

La chaire de développement durable à CPE Lyon

Un hybride dans la complexité

Résumé La chaire de développement durable de l'École Supérieure de Chimie Physique Électronique de Lyon (CPE Lyon), structure les actions de l'école sur ce sujet. En fédérant plusieurs acteurs de l'école (la direction, l'enseignement, les élèves, le service communication et relations entreprises, les achats, les services techniques, la recherche...), la chaire, créée en 2009 avec l'aide de Dow Chemical, contribue à donner une cohérence et une dynamique d'ensemble à toutes les initiatives diffuses présentes dans les différents services. Elle aide au partage d'informations, à la création d'un cadre d'analyse commune et à la prise de décisions collectives qui ont un impact, entre autres, sur les enseignements, les sujets de recherche, les chantiers des services techniques. Cet article détaille en particulier les efforts conduits dans les laboratoires de troisième et quatrième année dans le domaine de la chimie verte et de la sécurité au travail pour élèves et enseignants.

Mots-clés Développement durable, CPE Lyon, chaire, enseignement, travaux pratiques, chimie verte.

Abstract The chair of sustainable development at CPE Lyon: an original experience in an engineering school, or a hybrid in complexity

The chair of sustainable development of the École Supérieure de Chimie Électronique de Lyon (CPE Lyon) structures the actions of the school around the subject. The chair, created in 2009 with the support of Dow Chemical, federates several actors of the school actively engaged in the area of sustainable development (the top management, the teachers, the pupils, the communication and business relations department, the technical services, the research laboratories...). It brings coherence and creates momentum around all the otherwise scattered initiatives present in the various departments of the school. The chair helps information sharing, building of a common analysis framework and collective decision-taking, which impact, among other areas, the curriculae, the research topics, the actions of the technical services. This article details the efforts made in the third- and fourth-year laboratories on subjects in line with the principle of green chemistry and ensuring safer practices for pupils and teachers.

Keywords Sustainable development, CPE Lyon, chair, practical work, green chemistry.

Une chaire... pour impulser la dynamique développement durable

CPE Lyon, école d'ingénieurs en chimie, génie des procédés et sciences du numérique, donne lieu à des associations étonnantes. Privée et publique, laïque et catholique, scientifique et humaniste, chimiste et informaticienne, intégrée et entrepreneuriale, autonome et en symbiose, cette école hybride est à part dans le paysage de l'enseignement supérieur français. Par exemple, tout en étant une école de statut associatif privé, labellisée en 2016 établissement d'enseignement supérieur privé d'intérêt général (EESPIG), CPE Lyon est associée par décret à l'Université Claude Bernard Lyon 1, grande université scientifique et médicale (voir encadré 1). Le cœur de CPE Lyon reste toutefois unique : former des ingénieurs au monde nouveau qui se crée chaque jour.

Chaire et collégialité : l'exemple n'est pas une façon d'enseigner, c'est la seule

La chaire de développement durable de CPE Lyon a été lancée en juin 2009, avec le soutien d'un grand groupe industriel, Dow Chemical, qui avait identifié dans l'école un partenaire stratégique pour ses recrutements. Dow Chemical voulait soutenir la démarche de l'école, qui souhaitait renforcer la cohérence des actions déjà présentes autour du développement durable au sein de l'établissement – certains enseignements, la sécurité dans les laboratoires de travaux pratiques, la gestion renforcée des déchets [1]. La mission de cette chaire est vite devenue de coordonner et d'impulser de nouvelles

actions permettant de former aux principes du développement durable les élèves ingénieurs, chimistes, électroniciens ou informaticiens.

Les défis auxquels les ingénieurs doivent faire face se sont complexifiés : économiser les ressources tout en contribuant au développement économique, satisfaire des parties prenantes plus nombreuses et exigeantes (clients, actionnaires, salariés, pouvoirs publics, riverains, associations...), combiner long terme et court terme, local et global. Il a donc été fait le choix d'appréhender l'école dans sa globalité : lieu de formation, l'école est aussi le lieu de travail de salariés ; elle est la tutelle de plusieurs laboratoires de recherche et est inscrite dans un écosystème académique et industriel.

Pour refléter cette collégialité, un comité de chaire présidé par le directeur de l'école, animé par la titulaire de chaire, et ouvert à tous les acteurs de l'école engagés dans la démarche, suit tous les aspects et définit les grands objectifs : élaboration des contenus pédagogiques, conception d'actions autour des bâtiments, organisation d'événements ouverts à la communauté scientifique de recherche académique et industrielle, relais de recherches fondamentales...

Sensibilisation à l'analyse de cycle de vie et nouvelles pratiques pédagogiques

Lorsqu'on lance une action globale de développement durable dans l'école, il paraît naturel que le premier terrain qui doit être investi soit l'enseignement, parce que la formation des ingénieurs est le cœur de la mission de l'établissement. Les enjeux du développement durable spécifiques

Encadré 1

CPE Lyon : quelques chiffres clés (données de 2017)



Formation

- 1 247 étudiants en cycle ingénieur
- 346 diplômés en 2017
- 440 étudiants en classes préparatoires associées CPE Lyon/Institution des Chartreux
- Un réseau de 8 500 diplômés en activité
- Un centre de formation continue avec plus de 3 000 stagiaires par an

Recherche

- 5 laboratoires associés CNRS et/ou UCB Lyon 1 regroupés en quatre départements
- 3 prix Nobel, 3 académiciens (science, technologie, agriculture)
- 500 enseignants-chercheurs et doctorants

International

- 110 universités partenaires réparties dans 25 pays
 - 3 mois à l'international obligatoire pour tous les élèves
 - 80 % des étudiants y passent au moins un an pendant leur formation
 - 17 % des diplômés exercent leur premier emploi à l'international
- * Domaine scientifique de la Doua, 43 bd du 11 Novembre 1918, 69100 Villeurbanne.

www.cpe.fr

efficace plutôt que sa déperdition, ainsi que le rôle accru que peuvent jouer la chimie et le génie des procédés pour le stockage, le transport et l'utilisation des énergies renouvelables [2], sous-tendent le choix d'ouvrir un nouveau module semi-optionnel de quatrième année centré en chimie et génie des procédés autour de la transition énergétique.

Un deuxième constat est que de nouveaux espaces d'apprentissage sont toutefois compatibles avec la stabilité des fondamentaux évoquée ci-dessus. Le déploiement complet de méthodes pédagogiques plus adaptées à la prise en compte des enjeux liés au développement durable requiert plusieurs années, mais aussi et surtout un cadre.

Le cadre « chimie verte »

Même si le concept de la chimie verte traverse l'enseignement et que des focus ont lieu au cours de conférences de spécialistes, des efforts récents se sont concentrés sur l'application des principes de la chimie verte (*encadré 2*) dans les enseignements pratiques. À CPE Lyon, les nombreux travaux pratiques (TP) sont l'occasion de mettre en place cette démarche, que ce soit pendant les 84 h de TP d'apprentissage des techniques de laboratoire en chimie organique ou lors des 136 h de projets au laboratoire que les élèves effectuent sur l'arc des deux premières années à l'école.

Le premier point est la maîtrise des risques, et en particulier du risque chimique. Plusieurs sociétés revendiquent que parmi les clés de leur réussite figurent la volonté présente à tous les niveaux de protéger les travailleurs et l'environnement, des systèmes de maîtrise des risques efficaces et la communication de cette attitude aux partenaires. L'entrée à CPE Lyon s'accompagne d'une formation sécurité (apprendre à lutter contre un incendie, cours sur les risques chimiques et électriques...). Si les élèves sont familiarisés avec la réglementation CLP (« classification, labelling, packaging »), qui fixe les règles quant à la classification, l'étiquetage et l'emballage de la plupart des produits chimiques, ils ont parfois du mal à distinguer plus finement les dangers auxquels ils sont exposés, et encore plus de mal à définir les mesures de protection,

Encadré 2

Les douze principes de la chimie verte*

1. Prévention : produire moins de déchets
2. Économie d'atomes (amélioration des synthèses)
- 3 et 4. Utiliser et créer des substances faiblement ou non toxiques
5. Supprimer l'utilisation de substances auxiliaires (solvants, agents de séparation, etc.); utiliser l'eau comme solvant, des fluides supercritiques, chauffer par micro-ondes, remplacer par des liquides ioniques, etc.
6. Minimiser les besoins énergétiques ; faire les synthèses à température et de pression ambiantes
7. Utiliser des matières premières renouvelables
8. Éviter toute déviation inutile du schéma de synthèse
9. Employer des réactifs catalytiques les plus sélectifs possibles
10. Préférer les produits chimiques conduisant à des produits de dégradation non nocifs
11. Utiliser des méthodologies analytiques pour surveiller et contrôler en temps réel l'apparition de substances dangereuses
12. Minimiser les risques d'accidents chimiques (rejets, explosions, incendies)

* Anastas P.T., Warner J.C., *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, 1998.

à la chimie, domaine d'intérêt pour cet article, se situent à plusieurs niveaux : celui de la molécule, celui des procédés, des étapes d'industrialisation et de commercialisation. L'un des objectifs est d'atteindre une « éco-efficacité » : réduire, réutiliser, recycler. Les champs d'études et d'actions sont larges.

La chaire a donc tout d'abord essayé d'identifier d'éventuelles lacunes (ou obsolescence) dans les enseignements en cours. Le premier constat était que la totalité des enseignements fondamentaux devait tout simplement continuer à être présente. Une possibilité d'amélioration touchant toutes les filières de l'école a pourtant été facile à identifier : sensibiliser les élèves à l'analyse de cycle de vie (ACV) ; cet outil, dont l'expansion et la normalisation ne sont que récentes, donne une méthode – la clé de voute du travail d'ingénieur – pour réaliser un bilan des impacts environnementaux liés aux biens ou aux services. Une sensibilisation à l'ACV est donc faite depuis 2010 à tous les élèves de CPE Lyon en tronc commun et en première année toutes filières confondues (chimie et procédés, sciences du numérique, informatique et réseaux). Une autre possibilité d'amélioration s'est dessinée dans le domaine de la transition énergétique : la centralité de l'énergie dans une démarche de développement durable, son utilisation

(collective et individuelle). Un système de fiches de poste permet à l'élève ingénieur de vérifier l'état du matériel qui lui est confié et de se préparer à évacuer ou à réagir en cas de problème. La fiche est vérifiée et validée par l'enseignant avant la manipulation des produits, par exemple lors de la vérification du montage. Elle donne lieu à une discussion, en essayant de se rapprocher du mode « classe inversée » après la première séance de démonstration. Le matériel endommagé peut aussi être changé sans s'exposer inutilement à des composés chimiques dangereux.

C'est en instillant cette plus grande autonomie que les élèves s'approprient plus solidement la démarche sécurité, qui s'appuie sur l'outil RAMPE – Reconnaître/identifier le danger, Avertir des dangers ou s'assurer que le risque sera maîtrisable, Minimiser les dangers (en les ayant identifiés), se Préparer en cas d'urgence, donc Estimer les protections adéquates, telles que les équipements de protection individuelle (EPI) – décrit dans de nombreux ouvrages de sécurité chimique [3]. La conception d'un TP spécifique axé sur la recherche bibliographique de données de sécurité, animé par des enseignants de trois disciplines (sciences analytiques, génie des procédés et chimie moléculaire) qui veillent aussi au suivi et à la tenue d'un registre lié à la sécurité en laboratoire, permet à l'élève de fournir un travail personnel rapide et efficace à partir des fiches de données de sécurité (FDS) ou des fiches toxicologiques de l'INRS avant le premier TP [4]. Cette démarche plus autonome, où les élèves fournissent un travail personnel bien en amont de la mise en pratique au laboratoire (plutôt que de lire des consignes déjà rédigées une fois dans la salle de TP) a été étendue à plusieurs autres TP [6]. Cette innovation pédagogique a ainsi permis une acquisition progressive de la compétence clé et cumulative qu'est la maîtrise de l'accès à l'information chimique, tout en assurant la formation à la maîtrise des risques dès l'entrée en laboratoire [4].

Choix des solvants

La réglementation française actuelle est claire dans l'industrie [5], exigeant le remplacement des composés classés cancérigènes, mutagènes ou reprotoxiques (CMR) et le mesurage de composés ayant des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) à court terme (VLCT). Les grandes entreprises du secteur chimie engagées dans une démarche hygiène, qualité, sécurité et environnement (HQSE), signataires d'accords de responsabilité sociétale (Arkema, Kem One, Solvay, pour n'en citer que trois), questionnent explicitement l'utilisation de solvants CMR dans leurs pratiques.

Comme pour la réfection des laboratoires, CPE Lyon s'attelle à dépasser l'utilisation de composés CMR ou très toxiques en enseignement. L'élève qui prépare le TP à venir selon ce principe se trouvera en présence du classement établi lors des tables rondes de la division chimie verte de l'ACS [6] avec les grandes entreprises du secteur de la pharmacie et sera aiguillé à choisir le solvant de ses expériences à venir en accord avec celui-ci (voir *tableau*).

Classement de solvants conseillés, basé sur les guides formulés par GSK, AstraZeneca et l'Institut de chimie verte de la Société américaine de chimie (ACS GCI) [6].

Catégorie	Solvants
Recommandé	
Entre recommandé et problématique	
Problématique	
Entre problématique et dangereux	
Dangereux	
Très dangereux	

Économie d'atomes et continuité dans les enseignements

Le principe de la chimie verte qui vise à réduire la production de déchets fait écho au concept d'économie circulaire [7], qui veut que, pour éviter un déchet, il faut trouver une voie qui lui donne de la valeur. Depuis 2014, certains produits préparés par les étudiants au cours de travaux pratiques de chimie organique en troisième année ne sont plus des déchets, puisqu'ils seront les réactifs de départ des travaux pratiques de quatrième année.

La *figure 1* indique trois exemples qui démontrent cette continuité dans les enseignements. Pour le premier, un chlorure tertiaire est préparé en troisième année, comme exemple des réactions de type S_N1 apprises en cours ; il sera utilisé lors des TP de cinétique en quatrième année (*figure 1A*). Cette réaction s'effectuant sans solvant, avec séparation des phases organiques et sur une échelle de 30 g par binôme pour des promotions d'environ 150 élèves, fait que 3 kg de déchets chlorés par an sont valorisés.

Pour le deuxième exemple, deux réactions successives seront réalisées en troisième et en quatrième années. Lors de la première séance d'apprentissage, la fonction cétone d'un β -céto

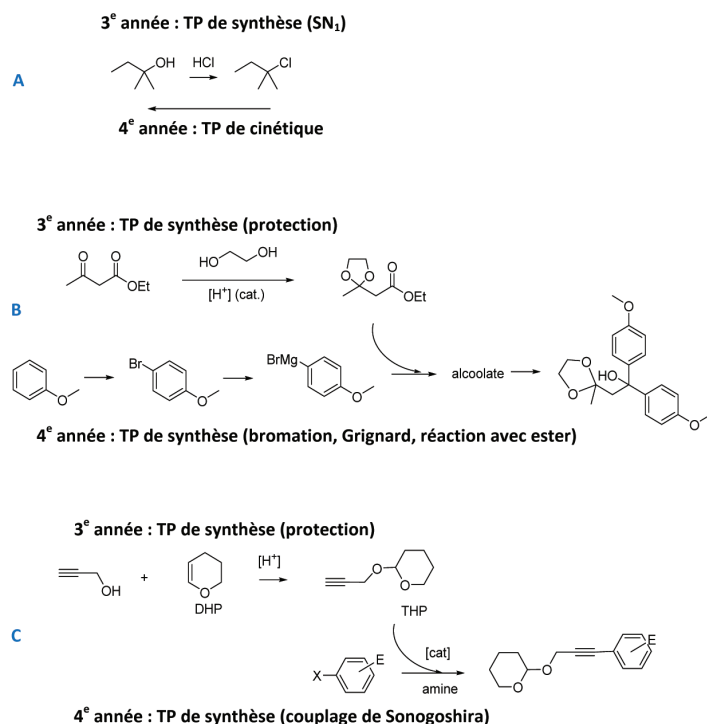


Figure 1 - Exemples de travaux pratiques mettant en œuvre une continuité dans les enseignements.

ester est protégée sélectivement en céta. L'année suivante, l'ester ainsi obtenu sera mis en réaction avec un organomagnésien (figure 1B). Cet exemple de réaction chimiosélective (via la protection peu « verte » de la fonction cétone et réaction sur la fonction ester) est conduite en 2-MeTHF anhydre, solvant répondant aux dernières préconisations de la chimie verte. Ce travail permet aussi aux élèves de discuter de l'efficacité de leur préparation, puisque l'analyse par spectroscopie infrarouge et par chromatographie sur couche mince du milieu réactionnel montre de nombreux sous-produits identifiants (anisole, 4-bromoanisole restant, ester qui n'a pas réagi, produits de déprotection...).

Pour le troisième exemple, l'alcool propargylique est protégé en acétal par le dihydropyrane (DHP) pour donner l'éther de tétrahydropyrane (THP). Pendant cette séance, qui se déroule en troisième année, les élèves apprennent à manipuler sous hotte et savent que le composé, distillé et stocké au froid, pourra être utilisé pour la séance de TP sur le couplage de Sonogashira de l'année suivante (voir figure 1C et ci-après).

Catalyse

Une partie importante du programme de chimie organique de quatrième année est consacrée aux couplages catalysés au palladium (formation de liaison C-C, réactions de Heck, Suzuki, Sonogashira...). L'étude de différents catalyseurs (sels de palladium ou complexes précurseurs, en présence ou pas de ligands ancillaires), de leur mise en œuvre (préformation du complexe ou pas) et du milieu réactionnel (souvent éthanol aqueux et carbonate) fait l'objet d'un projet de formation par la recherche qui mobilise les connaissances des élèves (cycle catalytique, réactivité) et leur permet d'étendre leurs connaissances en se confrontant à la littérature scientifique actuelle, tout en se rapprochant d'un enseignement par « classe inversée » où, en absence de consignes directives et de protocoles déjà établis, les élèves cherchent et choisissent, aidés par leur mentor, les protocoles qui leur semblent les plus adéquats à obtenir les molécules visées en essayant de respecter au mieux les principes de la chimie verte.

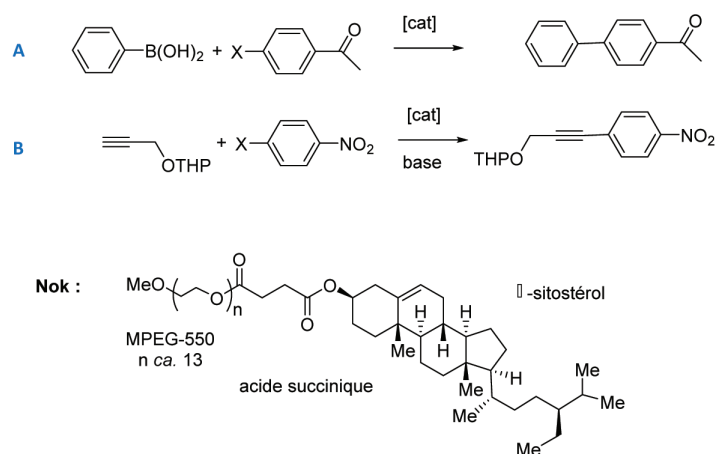


Figure 2 - Exemples de projets proposés en TP de chimie organique en quatrième année autour des couplages catalytiques au palladium. (A) Effectuer la réaction de Suzuki en milieu aqueux. (B) Remplacer la pipérazine, qui est un CMR, par une base plus adaptée aux principes de la chimie verte ; en bas : système « Nok » de Lipshultz [9] qui permet certains couplages C-C en milieu aqueux.

À titre d'exemple, une consigne a été de mettre en œuvre le couplage de Suzuki en milieu aqueux (figure 2A). L'état de l'art qui devrait guider les élèves, s'ils arrivent à localiser les références pertinentes, considère l'efficacité de milieu aqueux obtenu à partir de cendres de peaux de banane [8]. Un autre projet utilisé, pour former les étudiants en quatrième année, traite du couplage de Sonogashira entre un noyau aromatique halogéné et l'alcool propargylique protégé en acétal qui a été synthétisé l'année précédente (figure 1). La consigne est de remplacer la base décrite dans le protocole donné (pipérazine : toxique, CMR) par une autre base organique à choisir parmi des amines plus idoines – des défis peuvent être insérés dans la sélection : amines CMR, étiquettes sur flacons vides... – ou par une base inorganique (carbonate, hydroxyde...) (figure 2B). Les élèves qui auront accompli les recherches bibliographiques les plus pointues découvrent que ce couplage peut être mis en œuvre en milieu aqueux en s'appuyant sur la dernière génération de système amphiphile/surfactant à base de phytostérol, communément appelé système de type « Nok », développé par B.H. Lipshutz [9].

Utilisation de matières premières renouvelables en remplacement du carbone fossile

La formation d'oligomères d'acide lactique, utilisés pour préparer le lactide servant de prépolymère pour la fabrication de l'acide polylactique (PLA), matériau aux utilisations multiples (bobine de fil d'imprimante 3D, fil de suture résorbable en chirurgie...), illustre la difficulté de passer de la molécule au matériau et de la nécessité de renforcer les passerelles entre les enseignements en chimie moléculaire et en génie des procédés. La figure 3 résume le schéma réactionnel et procédé de production du PLA [10]. La conversion de l'acide lactique en oligomères a été mise en place dans le cadre de journées portes ouvertes et pendant des démonstrations auprès de lycéens. L'identification des fonctions chimiques est possible par spectroscopie infrarouge, avec une vision de la diminution de la quantité de fonction alcool et de la présence de fonction ester. Il est possible de discuter de spectre de résonance magnétique nucléaire (RMN) proton de ces composés avec des élèves de terminale S, pour donner un exemple d'application de la technique où l'augmentation de la viscosité observée rend la notion de macromolécule plus concrète.

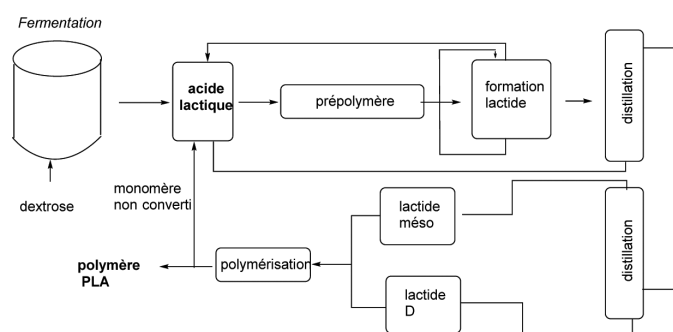
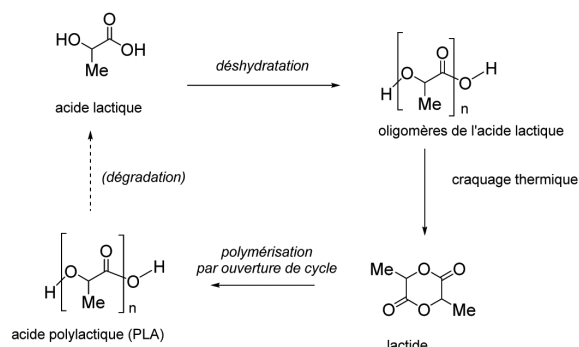


Figure 3 - Schéma réactionnel, qui peut en partie être mis en œuvre en milieu scolaire, et procédé complet de polymérisation de l'acide lactique pour l'obtention de l'acide poly lactique (PLA), un biopolymère (biosourcé et biodégradable).

Enseigner... mais aussi bâtir et innover

Si l'enseignement est la mission principale de l'école, une école est aussi un bâtiment, un lieu de travail de salariés et un lieu d'échanges avec son écosystème (fournisseurs, partenaires, ses parties prenantes au sens large).

La chaire s'est aussi attelée à diffuser cette culture du développement durable à travers des actions concrètes sur les bâtiments qui accueillent élèves et salariés, sur les pratiques qui font que l'école progresse (les achats, les procédures de ressources humaines, les modes de déplacement) et sur la recherche qui y est effectuée.

Les bâtiments

Une étude de la consommation énergétique du bâtiment a été conduite en 2010 ; les principales solutions économes en énergies mises en place suite au diagnostic sont résumées dans la figure 4.

Cette étude a notamment montré que la plus grande déperdition était liée à l'insufflation d'air de compensation, chauffé, lié à l'évacuation par chaque hotte de 900 m³/h d'air chaud intérieur. Ce travail a conduit à mettre en chantier une modification radicale du système d'extraction d'air dans les laboratoires, ce qui devrait permettre de diviser par trois la surconsommation de chauffage qui en découle ; de plus, une réduction de bruit, une possibilité de densification des manipulations, seront obtenues grâce à ces travaux. Progressivement, toutes les sorbonnes de l'école seront de type « à débit variable », qui limite le débit d'extraction lorsque la vitre de protection est abaissée, soit 90 % du temps.

Le bâtiment CPE, ses murs et ses infrastructures, est lui aussi un laboratoire en soi ; dans le cadre des énergies, plusieurs réalisations notables nous ont permis d'avancer.

Ainsi, il y a huit ans, avec le concours d'EDF, CPE Lyon a installé un système de production d'eau chaude solaire, combinant

cellule externe et pompe à chaleur, pour alimenter l'ensemble des consommateurs d'eau chaude – lavabos, douches (figure 4). Les panneaux solaires installés sur le toit de l'école ont été développés spécifiquement par la société et CPE Lyon a eu la primeur de cette installation en France. Leur particularité est d'être « bi-énergie ». En cas d'absence de soleil, au lieu d'être équipés d'un système de relais électrique classique énergivore, ces panneaux disposent d'une pompe à chaleur qui utilise les calories de l'air pour chauffer l'eau, ce qui a divisé par quatre la consommation électrique. Techniquement, l'appareil est un succès ; son impact reste néanmoins limité par la faible consommation d'eau chaude du site et son extension géographique. De même, l'eau de nombreuses manipulations et des toilettes est puisée dans la nappe phréatique, en remplacement de l'eau de ville, potable, qui a dans sa valeur beaucoup d'énergie.

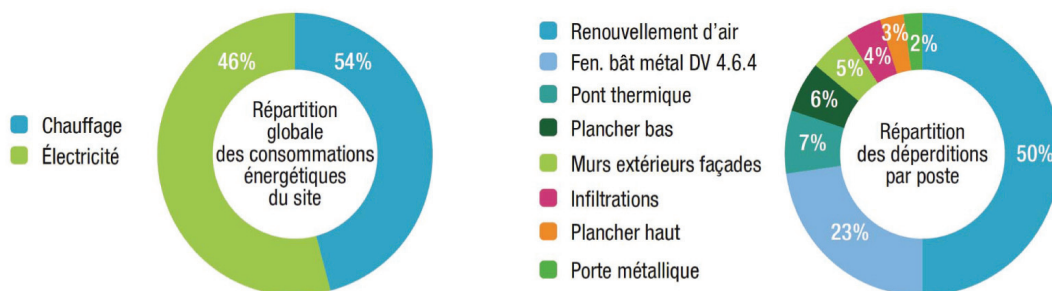
Le rôle des services généraux : l'exemplarité dans la gestion

Un axe fort des actions engagées par la chaire a aussi permis l'établissement d'une politique d'achat respectueuse de l'environnement, et une vigilance spéciale du tri des déchets. Papier, carton, films souples, canettes métalliques, bidons souillés chimiquement, déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), bouchons (en lien avec l'association Handichiens), piles, tubes fluorescents, lampes et cartouches d'imprimantes (en lien avec la ligue contre le cancer) sont collectés séparément, traités de façon écologique et en conformité avec les exigences réglementaires. Des guides du tri des déchets sont disponibles à différents endroits au sein de l'école. La qualité de ce tri est régulièrement évaluée par un audit externe (nous avons même suivi les camions d'export pour vérifier leur destination !). Quelques actions ponctuelles sont effectuées également tout au long de l'année telles que le test de récupération de déchets compostables (en lien avec l'association étudiante « Asso'stainable ») et un concours interne pour proposer toute idée susceptible de réduire les déchets. Nos achats sont tous sous label de développement durable – une tâche menée sur plusieurs années.

Plus récemment, une enquête menée au sein de l'école sur les modes de déplacement des élèves, salariés, enseignants, chercheurs et doctorants qui y évoluent, a indiqué que, plus que de co-voiturage ou de solutions plus ambitieuses, le plan déplacement d'entreprise (PDE) peut commencer par des aménagements tous simples : les cyclistes trouvent à l'école deux pompes leur permettant de gonfler les pneus, en plus des nombreux parkings. Ce PDE doit aussi et surtout s'insérer dans le paysage plus large dans lequel il évolue. Dans le cadre d'un projet concerté entre un laboratoire de recherche de l'École nationale des travaux publics de l'État (ENTPE, laboratoire LAET) et l'Université de Lyon, CPE Lyon a participé à une enquête sur la mobilité des étudiants et du personnel de l'école. L'objectif est de constituer un observatoire sur les modes de déplacement sur les campus de Lyon et d'avoir une cartographie des usages. C'est un projet partenarial de trois ans, coordonné par le laboratoire de recherche LAET et financé dans le cadre d'un appel à projets du Labex Intelligence des Mondes Urbains (IMU) auprès des établissements membres et associés de l'Université de Lyon.

Recherche et innovation

La recherche en chimie doit s'adapter aux nouvelles aspirations sociétales, souvent proches de grands enjeux, et concevoir



Bâtiment

Le diagnostic : l'enveloppe du bâtiment est assez bonne (peu de ponts thermiques).
La solution : focus sur le système de chaufferie à air.



Air

Le diagnostic : déperdition d'air dans les sorbonnes à débit fixe.
La solution : installation de sorbonnes à débit variable.



Gaz

Le diagnostic : un système à optimiser. Chaufferie gaz qui chauffe l'eau à 80 °C, qui elle-même chauffe de l'air rediffusé dans la partie laboratoire du bâtiment.
La solution : pompe à chaleur à l'étude et optimisation des panneaux solaires bi-énergie en place (voir photo ci-contre).



Électricité

Le diagnostic : l'électricité représente 46 % de l'énergie consommée dans le bâtiment, une consommation incontournable pour les appareils des laboratoires et les ordinateurs (500 postes pour l'école).
La solution : équipements plus économes (extinctions automatiques, LED) et nouvelles habitudes au quotidien.



Eau

Le diagnostic : utilisation massive de l'eau dans les procédés chimiques.
La solution : priorité à l'eau industrielle non traitée dans les laboratoires, les toilettes et pour le refroidissement. L'eau de climatisation est issue de la nappe et renvoyée vers elle. Remplacement des « trompes à eau » par des pompes à vide dans les laboratoires de TP. Robinetteries à déclenchement.

Figure 4 - Résumé des résultats du diagnostic énergétique réalisé à CPE Lyon et liste des principales solutions économes en énergie mises en place suite au diagnostic, présentées par poste de consommation (bâtiment, eau, air, électricité et gaz, dont vue des panneaux solaires bi-énergie installés sur le toit).

des produits et des procédés chimiques permettant, entre autres, de réduire nos consommations d'énergie, en plus que de réduire ou d'éliminer l'utilisation et la synthèse de substances dangereuses [11].

La recherche qui se déroule au sein des laboratoires dont CPE Lyon a par nature une autonomie forte est une des tutelles. Plusieurs exemples peuvent se retrouver dans la littérature, que nous ne détaillerons pas ici. La chaire a pu cependant fournir un cadre et un soutien matériel important à des projets de formation par la recherche tels que les onze thèses de doctorat du projet « Sustainable INdustrial CHEMistry » (SINCHEM, Erasmus Mundus) dont CPE Lyon est l'un des partenaires.

L'identification des technologies vertes : le congrès « CO₂ Forum »

La chaire de développement durable de CPE Lyon a fondé en 2010 et organisé depuis trois éditions un forum scientifique bisannuel « CO₂ Forum – revalorisation du CO₂ à large échelle » [12]. Le forum a aussi choisi de construire sur le site de CPE Lyon le tout premier banc « issu de CO₂ », c'est-à-dire avec des « parpaings » issus de carbonatation minérale [13] et sur une dalle de béton de dernière génération [14] (plus neutre en CO₂), construit grâce au soutien de Carbon8-Lignacite [13] et Lafarge, respectivement, et qui accueille nos étudiants et visiteurs (figure 5). Un banc d'essai en quelque sorte... Rassembler de grands scientifiques et ingénieurs



Figure 5 - Inauguration du banc « issu du CO₂ » sur une dalle de ciment à empreinte carbone réduite lors de la 3^e édition du « CO₂ Forum » en 2016, qui a réuni 262 participants venus de 27 pays (50 % issus du milieu académique, 40 % du secteur industriel et 10 % d'instances gouvernementales) autour de 21 conférences plénières et quatre tables rondes d'échanges entre spécialistes internationaux [12].

de la planète, et poser des actions concrètes symboliques, mais porteuses de futur, voilà ce qu'a été ce forum.

Bilan actuel de la chaire « développement durable » : une voie pour avancer vers l'avenir

La chaire, fondée en 2009, s'approche du bilan décennal. Le bilan montrera sûrement qu'elle a permis, grâce à l'attention continue vers un travail de partage entre toutes les composantes de l'école, tout en confiant la coordination et l'animation des projets à une titulaire de chaire, de renforcer la dynamique « développement durable » à tous ses niveaux. Les économies d'énergie par exemple, enjeu central du développement durable, ont donné l'occasion de produire un document collégial issu de la chaire autour de ce thème transversal à l'école [15], qui a interpellé et fédéré toutes ses composantes : les enseignants dans la conception de leurs cours, les élèves ingénieurs dans le choix de leur futur employeur, la direction sur sa stratégie, les salariés dans leur vigilance au quotidien, les services financiers sur le choix des investissements, les services techniques sur l'étude de solutions pour l'amélioration du bâtiment, les chercheurs sur leur thème de recherche. En lien avec cet enjeu des économies d'énergie au sens large, la chimie verte fraie son chemin dans les TP de chimie organique à CPE Lyon. De nombreux cas de réactions ne sont pas encore transposables en chimie verte, ou sont incompatibles avec les milieux aqueux, mais les efforts menés par les équipes enseignantes détectent de nouvelles possibilités, en écho des travaux actuels de chercheurs aussi bien académiques qu'industriels ; sont actuellement à l'étude pour de nouveaux TP la métathèse en milieu aqueux ou l'organocatalyse de type Macmillan par des imidazolidinones.

Les travaux déjà effectués permettent ainsi de faire évoluer les occasions d'apprentissage par projet, qui relèvent du domaine de la formation à la recherche des élèves-ingénieurs, vers des sujets plus résolument « chimie verte », tout en assurant une meilleure sécurité au travail pour élèves et enseignants. Bien que ce soit prématuré de considérer la préparation d'un TP que font les élèves en amont de la séance de pratique comme relevant pleinement d'une pédagogie en « classe inversée », ces ballons d'essais aident à la transition vers cette pédagogie ainsi que vers les autres relevant du développement durable et d'une approche systémique mentionnées plus haut (apprentissage par problèmes, « design thinking », fablabs, « serious games »...), qui seront appelées à s'étendre à d'autres secteurs de l'enseignement de l'école.

Et la culture « DD » commence à percoler : la création d'une association des élèves CPE Lyon autour du développement durable, « Asso'stainable », date de 2016 – ainsi que son potager au beau milieu de la cour de l'école où élèves et salariés se sont relayés pour la première récolte cet été – et résulte, entre autres choses, d'impulsions ciblées de la chaire en ce sens. C'est une belle réalisation !

L'un des défis évident dans cet exercice de bilan est de maintenir un regard critique et autocritique, pour éviter l'affichage et l'effet de mode. « Le développement durable : illusion ou réalité ? » est le titre emblématique que les étudiants du module « Engagement et exercice de la responsabilité » ont choisi pour leur étude sur le sujet en 2015. Il résume bien la dualité de ce concept porteur d'espoir vers un changement ressenti comme nécessaire mais dont le chemin est jalonné de chausse-trappes (de l'affichage à la bonne conscience, en passant par le « green washing »).

Audité par un cabinet spécialisé, à la demande d'un client majeur de la filiale de formation continue de l'école, CPE-FCR, le résultat nous a placés dans le tiers supérieur des organismes audités. L'absence d'une formalisation *ante facto* des actions à venir est en partie une piste d'améliorations suggérée par le cabinet, piste que nous suivons.

[1] « Développement Durable à CPE Lyon », *Point Info Com-CPE Lyon*, Numéro spécial, avril 2010.

[2] Quadrelli E.A., 25 years of energy and green chemistry: saving, storing, distributing and using energy responsibly, *Green Chem.*, 2016, 18, p. 328 ; Leitner W., Quadrelli E.A., Schoegl R., Harvesting renewable energy with chemistry, *Green Chem.*, 2017, 19, p. 2307.

[3] *Sécurité et prévention des risques en laboratoire de chimie et de biologie*, 3^e éd., A. Picot, J. Ducret (coord.), Lavoisier, 2013 ; Hill R.H., Finster D., *Lab Safety for Chemistry Students*, Wiley, 2010 ; <https://www.acs.org/content/acs/en/chemical-safety/ramp.html> (consulté le 03/01/2018).

[4] Gozzi C., Arnoux M.-J., Breuzard J., Marchal C., Nikitine C., Renaudaut A., Toulgoat F., Progressively fostering students' chemical information skills in a three-year chemical engineering program in France, *J. Chem. Educ.*, 2016, 93, p. 576.

[5] Arrêté du 30 décembre 2015 relatif à la liste des classes et catégories de danger mentionné à l'article D 4161-2 du Code du travail, et articles R4412-27 à R4412-31 et R4412-76 à R4412-80 du Code du travail.

[6] Byrne F.P. et al., Tools and techniques for solvent selection: green solvent selection guides, *Sustain. Chem. Process.*, 2016, 4:7, doi: 10.1186/s40508-016-0051-z ; Prat D., Hayler J., Wells A., A survey of solvent selection guides, *Green Chem.*, 2014, 16, p. 4546.

[7] Stahel W.R., *The Performance Economy*, 2nd ed., Palgrave Macmillan, 2010.

[8] Boruah P.R., Ali A.A., Saikia B., Sarma D., A novel green protocol for ligand free Suzuki-Miyaura cross-coupling reactions in water extract of banana (WEB) at room temperature, *Green Chem.*, 2015, 17, p. 1442.

[9] Klumpp P., Lipshutz B.H., "Nok": a phytosterol-based amphiphile enabling transition-metal-catalyzed couplings in water at room temperature, *J. Org. Chem.*, 2014, 79, p. 888.

[10] *Biopolymers – New Materials for Sustainable Films and Coatings*, D. Plackett (ed.), John Wiley & Sons, 2011.

[11] Voir par exemple le projet portant sur des procédés intrinsèquement sûrs par structuration du milieu réactionnel : www.agence-nationale-recherche.fr/Projet-ANR-16-CE07-0008

[12] <http://co2forum.cpe.fr> (consulté le 3/01/2018) ; *Solutions for a Circular Carbon Economy*, CPE Lyon, avril 2015.

[13] https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon8_Aggregates (consulté le 3/01/2018).

[14] www.aether-cement.eu (consulté le 3/01/2018).

[15] *Les défis des économies d'énergie à CPE Lyon : enseigner, rechercher, bâtir, innover*, CPE Lyon, fév. 2014.

Jérémy BREUZARD, Nacer ABOUCHI, Emmanuelle ALMENDRA, Céline MOHAMED-ARAB, Claude DE BELLEFON, Christine LEGRAND, Clémence NIKITINE, Gérard PRIVAT, Marie-Alice TOGNAN, Hugo FLEURIOT, Annick RIVET, Mamadou TRAORÉ, membres de la chaire de développement durable, et Elsje Alessandra QUADRELLI*, directrice de recherche CNRS au C2P2 (Chimie, Catalyse, Polymères et Procédés), titulaire de la chaire de développement durable de CPE Lyon, Gérard PIGNAULT*, directeur de CPE Lyon.

* Courriels : alessandra.quadrelli@cpe.fr ; gerard.pignault@cpe.fr