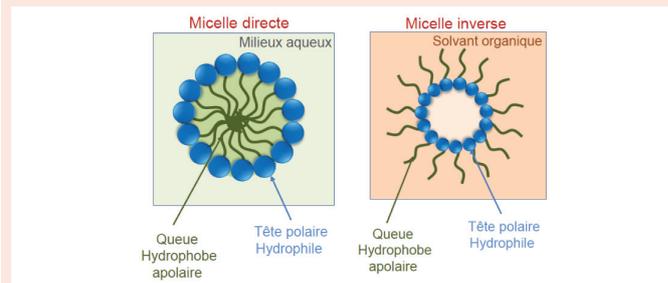
- **Étape 3 – Restitution dans le cadre d'une présentation orale** : l'évolution du comportement du système en fonction des paramètres de la réaction (constantes de vitesse, concentrations initiales) est étudiée et interprétée en faisant le lien avec le système chimique. Les termes d'amplitudes et de période, d'induction et d'oscillations amorties sont mis en pratique. L'importance de la boucle autocatalytique est mise en évidence.

La matière à l'échelle nanométrique, atelier physique (M. Chamarro) – chimie (A. Naïtabdi, F. Rochet)

Cet atelier permettra à l'étudiant de découvrir l'univers « nano » à travers l'élaboration de nanoparticules métalliques à taille et à forme contrôlées et l'utilisation des outils de recherche parmi les plus avancés pour leur caractérisation : microscopie électronique à balayage, spectroscopie de photoémission induite par rayons X. La synthèse de nanoparticules métalliques d'intérêt catalytique est réalisée par la méthode des micelles inverses issues de copolymères à blocs poly(styrène-*b*-2-vinyl pyridine) :

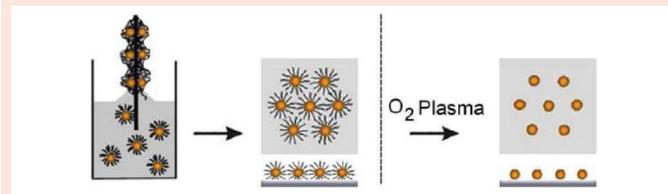


Cette méthode permettra de fabriquer des nanoparticules métalliques de taille et de forme prédéfinies et contrôlables à façon [12].
- **Étape 1** : la solution des micelles inverses est obtenue en tenant compte des propriétés de solubilité du copolymère poly(styrène-*b*-2-vinyl pyridine), en particulier celle de chaque monomère. Le choix d'un solvant apolaire permettra d'obtenir ces micelles. Le rôle stabilisateur et réducteur du polymère est étudié.



- **Étape 2** : les micelles inverses préparées dans l'étape 1 sont chargées par les précurseurs correspondant aux nanoparticules métalliques à fabriquer. Cette étape est réalisée dans une boîte à gants sous atmosphère contrôlée à taux d'humidité très faible.

- **Étape 3** : les micelles chargées seront ensuite déposées sur des surfaces planes par une méthode de trempage (« dip-coating »). Un processus d'auto-assemblage permet aux micelles chargées de former des réseaux ordonnés suivant un arrangement hexagonal. La formation des nanoparticules est obtenue par exposition à un traitement par plasma d'oxygène. Ce dernier permet l'élimination complète des groupes polymères sans altération de forme des nanoparticules.



- **Étape 4** : l'étude structurale de nanoparticules est réalisée à travers des caractérisations par microscopie électronique à balayage en salle blanche. Une étude statistique (histogramme, écart type) sur la taille et la distance entre les nanoparticules permet de vérifier la qualité de la synthèse.

- **Étape 5** : la caractérisation de la nature chimique des nanoparticules et de leur état d'oxydation est obtenue par spectroscopie de photoémission induite par rayons X en ultrahaut vide [9].

Encadré 4

Jeux sérieux, atelier informatique (M. Muratet, S. Stinckwich) – chimie (R. Vuilleumier, M.-C. Horny)

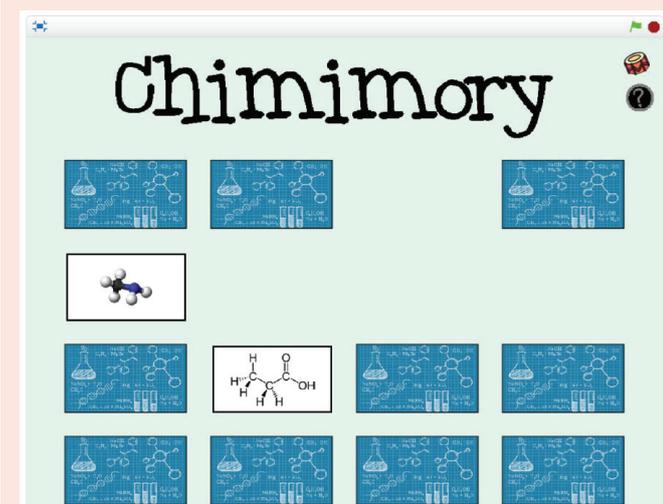
Une introduction aux jeux sérieux (« serious game »), méthode d'apprentissage à travers des jeux (scénario, but etc.) et à la programmation sous scratch (langage de programmation visuel développé par le MIT [13]) est réalisée. Le projet proposé aux étudiants est alors de développer un jeu sérieux pour enseigner une notion de chimie de leur choix à des élèves de niveau collège ou lycée. Les étudiants doivent développer un jeu fonctionnel et un manuel expliquant à la fois son utilisation et la notion de chimie qui y est abordée.

- *Étape 1* : les étudiants sont invités à imaginer des jeux permettant de remplir les cases d'un tableau à deux entrées, faisant figurer d'une part des notions de chimie (acides-bases, oxydoréduction, modèle de Lewis, ajustage d'équation de réaction...) et de l'autre des scénarios de jeux classiques (jeux de rôles, escape game, jeux de cartes, casse-briques...). Chaque groupe choisit alors un couple notion/type de jeux et développe un premier scénario.

- *Étape 2* : les propositions de jeux sont discutées individuellement avec les enseignants de chimie, les étudiants exposant la notion de chimie abordée dans le jeu ainsi que comment celle-ci est représentée. Un point essentiel à la fin de cette étape est que le scénario proposé doit être tel que des connaissances en chimie soient nécessaires pour réussir à terminer le jeu.

- *Étape 3* : le jeu est développé en langage scratch. Cette étape comporte d'une part le développement d'un squelette jouable et d'autre part la définition d'un contenu chimique (choix de molécules, réactions, questions...). Les étudiants sont aussi invités à développer le graphisme de leur jeu.

Par exemple, en 2015-2016, un groupe d'étudiants a proposé un jeu de « Chimimory » basé sur le principe du Memory [14] ; seize cartes sont retournées et on doit découvrir des couples de cartes représentant la même molécule. La difficulté du jeu tient en ce que les molécules sont, pour chaque couple, dans des représentations différentes : nom, formule brute, semi-développée, modèle de Lewis, représentation de Cram. Les étudiants ont défini un jeu de seize molécules avec cinq représentations différentes (80 cartes possibles).



« jeux sérieux » (encadré 4), qui a conduit l'enseignant de chimie et son groupe à développer de nouveaux outils d'apprentissage.

Qu'en a-t-il été pour les étudiants ? Ces ateliers sont ressortis des sondages réalisés à l'issue de la première année de fonctionnement comme intéressants et utiles (intéressants pour 77 % des étudiants ayant répondu au sondage, utiles pour

63 % d'entre eux, mais pour 80 % des enseignants), alors même qu'ils n'avaient pas pu choisir la thématique de l'atelier qu'ils avaient suivi (pour 59 % d'entre eux). Ceci confirme l'objectif initial de cette expérience pédagogique : l'apport majeur d'un enseignement bidisciplinaire n'est ni dans les connaissances qu'il apporte ni dans les thématiques qu'il aborde, mais dans les comportements, savoir-être et compétences transversales qu'il permet de développer.

Notes et références

[1] La mise en place de la réforme Majeure-Mineure à l'UPMC a été mise en place entre 2013 et 2016 et a permis l'accès à des parcours de formation mono- ou bi-disciplinaire au choix des 7 000 étudiants de licence. Toutes les combinaisons disciplinaires sont possibles, certains cursus permettant d'accéder à une double diplomation. C'est à notre connaissance la première fois que cette réforme est mise en place au niveau licence et à cette échelle en France, même si de nombreux parcours bidisciplinaires *spécifiques* existent dans d'autres établissements, le plus souvent au niveau master ou ingénieur, mais également au niveau licence avec les licences bidisciplinaires préparant aux masters MEEF (masters de l'enseignement, de l'éducation et de la formation) en physique-chimie ou biologie-géologie. En revanche, elle existe depuis longtemps à l'étranger, et des cursus de type majeure-mineure sont l'ossature des « undergraduate studies », par exemple à Harvard, UCLA, Shanghai Jiao Tong, Oxford, Cambridge, Heidelberg, Barcelone, etc. Pour plus d'information sur la licence Majeure-Mineure à Sorbonne Université : http://sciences.sorbonne-universite.fr/fr/formations/reforme_license.html

[2] La première année de licence à l'UPMC-Sorbonne Université est une année « d'intégration » pluridisciplinaire permettant une orientation progressive. Pour un descriptif plus complet de l'offre de formation sur cette année : <http://licence.premiereannee.sorbonne-universite.fr/fr/index.html>

[3] La pédagogie bidisciplinaire est très souvent à la base de la démarche « apprentissage par projet » telle qu'elle est pratiquée, le plus souvent au niveau ingénieur, comme par exemple à l'ESPCI. C'est aussi la base privilégiée des thèmes nationaux des travaux d'initiative personnelle encadrés (TIPE) pratiqués depuis 1997 dans les classes préparatoires aux grandes écoles.

[4] Noyes R.M., Field R.J., *Oscillatory chemical reactions*, *Annu. Rev. Phys. Chem.*, **1974**, 25, p. 95 et réf. dans le texte.

[5] Petitgirard L., *Le chaos : des questions théoriques aux enjeux sociétaux*, Thèse de doctorat, Université Lumière Lyon 2, **2004**.

[6] Rivail J.-L., *Éléments de chimie quantique à l'usage des chimistes*, 2^e éd., InterÉditions/CNRS Éditions, **1994**, p. 75-92.

[7] Lignelet P., *Manuel complet du langage Fortran 90 et Fortran 95 - calcul intensif et génie logiciel*, Masson, **1996**.

[8] Roldan-Cuenya B., Naitabdi A., *Method for forming thermally stable nanoparticles on supports*, Brevet US No. 8,513,158 B2, **2013**.

[9] Carlson T.A., *Photoelectron and Auger Spectroscopy*, D. Hercules, Springer, **1975** ; Alford T.L., Feldman L.C., Mayer J.W., *Fundamentals of Nanoscale Film Analysis*, Springer, **2007**, p. 199-213.

[10] Dans ce cas particulier, il s'agit du Laboratoire de Chimie Physique Matière et Rayonnement (LCPMR, UMR 7614). Plusieurs laboratoires de recherche ont eu l'occasion d'accueillir des étudiants dans le cadre de ces ateliers.

[11] <https://www.scilab.org/index.php/fr/scilab/about>

[12] Kästle G. *et al.*, *Micellar nanoreactors: preparation and characterization of hexagonally ordered arrays of metallic nanodots*, *Adv. Funct. Mat.*, **2003**, 13, p. 853.

[13] <https://scratch.mit.edu>

[14] Projet réalisé par Pablo Mas, Cyprien Chapelle, Marisa Dos Santos Neves et Émiline Gade, <https://scratch.mit.edu/projects/156031819>

Fabrice CHEMLA, professeur, **Franck FUSTER**, maître de conférences, **Hélène GÉRARD***, professeure, **Alexis MARKOVITS**, professeur, **Ahmed NAITABDI**, maître de conférences, et **Rodolphe VUILLEUMIER**, professeur, à Sorbonne Université, Faculté des Sciences et Ingénierie, UFR de Chimie (UFR 926), 75005 Paris, France.

* helene.gerard@sorbonne-universite.fr