



Chimie verte: approche nouvelle et responsable face aux problèmes issus des activités chimiques

Christine Ducamp

► To cite this version:

Christine Ducamp. Chimie verte: approche nouvelle et responsable face aux problèmes issus des activités chimiques. Développement durable et autres questions d'actualité - Questions socialement vives dans l'enseignement et la formation, educagri, 2011. <hal-01905726>

HAL Id: hal-01905726

<https://hal.science/hal-01905726v1>

Submitted on 26 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Chimie verte : approche nouvelle et responsable face aux problèmes issus des activités chimiques.

Christine Ducamp

Introduction

Ce texte se propose de faire un point sur la chimie verte (contexte, définition, état des lieux et nouvelle législation) et d'interroger la « transposition » dans l'enseignement de cette discipline en émergence : **i)** intégration dans les référentiels d'enseignement du ministère de l'agriculture, **ii)** analyse des connaissances, des représentations et des conceptions d'enseignants, et **iii)** réflexion sur de nouvelles modalités d'enseignement.

1 Contexte

Qu'il s'agisse de produits alimentaires, de médicaments, d'engrais, de pesticides, de matériaux ou de la plupart des objets qui nous entourent et que nous utilisons au quotidien, ils ont tous à un moment de leur fabrication subi au moins une transformation chimique. La chimie fait partie intégrante de notre quotidien sans que l'on s'en rende forcément compte. Ainsi, la chimie en tant qu'industrie a connu un développement considérable au vingtième siècle jusqu'à devenir une industrie de base d'importance fondamentale.

Mais de part son expansion, la chimie est une industrie polluante. Citons comme exemple la fabrication de l'ibuprofène (anti-inflammatoire non stéroïdien) par le procédé Boots (synthèse traditionnelle). Une production annuelle de 13 000 tonnes d'anti-inflammatoire s'accompagne de 20 000 tonnes de déchets. Dans cet exemple, le procédé chimique génère plus de déchets que de produit ! Ces déchets ne sont pas recyclables et certains sont toxiques. Il faut donc leur faire subir un traitement pour les détoxifier ou bien les détruire.

Dès les débuts de la chimie industrielle, les déchets ont systématiquement été rejetés dans la nature. L'image de la chimie auprès du public s'est progressivement dégradée au rythme de catastrophes aux conséquences humaines ou écologiques lourdes (Seveso, Bhopal ou AZF). Tout au long de sa phase de développement intensif, l'industrie chimique a libéré des substances de manière non-contrôlée dans les airs, les eaux ou les sols. En effet, la dilution était alors considérée comme la meilleure solution aux problèmes de pollution. Mais depuis la fin des années 1960, on a constaté la persistance de certaines molécules dans l'environnement ainsi que leur accumulation dans les organismes vivants. On a également découvert la toxicité de nombreux composés considérés jusqu'alors comme sans danger. La pollution chimique diffuse menace la santé et la reproduction humaine. En 2008, l'Inserm (Institut national de la santé et de la recherche médicale) a exposé les liens avérés ou possibles entre des facteurs environnementaux et une dizaine de cancers en progression, dans un rapport qui fait la synthèse de plus de 1800 articles ou rapports scientifiques sur le sujet : "Les modifications de l'environnement pourraient être partiellement responsables de l'augmentation constatée de l'incidence de certains cancers ». Depuis trente ans, le développement de nouveaux produits chimiques pour le bâtiment, le mobilier et l'entretien a été très rapide. Mais ce changement n'a été suivi d'aucun contrôle de l'hygiène des bâtiments. Parmi ces nouveaux produits se trouvent les COV (Composés Organiques Volatils), dont les aldéhydes (le formaldéhyde), le benzène, le toluène, les éthers de glycol actuellement fortement présents dans l'air ambiant des maisons. Les COV sont des substances composées de carbone et d'hydrogène présents dans la plupart des matériaux de construction. Ils constituent une nouvelle source de pollution

de l'air ambiant des maisons. Ils peuvent s'évaporer pendant des mois et des années. L'un des plus nocifs est actuellement le formaldéhyde. Ses émissions varient en fonction du taux d'humidité et de température de la pièce. Plus l'ambiance de la pièce sera chaude et humide et plus les dégagements de formaldéhyde seront importants. En 2005, sa consommation en France a atteint 126 352 tonnes. Près de la moitié de ce tonnage est utilisée dans le secteur de la fabrication de résines qui servent par exemple à élaborer des vernis ou des colles. Les secteurs de la fabrication de produits agrochimiques et de la fabrication de produits chimiques à usage industriel en consomment plus de 40 % de la quantité annuelle, pour la production de désinfectants, antimycosiques et conservateurs. De très nombreux secteurs industriels sont donc concernés par l'utilisation de solution de formaldéhyde ou de résines : le tannage des cuirs, la fabrication des panneaux de bois, de colles et gélatine, de caoutchouc synthétique, de produits pharmaceutiques, de moules de fonderie, de colorants, de pigments, d'huiles essentielles, de parfums, de savons, de détergents, de peintures, d'engrais, d'aliments pour animaux.

Autre exemple, le cas des particules fines des moteurs diesel qui atteignent les alvéoles pulmonaires. Leur rôle est avéré dans le cancer du poumon. Selon des études menées à Paris, Grenoble, Rouen et Strasbourg, 10 % des cancers du poumon dans ces villes leur sont attribuables.

Autre problème que l'on commence seulement à appréhender : celui des perturbateurs endocriniens, comme les phtalates et le bisphénol A qui ont un effet avéré sur la reproduction et le développement du fœtus. Par ailleurs, l'incidence du cancer des testicules a doublé au cours des trente dernières années. Le nombre de malformations génitales masculines est en hausse. Les phtalates sont employés comme lubrifiants dans le PVC et se retrouvent dans de nombreux objets de consommation courante : cosmétiques et emballages pour la nourriture. Ce sont des antiandrogènes. Le bisphénol A est utilisé pour fabriquer des biberons, des bouteilles en plastique et d'autres produits courants.

A la lumière de ces récentes et convergentes alertes, il y a une prise de conscience relative à la pollution chimique intérieure et diffuse. C'est un enjeu majeur de santé publique et un défi industriel, scientifique et médical. Mais quels sont les moyens dont disposent les industries chimiques ?

2 Etat des lieux sur l'industrie chimique

La première réponse aux problèmes de pollution a été la régulation. Les états ont cherché à exercer un contrôle en imposant des règles de gestion des déchets. Cette approche repose sur le fait qu'une diminution de l'exposition à un facteur de danger se traduit par une diminution du risque. Le principal défaut de cette approche est son retard dans le temps par rapport au danger.

Les États-Unis ont adopté en 1990 la loi de prévention de la pollution. Elle constitue un changement fondamental dans le traitement du risque. En effet, elle impose de concentrer les efforts en amont pour réduire la pollution à la source, dès la mise au point des procédés. On s'attaque ainsi aux causes du risque et cela évite d'avoir à réguler l'exposition au danger.

Une réflexion sur une « réforme de la chimie » s'est engagée. Le concept de « chimie verte » (green chemistry) a été développé aux États-Unis vers 1990 dans le but d'offrir un cadre à la prévention de la pollution liée aux activités chimiques (Colonna, 2006). « La chimie verte a pour but de concevoir des produits et des procédés chimiques permettant de réduire ou d'éliminer l'utilisation et la synthèse de substances dangereuses ». Dans cette définition, le qualificatif « dangereuses » est pris au sens le plus large : le danger peut être physique (substance inflammable, explosive...), toxicologique (cancérogène, mutagène...) ou global (destruction de la couche d'ozone, changement climatique...).

Un règlement européen est entré en vigueur le 1^{er} juin 2007 : REACH (enRegistrement, Evaluation et Autorisation des substances Chimiques) est un règlement instituant une nouvelle politique européenne en matière de gestion des substances chimiques. Son objectif est d'améliorer le niveau de protection de la santé et de l'environnement tout en renforçant la compétitivité et l'innovation dans l'Union européenne. Ce règlement a pour but principal d'améliorer la connaissance des propriétés intrinsèques (dangers) des substances chimiques et des risques liés à leurs usages. Ce projet intégrera dans un même système les nouvelles substances et progressivement - sur 11 ans - les substances existantes. Environ 30 000 substances (telles qu'elles ou incluses dans des préparations) devraient être soumises à enregistrement. La réglementation REACH va avoir comme principale conséquence d'accroître la sécurité du consommateur et la protection de l'environnement. Depuis 1981, l'industrie chimique mène de nombreux essais destinés à identifier les risques associés à la production et à l'utilisation de substances chimiques. Les fiches de données de sécurité permettent ainsi de renseigner l'utilisateur sur les conditions optimales de manipulation de ces substances. À titre d'exemple, des données toxicologiques, écotoxicologiques et physico-chimiques concernant 10 500 substances sont aujourd'hui disponibles. La Commission européenne a par ailleurs réalisé, en tout ou partie, l'évaluation des risques pour 130 substances parmi les 141 considérées comme prioritaires. À terme, REACH conduira à compléter les données sur les dangers des substances (propriétés intrinsèques) et à mieux maîtriser les risques pour la santé et l'environnement sur la base d'une évaluation des risques tout au long du cycle de vie du produit. Dans la pratique, les fabricants et importateurs de substances chimiques réaliseront l'acquisition des connaissances sur les substances, par le biais de laboratoires le plus souvent extérieurs à l'industrie, et conduiront une évaluation des risques pour la santé et l'environnement. L'acquisition de ces connaissances améliorera certainement la protection des salariés, des consommateurs et de l'environnement.

L'industrie chimique s'est défini aussi un code de bonne conduite depuis une vingtaine d'années. Synonyme de progrès continu en matière de sécurité, de santé et d'environnement, *Responsible Care* est une démarche volontaire de l'industrie chimique mondiale : indépendamment des normes et des dispositions réglementaires qui s'imposent à elle et qu'elle respecte. En s'appuyant sur des principes directeurs, de bonnes pratiques et des systèmes de gestion, cette démarche individuelle et collective permet à l'industrie chimique de consolider sa réputation dans un monde où les produits chimiques sont plus considérés comme des dangers potentiels que des éléments contributeurs au bien être de chacun. Elle intègre la dimension Santé - Sécurité - Environnement des produits tout au long de leur cycle de vie, depuis leur conception en laboratoire jusqu'à leur devenir après usage. Elle a pour but de protéger les hommes et les femmes de l'entreprise, de changer les modes de transport, de faire des économies d'énergie, de trouver de nouvelles sources d'énergie, de traiter les rejets et d'innover pour être un moteur du développement durable. C'est un vrai « green-business ». Lancée en France en 1990 par l'Union des Industries Chimiques, sous le nom d'Engagement de Progrès, la démarche a pour but de mettre en œuvre le concept de développement durable après celles d'Amérique du Nord et d'Europe de l'Ouest, les entreprises chimiques d'Europe de l'Est, du Pacifique et d'Amérique du Sud adhèrent à leur tour. A ce jour, 53 fédérations nationales ou régionales déclinent leur programme national, sous l'égide du *Responsible Care*.

Nous pouvons constater que l'industrie chimique a mis en place plusieurs moyens face à un certain type de pollution chimique. Mais est-ce vraiment dans le seul but de réduire la pollution chimique ? Ne serait-ce que pour redorer son image ? Faire du développement durable est « à la mode » mais le développement durable est une QSV. Sommes-nous en présence de « polluer moins pour polluer plus longtemps » ? ou « capitalisme vert : passer de

la peinture verte pour faire du business » ? Nous avons juste abordé la chimie verte comme un des moyens (ou le moyen ?) de réduire la pollution chimique. Mais qu'entend-on par chimie verte ?

3 La chimie verte : définitions

Un chimiste ou un ingénieur avant même de créer un matériau, un produit ou un procédé doit se poser certaines questions : quelles matières premières utiliser ? Quelles techniques mettre en œuvre ? Quels types de déchets seront produits ? Les principes de la chimie verte et d'ingénierie verte n'ont de sens que si, au moment de la création d'un projet, le chercheur intègre dans les premiers stades de la conception les réflexions de base guidées par des principes clairs et simples.

Comme citée précédemment, le gouvernement américain dans les années 1990 a lancé le « Pollution Prevention act ». Cette directive fédérale a pour but d'unifier la recherche autour d'une nouvelle idée : concevoir de nouveaux produits ou procédés chimiques ou optimiser ceux existants, avec pour objectif de les rendre moins dangereux vis-à-vis de la santé humaine et de l'environnement. En 1991, un projet intitulé « alternative Synthetic Pathway for Pollution Prevention » a été lancé pour distribuer des fonds destinés à la recherche sur ces thématiques. La chimie verte est née. Elle part de l'idée simple suivante : pour supprimer la pollution, bannissons les substances polluantes !

C'est une vision de la chimie et non pas une discipline à part entière. La chimie verte s'applique naturellement à la chimie organique, à la chimie minérale, à la biochimie, à la chimie analytique ainsi qu'au génie des procédés.

En 1996, Paul Anastas (chimiste organicien) publie avec une collègue Tracy Williamson un article dans *ASC Journal* qui jette les bases de la chimie verte. Ce n'est qu'en 1998, que Paul Anastas et John Warner publient un texte qui fera date. C'est le premier outil de réflexion concret basé sur 12 principes issus des travaux engagés sous l'impulsion du « Pollution Prévention Act ».

On pourrait dire que la chimie verte, c'est concevoir des produits et des procédés industriels à partir du génie des procédés avec un impact minimum sur trois domaines : la santé des opérateurs et des salariés, la qualité de l'environnement et la santé des consommateurs. La chimie verte est régie par les douze principes suivants :

1-Prévention : il vaut mieux limiter la pollution à la source plutôt que de devoir éliminer les déchets.

2-Economie d'atomes : dans une réaction chimique, il faut optimiser l'incorporation des réactifs dans le produit final.

3-Synthèses chimiques moins nocives : il est souhaitable de concevoir des synthèses chimiques moins dangereuses qui utilisent et conduisent à des produits peu ou pas toxiques pour la santé et l'environnement.

4-Conception de produits chimiques plus sécuritaires : les produits chimiques doivent être conçus de façon à préserver leur fonction tout en réduisant leur toxicité.

5-Solvants et auxiliaires plus sécuritaires : l'utilisation des solvants et des substances auxiliaires doit être réduite au maximum.

6-Amélioration du rendement énergétique : la dépense énergétique doit être réduite en privilégiant les procédés ayant lieu à température et pression ambiantes.

7-Utilisation de matières premières renouvelables : il vaut mieux utiliser les matières renouvelables plutôt que les matières fossiles.

8-Réduction de la quantité de produits dérivés : les produits dérivés devraient être évités dans la mesure du possible.

9-Catalyse : les procédés catalytiques sont supérieurs aux procédés stœchiométriques.

10-Conception de substances non persistantes : les produits chimiques seront conçus en intégrant leur mode de dégradation finale.

11-Analyse en temps réel de la lutte contre la pollution : des méthodes en temps réel seront mises au point pour contrôler le procédé avant toute formation de substances nocives.

12-Chimie essentiellement sécuritaire afin de prévenir les accidents : les procédés seront choisis de façon à minimiser les risques d'accidents, de rejets, d'explosions et d'incendies.

La chimie verte est amenée à se développer pour plusieurs raisons : la prise de conscience globale de la nécessité d'évoluer vers un développement durable se traduit par une pression de l'opinion publique de plus en plus forte sur les industries polluantes et la mise en place de législations toujours plus contraignantes. Il faut également prendre en considération le profit qu'un industriel peut tirer de la mise au point d'un procédé vert : réduction des coûts et avantage technologique sur la concurrence (business toujours présent). La chimie verte doit maintenant surmonter plusieurs barrières : des difficultés techniques et économiques à la mise au point des procédés, mais surtout un changement profond des mentalités qui doivent apprendre et s'adapter aux schémas de pensée de cette chimie nouvelle.

Le développement durable comporte trois dimensions : environnementale, économique et sociale. La chimie verte s'inscrit naturellement dans ces trois dimensions et apparaît comme un outil majeur du développement durable. Elle est donc nommée chimie durable (*La Recherche*, cahier spécial, 420, juin 2008).

Mais la chimie verte est perçue souvent dans l'opinion publique comme « la chimie issue des végétaux », c'est-à-dire une chimie transformant les produits agricoles et forestiers à des fins non alimentaires (énergie, lubrifiants, tensioactifs, solvants, traitements de surface, matériaux de conditionnement et de stockage...) décrite et résumée dans le livre « *La chimie verte* » de Paul Colonna (2006).

L'avènement du concept de chimie durable offre l'occasion de voir si les évolutions des procédés de la chimie vers plus de durabilité ne pourraient pas impliquer une évolution des rapports entre la chimie et la société, et en particulier conduire à revoir la communication sur la chimie. Communiquer sur une chimie durable, verte et responsable, nécessitera de passer d'une attitude défensive, positiviste vers une démarche d'écoute et de respect des inquiétudes, des intérêts et des attentes des concitoyens. Eastes (2010) pense que l'adoption d'une telle posture de communication semble pour l'instant inaccessible à la communauté des chimistes.

Nous pouvons constater qu'avec la chimie verte nous entrons dans un domaine éminemment subjectif et surtout évolutif. A travers les exemples précédents, nous rencontrons même dans la communauté scientifique diverses définitions et de possibles variantes.

C'est un signe positif car cela montre que les chercheurs et les citoyens discutent ce concept, ce qui en fait des Questions Socialement Vives (QSV).

4 Exemples de chimie verte

En reprenant la synthèse de l'ibuprofène nous pouvons voir la chimie verte à l'œuvre. Dans les années 1990, la société BHC a mis au point un nouveau procédé qui respecte les principes fondamentaux de la chimie verte et en particulier « l'économie d'atome ». Il consiste à minimiser la quantité de déchets en utilisant des réactions au cours desquelles les atomes des réactifs sont le plus possible intégrés aux produits. Dans ce procédé, les déchets sont réduits à une molécule : l'acide acétique. Ce dernier est un produit de base de l'industrie chimique, il est donc récupéré et vendu. Au bilan, la synthèse ne génère aucun déchet.

Mais il faut également considérer l'aspect économique, primordial du point de vue industriel. La quantité de sous-produit, donc le coût de retraitement, est considérablement réduite dans le

cas du procédé vert par rapport au procédé traditionnel. Pour optimiser les procédés chimiques en vue de les rendre plus respectueux de l'environnement, dans le cas de la synthèse de l'ibuprofène, la mise au point d'un catalyseur spécifique qui a permis de développer le procédé BHC.

Tableau 1

Les sous-produits issus des différentes étapes de la synthèse sont représentés entre parenthèses {}.

Les étapes 2 et 3 dans le procédé BHC sont catalysées. (La catalyse est l'action d'une substance appelée catalyseur sur une transformation chimique dans le but de modifier sa vitesse de réaction. Le catalyseur n'est pas consommé et est retrouvé inchangé à la fin de la réaction. S'il est séparable facilement du milieu réactionnel, il pourra être recyclé dans une nouvelle synthèse).

A travers cet exemple, nous pouvons observer que dans le nouveau procédé, il n'y a plus 6 sous-produits qui constituaient les déchets dans le procédé BOOTS mais un seul, l'acide acétique $C_2H_4O_2$ qui peut donc être réutilisé. En plus, les étapes de fabrication sont réduites à 3 au lieu de 6 ce qui constitue un gain. Et cela grâce à des catalyseurs qui ont un rôle important dans la chimie verte. Plus généralement, la catalyse est considérée comme un des piliers de la chimie verte car elle permet d'optimiser les synthèses à plusieurs niveaux. Deux prix Nobel ont récemment récompensé les avancées dans le domaine de la catalyse. Le prix Nobel de chimie 2005 a été attribué à trois chercheurs dont le français Yves Chauvin pour leurs travaux sur la réaction de métathèse des oléfines (changement de positions des substituants des doubles liaisons par mécanisme chimique catalysé) décrite par le comité Nobel comme « un pas en avant vers une chimie verte, plus respectueuse de l'environnement ». Par ce même comité, elle est considérée comme l'une des plus utiles en chimie organique, qui a de nombreuses applications et qui est largement utilisée dans l'industrie chimique. Elle intervient dans des synthèses aussi variées que la synthèse de produits à activité biologique (médicaments, herbicides, phéromones d'insectes) ou de matériaux (polymères à propriétés spéciales, additifs à l'essence).

Dans le cadre de la recherche et du développement, nous pouvons prendre l'exemple de l'hydrogène. L'hydrogène peut être l'un des facteurs les plus prometteurs dans la recherche d'alternatives aux ressources fossiles. Mais il n'existe pas à l'état naturel. Il doit être produit à partir de gaz naturel, de biomasse ou d'eau avec différentes méthodes qui sont en cours de validation comme les méthodes thermiques, électrochimiques et biologiques. En fait l'hydrogène moléculaire est considéré comme un vecteur d'énergie vert car il peut-être généré à partir de sources renouvelables et sa combustion ne génère que de l'eau. Une analyse détaillée sur le caractère vert des principaux procédés de productions d'hydrogène en les comparant les uns aux autres sur la base des principes de la chimie verte a été réalisée. Mais ce qu'il en résulte c'est que ces procédés bien que relativement verts ne sont pas viables à l'heure actuelle du point de vue de la compétitivité et de l'économique. Effectivement, adopter l'hydrogène comme vecteur d'énergie demande de le stocker, de le distribuer et d'assurer la sécurité de son utilisation (Demirci & Miele, 2010)

Au niveau de l'enseignement, des efforts sont aussi réalisés. C'est au niveau même de la conception des TP que les enseignants agissent. Ce qui exige un effort de créativité car il faut sortir de la séquence habituelle « extraire-produire-distribuer-jeter » pour appliquer au minimum la séquence des 3R : « réduire-réutiliser-recycler ».

En enseignement supérieur (bac +2 ou 3), une synthèse de chimie organique est présentée entre autres en mettant l'accent notamment à travers un tableau sur les différents aspects de la

chimie verte. Les auteurs proposent une feuille de calcul Excel pour effectuer des calculs et générer des graphiques. Ils traduisent judicieusement et visuellement à travers un heptagramme (figure ci dessous) les valeurs calculées pour cette réaction : économie d'atomes (Eat), économie de carbone (Ec), rendement (r), efficacité massique de réaction (EMR), bilan danger et bilan toxicité. Une valeur de 1 étant idéalement respectueuse des préceptes de la chimie verte (Bataille & Beauvineau, 2009).

Extrait de l'article de Bataille et all (2009)

Comme nous pouvons le constater, à tous les niveaux, de l'industrie à l'enseignement en passant par la recherche, la chimie verte est omniprésente.

Fort de cette implication dans différents domaines, nous avons voulu savoir ce que pensent les enseignants de ce concept qui pour l'instant n'apparaît pas en tant que tel dans les programmes de l'enseignement agricole.

5 La chimie verte : sa place dans l'Enseignement Agricole

Le développement durable est apparu dans les référentiels de formation de l'enseignement agricole dès 1993, dans un premier temps autour de l'agriculture durable. Il invite ainsi à jeter des ponts entre les différentes familles de formation professionnelle (production agricole, transformation agroalimentaire, aménagement, services en espace rural), et à créer des transversalités basées sur l'agriculture, l'alimentation et l'environnement. Il y a là un nouveau périmètre pour l'enseignement agricole et, surtout, une nouvelle architecture des formations à prévoir qui a trouvé sa première application dans la mise en place à la rentrée 2006 du nouveau baccalauréat technologique Sciences et technologie de l'agronomie et du vivant (STAV). Est venu ensuite le baccalauréat professionnel rénové en trois ans avec une mise en application pour certaines filières dès 2009.

L'enseignement agricole a su prendre le virage du développement durable sans faire de cette notion un simple objet d'enseignement et d'éducation se superposant, comme une nouvelle strate, aux objets existants. Au contraire, le développement durable est envisagé comme une occasion de nouvelles interdisciplinarités autour de nouveaux objets, un appel à enseigner autrement en se laissant interroger par des questions sociétales, par la science en train de se faire, par des interrogations venant des partenaires du terrain, afin d'y apporter des réponses dans le cadre pédagogique.

Les rénovations de programmes sont l'occasion pour les rédacteurs, enseignants et inspecteurs, d'intégrer pleinement cette dimension dans les enseignements et de formuler des recommandations pour sa mise en œuvre. Par exemple, en baccalauréat professionnel, un stage collectif d'une semaine sur l'éducation à la santé et au développement durable a fait son apparition. Il est axé sur deux thématiques : induire une réflexion sur les conduites et les pratiques individuelles ou collectives et développer un comportement responsable dans la vie personnelle et professionnelle. Bien que la chimie n'émarge pas dans ce stage en tant que discipline porteuse, les enseignants de chimie peuvent se servir de ce stage en cours pour mettre l'accent sur certains principes de la chimie verte.

Toujours dans cette réforme du baccalauréat professionnel, le document d'accompagnement relatif à la chimie sous-entend une application de certains principes de la chimie verte « Les séances de TP sont également l'occasion de développer des attitudes citoyennes concernant entre autres la sécurité des biens et des personnes, la gestion des quantités de réactifs utilisés ainsi que des déchets générés par l'activité. Elles permettent d'acquérir des compétences en matière d'économie d'énergie ». Nous pouvons constater qu'entre le référentiel du baccalauréat

technologique et du baccalauréat professionnel, il y a eu en trois ans une prise de conscience affirmée au point de la stipuler en document d'accompagnement. Mais à la lecture du référentiel de formation, comment cela se traduit-il ? La chimie verte n'étant que sous-entendue, comment faire prendre conscience aux enseignants de l'intérêt de la prise en compte des principes de la chimie verte dans leurs enseignements ?

Si nous reprenons les 12 principes de la chimie verte, comment pouvons-nous les intégrer dans l'enseignement agricole au niveau du baccalauréat technologique et professionnel voire en BTSA ?

Nous illustrerons ici 3 principes.

(1) Prévention : il vaut mieux limiter la pollution à la source plutôt que de devoir éliminer les déchets.

Depuis une bonne dizaine d'années, les établissements scolaires sont dans l'obligation de faire évacuer les déchets chimiques (mais aussi biologiques et microbiologiques) par des organismes agréés. De ce fait, l'enseignement de la chimie prend en compte le tri des déchets issus des TP. Mais il y a encore besoin de formation dans ce sens : nous pouvons limiter les déchets par exemple en utilisant des titrages à faibles concentrations et en neutralisant les déchets ainsi obtenus.

(5) Solvants et auxiliaires plus sécuritaires : utiliser des solvants inoffensifs comme alternatives aux solvants, agents de séparations et auxiliaires de synthèse.

Dans l'enseignement des biomolécules, nous pouvons déterminer l'indice de diode d'une huile, c'est un moyen de contrôle. Pendant la période de stockage, l'huile peut subir des dégradations : par exemple, elle peut s'oxyder rapidement à la lumière et au contact du dioxygène de l'air ce qui donnera le goût de rance. L'indice de diode permet donc de vérifier la fraîcheur de l'huile. Ce TP issu d'une norme utilise comme solvant le tétrachlorure de carbone et comme catalyseur l'acétate mercurique. Dans ce cas précis, deux améliorations peuvent être réalisées. Le tétrachlorure de carbone peut être remplacé par un solvant moins nocif mais tout aussi adapté comme le cyclohexane. Ensuite, tout dérivé du mercure est à « proscrire » du fait de leur toxicité et donc le recyclage des dérivés du mercure sont traités à part et représentent un certain coût. Pour cela, des essais ont été réalisés et ils ont conduit à éliminer le catalyseur en augmentant le temps de la réaction à 15 minutes ce qui est acceptable dans le cadre d'une séance de TP d'une heure et demie. Nous avons éliminé le catalyseur alors qu'un des principes de la chimie verte préconise l'utilisation de catalyseur. Tout est une question de « bon sens ». Si le catalyseur est considéré comme toxique, il faut chercher soit un autre catalyseur moins ou pas toxique ou rajouter du temps de réaction puisqu'un catalyseur augmente le temps de réaction. Nous avons choisi de jouer sur le temps sans introduire de réactif supplémentaire. Ce qui est en parfait accord avec les principes de la chimie verte.

(12) Chimie essentiellement sécuritaire afin de prévenir les accidents : les procédés seront choisis de façon à minimiser les risques d'accidents, de rejets, d'explosions et d'incendies.

L'étude de piles dans le cadre de l'enseignement de l'oxydoréduction peut être optimisée en utilisant simplement du papier « essuie-tout », des comptes gouttes contenant les solutions d'ions métalliques et les métaux correspondants. Dans ce genre de manipulations, nous réduisons la quantité de solutions d'ions métalliques utilisées (donc moins de déchets à recycler), pas d'utilisation de verrerie (donc pas de consommation d'eau pour le nettoyage de la verrerie) et un gain de temps car nous pouvons mesurer douze tensions (force électromagnétique) rapidement.

Dans l'enseignement agricole, la chimie qu'elle soit générale, analytique ou organique ne réalise pas beaucoup de synthèse mais elle est plutôt axée sur des processus de contrôle du produit (souvent alimentaire). Repenser son enseignement pratique à travers la chimie verte demande des temps de formalisation et de formation.

6 La chimie verte : conception des enseignants de l'enseignement agricole

Notre objectif à moyen terme est de cerner par rapport au concept de chimie verte, les reconstructions curriculaires à mettre en œuvre, les formations d'enseignants à construire, et évaluer leur impact sur les élèves. Les résultats présentés ci-après correspondent à une étape préalable incontournable.

Une de nos questions de recherche est : quelles sont les représentations des enseignants de l'enseignement agricole sur le développement durable, l'environnement, la chimie verte ?

Les cadres d'analyse mobilisés sont : les représentations sociales (Moscovici, 1989 ; Abric, 2003 ; Jodelet, 1997), les identités socio-professionnelles (Dubar, 1991), et les analyses curriculaires (Lebeaume, 2004).

Nous avons établi un pré-questionnaire diffusé auprès d'enseignants principalement des disciplines physique-chimie, agronomie, agroéquipement, économie, zootechnie, aménagement, productions animales et productions végétales de l'enseignement agricole en formation initiale (24 réponses) ou ayant plusieurs années d'enseignement (à travers les conférences disciplinaires du MA : 58 réponses) à la fin du premier semestre 2009.

Les différentes réponses des enseignants dans des disciplines d'enseignement général et technique, et quelle que soit leur ancienneté, nous ont permis d'avoir un aperçu des représentations des enseignants sur des notions médiatisées et intégrées dans les programmes de formation agricole (développement durable, environnement, phytosanitaire). Très peu d'enseignants associent phytosanitaire au contexte de l'après Grenelle de l'environnement qui a décidé le plan Ecophyto 2018. Le terme « chimie verte » ne fait pas partie de ces référentiels. Les enseignants s'appuient alors sur la sémantique du terme.

Nous avons donc cherché à approfondir ces données notamment en insistant sur les notions suivantes : les agro-carburants, la chimie verte et le plan éco-phyto à travers un questionnaire. Ce dernier a été réalisé à travers des conférences disciplinaires. Nous traiterons dans ce chapitre la partie relative à la chimie verte.

Majoritairement, les 120 enseignants qui ont répondu à ce questionnaire enseignent dans des filières professionnelles du ministère de l'agriculture telles que les baccalauréats professionnels, le baccalauréat technologique STAV (Sciences et Techniques de l'Agronomie et du vivant) et les Brevets de Technicien Supérieur Agricoles. Les disciplines représentées sont la physique-chimie (PCEA et MSP), les productions végétales, les sciences économiques et les sciences de gestion, l'agroéquipement et en moindre proportion la biologie-écologie.

Le contexte environnemental dans lequel ces enseignants se reconnaissent le plus est le rural anthropisé et l'espace naturel (86%) par rapport à la ville (6%) ou à la société de consommation (2%). On peut noter qu'il y a 6% de non réponses (pas de possibilité de réponses multiples d'où peut-être ce pourcentage).

A la question « Pouvez-vous donner votre avis sur les propositions suivantes ? », majoritairement c'est la réponse « oui » qui l'emporte avec des pourcentages allant de 50 à 77.

La chimie verte se pratique - dans l'agriculture intensive 68% - dans l'agriculture biologique 53% - sous serre 53% - dans les travaux pratiques à l'école 50% - dans l'industrie chimique 63% - au niveau de la recherche 77% - l'industrie agrochimique 69% - à la maison 51% .

Dans les non-réponses, la principale justification est « l'ignorance » des termes « chimie verte ». Nous pouvons nous interroger sur la pertinence des justifications car nous avons des argumentaires qui paraissent contradictoires avec la réponse oui ou non formulée.

« A votre avis, les problèmes environnementaux peuvent être résolus »: 6% de non réponses - 69% grâce à des innovations techniques - 53% par une législation plus rigoureuse qui favorise la création d'espaces protégés et qui contrôle nos activités nuisibles à l'environnement - 71% par une meilleure prise en compte économique de l'impact de nos actions sur l'environnement - 64% par une meilleure concertation entre les acteurs concernés.

Les réponses, qui pouvaient être multiples, tendent à montrer que les enseignants ont plutôt une approche liée à l'économie et à la technicité. Nous pouvons rapprocher ce résultat des disciplines enseignées telles que l'économie-gestion et les disciplines scientifiques et techniques. On voit aussi dans ces réponses que les enseignants croient autant dans l'impact d'une nouvelle gouvernance (concertation entre acteurs, législation...) que dans la solution technologique.

A la question « Assimilez-vous la chimie verte aux termes suivants ? », 18 possibilités de réponses étaient formulées : agroressources – bioplastiques – photosynthèse – compost - engrais vert - purin d'ortie - agriculture biologique – phytothérapie - utilisation de solvant - limitation d'entrants - fabrication de plantes génétiquement modifiables - utilisation d'herbicide non polluant - fabrication de colle à partir de plantes - fabrication de colorants à partir de plantes - réduction de produits toxiques dans la fabrication chimique - réduction de produits toxiques dans le traitement des plantes - extraction de molécules chimiques à partir de plantes.

Les réponses sont les suivantes : la chimie verte est assimilée en priorité à bio-plastiques (80%), colle (78%) et colorants à base de plantes (78%). Viennent ensuite entre 65% et 50%, les agro-ressources, puis les herbicides et l'extraction de molécules à partir de plantes. Par contre, elle est peu associée (moins de 50%) aux OGM, à l'agriculture biologique, à la limitation d'entrants, aux solvants et à la phytothérapie.

Nous constatons que les réponses formulées ont plutôt tendance à faire référence à la chimie en lien avec les plantes (par exemple bio-plastiques ou fabrication de colle à partir de plantes). Cependant des réponses comme solvant ne font pas partie du haut du classement alors qu'elles sont liées directement à l'industrie chimique et à la transformation de produits issus du pétrole: cela fait écho aux représentations sociales négatives de la chimie bien connues depuis longtemps (Davallon & François, 1991 ; Bensaude-Vincent, 2005). Nous pouvons faire le lien avec un article récent qui interroge les représentations que se font les chimistes de leur discipline, les représentations de la société sur la chimie et sur l'évolution nécessaire des modes de communication des chimistes (Eastes, 2010). Pour Eastes, il faudra que les chimistes passent « d'une attitude défensive, positiviste et, il faut bien l'admettre, un peu condescendante parfois, à une démarche plus ouverte d'écoute et de respect des inquiétudes, des intérêts et des attentes de nos concitoyens, notamment à travers la compréhension des valeurs et des imaginaires qui les sous-tendent » (p. 4). Au-delà de la promotion des produits issus de la chimie, des bienfaits proclamés à renfort de faits scientifiques, il va falloir discuter des valeurs. Chimistes et scientifiques ne peuvent plus se laver les mains (même à l'eau verte) des dérives possibles néfastes des applications de leur production. C'est la question de la gouvernance qui est posée, comme elle l'est, selon nous, pour toutes les questions socialement vives relatives à l'environnement. Il convient d'associer les citoyens aux prises de décision, aux choix de société.

Nous avons obtenu 6% de réponses positives à la question : « Connaissez-vous les 12 principes de la chimie verte ? ». Nous demandions dans le cas d'une réponse positive aux enseignants de citer au moins trois principes. Globalement, les trois principes cités sont résumés dans les trois réponses suivantes :

- un enseignant de SESG : *« Il vaut mieux produire moins de déchets qu'investir dans l'assainissement ou l'élimination des déchets. Les produits chimiques doivent être conçus de manière à remplir leur fonction primaire tout en minimisant leur toxicité. Lorsque la technologie et les moyens financiers le permettent, les matières premières utilisées doivent être renouvelables plutôt que non renouvelables »*

- un enseignant de PC : *« Minimiser l'impact des produits de synthèse sur l'environnement utiliser au maximum les réactifs en les réintégrant dans la synthèse utiliser des matières premières renouvelables autant que possible. »*

- une enseignant de PC : *« Les méthodes de synthèse doivent utiliser et créer des substances faiblement toxiques pour l'homme et l'environnement. L'utilisation de solvants doit être minimiser. Les matières premières utilisées doivent être renouvelables. L'utilisation de réactifs catalytiques doit être favorisée. »*

Sept principes sur douze sont représentés dans ces trois réponses (principes 1, 2, 3, 4, 5, 7 et 9). Les plus représentatifs sont le principe 3 « il est souhaitable de concevoir des synthèses chimiques moins dangereuses, qui utilisent et conduisent à des produits peu ou pas toxiques pour la santé et l'environnement » et le 7 « il vaut mieux utiliser les matières renouvelables plutôt que les matières fossiles ». Deux réponses (enseignant production végétale et d'agroéquipement) sont des « copier-coller » d'internet où sont repris les douze principes avec des exemples. Notre questionnaire a donc eu le mérite de susciter une curiosité chez certains enseignants.

Souvent, tout est une question de « bon sens ». Mais il faut prendre le temps de réfléchir, de tester, pour pouvoir améliorer les séances de travaux pratiques en incluant un ou plusieurs principes de la chimie verte. Nous nous proposons de travailler avec des enseignants de différentes filières pour savoir comment ils s'imprègnent de ce concept et comment ils peuvent l'intégrer dans leur enseignement. Dans ce cas, l'enseignant deviendra un enseignant « plus responsable ».

Conclusion

La chimie verte est une approche radicalement nouvelle des problèmes posés par les activités chimiques industrielles. Jusqu'à présent, encadrés par la législation, les industriels cherchaient à minimiser l'exposition aux dangers en contrôlant les substances toxiques à tous les stades des procédés : manutention, utilisation, traitement et élimination. La chimie verte propose de traiter les problèmes à la source en développant des processus sans dangers !

Par rapport à l'enseignement, globalement, les enseignants de l'enseignement agricole associent la chimie verte à la chimie produite à partir de plantes. Cette première analyse nous conforte dans l'idée que la chimie verte est souvent associée dans les représentations à la sémantique de ces deux termes. En résumé, la chimie verte, c'est « tout ce qui est produit par transformation chimique en utilisant des plantes » et la chimie verte est aussi associée au durable. Certains lui reprochent alors d'être une expression du capitalisme *vert*. (Eastes 2010) plaide pour une chimie durable : verte et responsable. Il associe chimie verte et chimie durable. Parmi certaines réponses d'enseignants à ce questionnaire, nous voyons qu'ils ont eux aussi assimilé chimie verte et chimie durable. Nous pensons qu'il convient d'approfondir les représentations des enseignants sur la chimie verte pour voir si leurs rationalités

environnementale, économique, technoscientiste peuvent être des freins ou des obstacles à l'évolution de leur enseignement, dans la prise en compte des principes de la chimie verte, mais aussi plus globalement, vers l'enseignement d'une chimie plus responsable, appréhendée dans ses dimensions vives. Très peu connaissent les 12 principes de la chimie verte. Nous plaçons non seulement pour une intégration de la chimie verte à l'enseignement de la chimie, mais aussi pour le développement d'un enseignement d'une chimie responsable, et cela passe par un enseignement scientifique citoyen faisant place à l'analyse des choix de société en matière du développement de la chimie. Optons donc pour un enseignement de la chimie, verte et responsable.

Recherche réalisée dans le cadre du programme ANR-08-BLAN-135, ED2AO

Bibliographie

- Abrieu JC., *Méthodes d'étude des représentations sociales*. Ramonville Saint Agne, éres, 2003.
- Bataille X, Beauvineau E., Synthèse parallèle basée sur la réaction multicomposantes de Biginelli, *L'Actualité chimique*, 330, 2009.
- Bensaude-Vincent, B., *Faut-il avoir peur de la chimie ?* Ed. Les empêcheurs de penser en rond, 2005.
- Colonna, P., *La chimie verte*. Lavoisier, 2006.
- Davallon J, François E., *Étude en vue de l'élaboration d'un Cahier de programmation muséale*, vol. 2, *Étude détaillée des représentations de la chimie*. Rapport d'étude. Lyon/Saint-Fons: LARMURAL/Ville de Saint-Fons, 1991.
- Demirci U.B, Miele P., les méthodes de productions d'hydrogène sont-elles vertes ?, *L'Actualité chimique*, 341, 2010.
- Dubar C., *La socialisation Construction des identités sociales et professionnelles*. Paris : Armand Colin, 1991.
- Eames C, Cowie B., Bolstad R., An evaluation of characteristics of environmental education practice in New Zealand schools. *Environmental Education Research*, 14(1), 2008.
- Eastes RE., La chimie durable : verte et responsable. *L'Actualité chimique*, 342-343, 2010.
- Gough, S, Increasing the value of the environment : A 'real options' metaphor for learning. *Environmental Education Research*, 8(1), 2002.
- Hart P, Nolan K., A critical analysis of research in environmental education. *Studies in Science Education*, 34, 1999.
- Jodelet D., *Les représentations sociales*. Paris, PUF, 1997.
- Lebeaume J., Designing Technology Education at the Junior High School Level: Propositions from the French School Curriculum. *The Journal of Technology Studies*. Vol. XXX, 3, 2004.
- La Recherche, cahier spécial, 420, Juin 2008.
- Moscovici S., Des représentations collectives aux représentations sociales. In D. Jodelet (Dir), *Les représentations sociales*. PUF, 1989.
- Scott A., Technological risk, scientific advice and public education : Groping for an adequate language in the case of GM foods. *Environmental Education Research*, 7(2), 2001.