

Un exemple : des résines époxy à base de vanilline

Les résines époxy, une classe importante de polymères thermodurcissables, sont utilisées en tant que revêtements, peintures, vernis, adhésifs, dans de nombreux secteurs tels que l'électronique, les matériaux ou l'aérospatial.

En raison de leurs propriétés mécaniques et électriques, de résistance chimique, d'adhérence et de leur retrait minimal après durcissement, elles interviennent dans nombre de structures. La plupart de ces polymères sont fabriqués à partir de bisphénol A, un composé qui contient des cycles aromatiques, particulièrement adaptés, car ils confèrent leur résistance thermique et chimique aux résines époxy. Mais le bisphénol A est un perturbateur endocrinien, dont l'impact négatif sur la santé humaine et l'environnement a conduit à son interdiction dans

de nombreux matériaux en France et en Europe. C'est pourquoi des composés de substitution moins dangereux sont nécessaires.

Ainsi, l'industrie chimique montre un intérêt croissant pour des composés aromatiques non nocifs permettant la synthèse de résines époxy thermodurcissables sans bisphénol A. Par ailleurs, avec la limitation et le coût élevé des ressources fossiles, des ressources renouvelables constitueraient un avantage. Mais si de nombreux réactifs issus de ressources renouvelables sont disponibles pour élaborer des matériaux,

notamment à partir de dérivés d'huiles végétales et d'amidon, la plupart ne contiennent pas de cycles aromatiques (les composés aromatiques de la biomasse sont peu disponibles pour la chimie).

Notre équipe s'intéresse à la substitution de composés dangereux et d'origine fossile par des composés moins dangereux et d'origine renouvelable (l'un n'impliquant pas forcément l'autre). Nous étudions notamment la substitution du bisphénol A dans les résines époxy par des composés aromatiques d'origine renouvelable, produits à partir de tanins de différentes espèces d'arbres. Les tanins sont des phénols naturels contenant des cycles aromatiques, présents dans les écorces des arbres. Cependant, ils sont peu abondants et souvent trop réactifs (ils s'oxydent facilement).

Parmi ceux que nous étudions, l'huile de noix de cajou contient trop peu de cycles aromatiques et sa production est limitée. La lignine, le polymère naturel de structure des végétaux le plus abondant, contient une grande concentration de composés aromatiques, mais on ne sait pas encore la dépolymériser. La vanilline est plus prometteuse. Issue de la lignine et produite à l'échelle industrielle, elle permet d'obtenir un composé non dangereux selon les critères de la réglementation européenne. Récemment, nous avons proposé un procédé pour fabriquer des composés de vanilline époxydés qui pourraient remplacer le bisphénol A dans les résines époxy.

- Sylvain Caillol
Directeur adjoint de l'Institut
Carnot Chimie Balard,
à Montpellier

et sans bisphénol A – un perturbateur endocrinien en passe d'être interdit en France (voir l'encadré ci-dessus).

Si ces exemples sont encourageants, ces préoccupations restent encore marginales. Aux États-Unis comme en France, les communautés des chimistes de synthèse et des toxicologues n'ont pas l'habitude de travailler ensemble. De plus, les outils de toxicologie prédictive prêts à l'emploi pour les chimistes sont aujourd'hui hors de portée. Un des enjeux est de savoir s'ils le seront un jour et dans quel délai. La toxicologie et l'écotoxicologie ne sont toujours pas enseignées aux chimistes, à l'exception de rares cas de formations de l'enseignement supérieur qui fournissent aux chimistes des connaissances sur les impacts sanitaires et environnementaux de la chimie (par exemple, à l'École nationale supérieure de chimie de Paris ou à l'Université de Californie à Berkeley).

En France, deux autres raisons s'ajoutent. D'abord, l'État a sous-investi dans la recherche en toxicologie et, plus largement, sur les questions de santé environnementale. Parce que la toxicologie a toujours été associée au contrôle réglementaire des risques chimiques, elle a pu être considérée comme une discipline contre-économique et « moins noble » selon les critères de la science.

De même, le règlement européen REACH (Enregistrement, évaluation, autorisation et restrictions des substances chimiques) n'a qu'une faible résonance sur la recherche académique. L'objectif de ce règlement n'est pas d'interdire des substances dangereuses, mais de les identifier pour mieux permettre leur remplacement par des alternatives plus sûres. On aurait donc pu s'attendre à une explosion des recherches visant à développer des substituts aux molécules dangereuses aujourd'hui en usage. Pour-

tant, ce n'est pas le cas, et la lenteur dans l'application du règlement y est probablement pour quelque chose.

Ce court historique de la chimie verte montre que les avancées dans ce domaine dépendront de l'orientation donnée aux financements publics de la recherche et de l'efficacité des politiques environnementales qui, comme REACH, visent à caractériser les risques chimiques. Si la volonté et la motivation de la communauté des chimistes sont claires, le futur de la chimie verte dépendra beaucoup des politiques publiques. ■

Laura MAXIM est chargée de recherche au CNRS, à l'Institut des sciences de la communication, à Paris.

L. Maxim (dir.), La chimie durable, au-delà des promesses, CNRS Éditions, 2011.

P. T. Anastas, J. C. Warner, Green Chemistry: Theory and Practice, Oxf. Univ. Press, 1998.

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek



Les avatars du Docteur Diafoirus

La création récente d'écoles d'informatique résulte de l'inadéquation du système de formation des ingénieurs.

L'année académique qui s'achève a vu la création en France de plusieurs écoles d'informatique, notamment l'école 42 et l'école *Simplon*, qui s'ajoutent à une liste déjà longue. Le projet pédagogique de ces établissements est parfois loué, parfois vilipendé, mais la question qui nous intéresse ici est celle de la raison pour laquelle ces écoles d'informatique se créent aujourd'hui.

Pour répondre à cette question, il faut sans doute remonter en l'an 1530, date de la fondation par François I^{er} du Collège des Lecteurs royaux – aujourd'hui plus connu sous le nom de Collège de France – et de ses premières chaires consacrées à deux disciplines que l'Université de Paris refusait d'enseigner : le grec et l'hébreu.

Un siècle plus tard, alors que l'Université s'opposait à la science expérimentale et refusait, par exemple, d'enseigner la découverte de la circulation du sang – ce sont ses professeurs qui ont inspiré Molière pour ses portraits de médecins –, Colbert a successivement créé le Jardin royal des plantes médicinales (aujourd'hui Muséum national d'histoire naturelle) en 1665, l'Académie des sciences en 1666 et l'Observatoire de Paris en 1672, pour permettre à la science expérimentale de se développer.

Encore un siècle plus tard, quand l'Université ignorait les besoins en ingénieurs des armées et de l'industrie naissante, on a fondé les premières Grandes écoles : l'École des ingénieurs-constructeurs des vaisseaux royaux en 1741, l'École royale des ponts et

chaussées en 1747, etc. Ce mouvement s'est déroulé sur presque un siècle, puisque l'École centrale des arts et manufactures n'a été créée qu'en 1829, sans que l'Université n'en profite pour réagir.

Plus proche de nous, le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) a été fondé en 1939 pour « tirer un rendement plus élevé de la recherche scientifique », c'est-à-dire pallier les carences, sur le plan de la recherche, des structures existantes.

La création de ces écoles d'informatique n'obéit pas à une autre logique : ces

Il a fallu attendre la rentrée de 2013 pour que les programmes des Classes préparatoires aux Grandes écoles incluent un enseignement obligatoire d'informatique.

établissements ne font que répondre à un besoin auquel ne répondent pas les structures actuelles de formation des ingénieurs, notamment les Grandes écoles et les Classes préparatoires – l'Université étant, sur ce point, en avance de plusieurs décennies. Par exemple, il a fallu attendre la rentrée de 2013 pour que les programmes des Classes préparatoires aux Grandes écoles incluent un enseignement obligatoire d'informatique.

Le ministère de l'Éducation nationale n'a cependant pas jugé utile de recruter des professeurs d'informatique pour dispenser cet enseignement. Voilà un exemple de décision conduisant mécaniquement à l'apparition

d'écoles d'informatique qui, contrairement au Jardin royal des plantes médicinales, se créent désormais à l'extérieur du système public d'enseignement supérieur.

La complexité de notre paysage académique – Universités, Collège de France, Muséum, Académies, Observatoires, Grandes écoles, Classes préparatoires, Instituts de recherche et, désormais, écoles d'informatique, pour ne pas parler de nos agences, alliances et autres initiatives d'« excellence » –, suscite souvent l'admiration de nos collègues étrangers. L'un d'eux me demandait un jour qui avait eu l'intelligence d'inventer tout cela.

La réponse est pourtant simple pour qui a lu *Le malade imaginaire* : ce système inefficace est l'œuvre des *Docteur Diafoirus*, ces partisans du « j'y suis j'y reste », ces maîtres d'éloquence pour qui « les emplois du temps sont déjà très chargés », qui ont refusé l'enseignement du grec et de l'hébreu au XVI^e siècle, se sont opposés à la théorie de la circulation du sang et aux sciences expérimentales au XVII^e siècle, ont ignoré les besoins de l'industrie aux XVIII^e et XIX^e siècles, n'ont pas compris l'importance de la recherche au XX^e siècle, pensent que l'on peut enseigner l'informatique en Classes préparatoires sans professeurs au XXI^e siècle et opposent leur incroyable inertie à tous ceux qui veulent enseigner une science vivante. ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.