

## Les principes de la chimie verte : douze bonnes raisons de réinterroger les protocoles en chimie



Wallace H. Carothers photographié dans son laboratoire en 1931 avec du néoprène, premier caoutchouc synthétique commercialisé avec succès (à gauche) et file d'attente lors d'un « Nylon Riots Day » en janvier 1946 à Oak Ridge (Tennessee) (à droite). À Pittsburg (Pennsylvanie), les magasins ont été pris d'assaut par plus de 35 000 personnes cherchant à se procurer l'une des 13 600 paires de bas en nylon en stock.

L'histoire du nylon illustre ainsi de manière exemplaire comment « *La chimie est à la base du développement économique et social des sociétés* » [2]. Mais ce développement n'est pas dépourvu d'ambivalences : l'essor de ces nouveaux matériaux accompagne aussi l'expansion de l'industrialisation, l'émergence de nouveaux risques environnementaux et, plus largement, le passage progressif d'une production fondée sur la nécessité à une production tournée vers le confort et la consommation de masse aux conséquences environnementales préoccupantes.

### Introduction : chimie, industrie et société

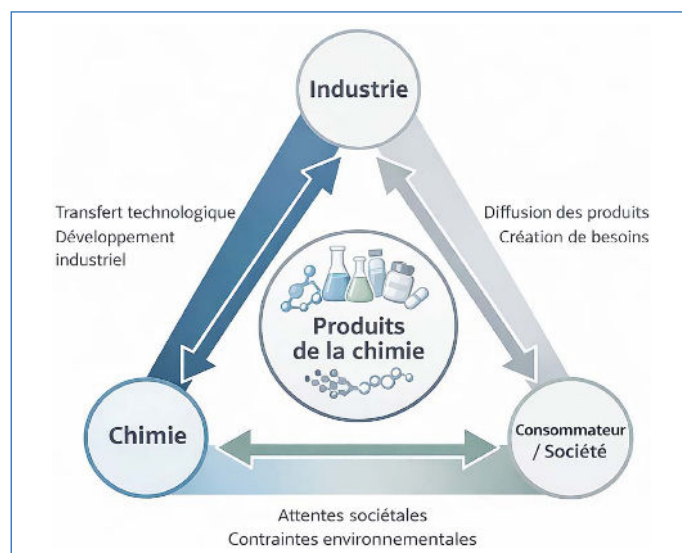
Le 29 avril 1937, dans une chambre d'hôtel de Philadelphie, Wallace H. Carothers (1896-1937) met fin à ses jours en avalant un verre contenant du jus de citron et du cyanure de potassium. Chimiste universitaire formé dans le monde académique et professeur à Harvard avant de rejoindre la firme américaine DuPont pour y mener des recherches fondamentales, Carothers est l'une des figures majeures de la chimie macromoléculaire naissante. Pourtant, l'inventeur, sujet à une profonde dépression, est convaincu au crépuscule de sa vie de l'inanité de ses efforts pour marquer durablement l'histoire de l'humanité par ses recherches.

Ironie tragique de l'histoire scientifique, ses travaux allaient pourtant transformer profondément l'industrie chimique et les sociétés contemporaines. Conscient, selon ses propres mots, que « *la polymérisation de petites molécules en molécules géantes ouvre un nouveau monde à la chimie* », Carothers met au point avec son équipe la fibre 66. Deux ans après sa mort, la firme DuPont présente cette innovation au public lors de l'Exposition universelle de New York, le 12 mars 1939, sous son nom commercial : le nylon. La nouvelle fibre synthétique est mise en scène à travers une paire de bas portée pour l'occasion par un mannequin surnommé « *Miss Chemistry* ».

La commercialisation du produit, l'année suivante, confirme immédiatement son succès. Lors du *Nylon Day*, le 15 mai 1940, près de quatre millions de paires de bas sont vendues en une seule journée et soixante-quatre millions jusqu'à la fin de l'année [1]. Très rapidement, les applications du nylon dépassent largement le domaine de la mode : utilisé pour les suspentes de parachutes, les poils de brosses à dents, les vêtements, ce polymère devient l'un des symboles de la puissance d'innovation de la chimie industrielle du xx<sup>e</sup> siècle.

### Penser autrement : l'approche scientifique des procédés en chimie verte

À l'aube du xxi<sup>e</sup> siècle, face à de nouveaux défis en matière de sécurité, de consommation énergétique et de préservation de l'environnement, les travaux de Paul Anastas et John Warner formalisent ce que l'on appelle désormais la chimie verte [3]. Les douze principes qu'ils proposent constituent moins une nouvelle chimie qu'une nouvelle manière de penser les procédés chimiques. Leur objectif est d'adapter la chimie – qu'elle soit de laboratoire ou industrielle – à de nouveaux cahiers des charges en intégrant plus systématiquement les dimensions environnementales, énergétiques et sécuritaires.



Mise en illustration et en équation des liens entre chimie, industrie et société.

Pris isolément, la plupart de ces principes n'étaient pas inconnus des chimistes. L'économie de matière, la réduction des déchets, la limitation des solvants ou encore la recherche de procédés plus efficaces faisaient déjà partie des préoccupations de nombreux laboratoires. L'originalité de la chimie verte réside toutefois dans leur mise en système : pour la première fois, ces considérations sont rassemblées en une véritable feuille de route capable de conduire à une relecture globale des protocoles expérimentaux, depuis l'enseignement scolaire et universitaire jusqu'aux applications industrielles, de la microchimie aux procédés à grande échelle.

Dans cette perspective, la chimie verte ne vise pas à déconstruire les connaissances chimiques accumulées au fil du temps. Elle propose plutôt une analyse critique des pratiques expérimentales. L'un de ses apports majeurs consiste ainsi à réexaminer les protocoles existants afin d'évaluer dans quelle mesure ils s'inscrivent – ou non – dans une démarche compatible avec les principes de la chimie verte. Cette démarche conduit inévitablement à interroger à la fois le protocole et celui qui le met en œuvre : pourquoi chauffer ? Pourquoi aussi longtemps ? Pourquoi utiliser une telle quantité de réactifs ? Pourquoi maintenir un courant d'eau de refroidissement pendant quinze minutes – alors qu'un robinet ouvert consomme environ quatorze litres par minute ? Pourquoi acidifier en excès pour neutraliser ensuite cet acide par un autre excès ?

Chaque protocole répond pourtant à un cahier des charges précis : rendement de la réaction, reproductibilité, lisibilité pédagogique, sécurité des manipulations, contraintes techniques ou économiques. La chimie verte ne cherche pas à renverser ces pratiques, mais invite à les replacer dans un système de critères plus large, englobant tous les protagonistes du monde de la chimie, acteurs, producteurs, consommateurs. « *Parce qu'elle interroge le chimiste sur ces pratiques, le force à les remettre en perspective et à introduire un doute raisonnable afin de faire tomber des certitudes parfois erronées, la chimie verte possède un rôle philosophique et questionne le chimiste sur sa posture éthique et responsable, sur le rôle qu'il se doit d'avoir et sur les choix qu'il [a] fait[s]* » [4]. Dans ce contexte, la chimie verte apparaît moins comme une rupture que comme l'aboutissement d'une évolution des pratiques scientifiques.

### Illustrer et faire comprendre la complexité de la synthèse chimique

Introduire de nouvelles exigences revient en effet à introduire de nouvelles variables dans l'évaluation d'une synthèse chimique. Pendant longtemps, le rendement a occupé une place centrale dans la culture chimique. Il constituait l'un des indicateurs privilégiés de la réussite expérimentale : une réaction efficace était avant tout une réaction donnant le maximum de produit.

La chimie verte contribue à déplacer ce cadre d'évaluation. Sans faire disparaître l'importance du rendement, elle l'inscrit désormais dans un ensemble plus vaste de paramètres : sécurité des opérateurs, consommation énergétique, nature des solvants, quantité de déchets produits ou encore coût global du procédé. L'efficacité d'une réaction ne se mesure plus uniquement à la quantité de produit obtenue, mais à l'ensemble des ressources mobilisées pour y parvenir.

La synthèse chimique apparaît alors moins comme une recherche d'optimisation unique que comme une chimie de compromis, dans laquelle plusieurs critères doivent être arbitrés simultanément. En ce sens, la chimie verte contribue

à transformer les manières de penser et d'évaluer la pratique chimique elle-même.

Si le nylon symbolise la puissance d'innovation de la chimie industrielle du xx<sup>e</sup> siècle, la chimie verte incarne, au début du xx<sup>e</sup> siècle, la tentative de repenser les conditions mêmes de cette innovation. Autrement dit, après un siècle marqué par l'invention de nouveaux matériaux, la question n'est plus seulement « *que peut produire la chimie ?* », mais comment la chimie doit produire.

### Conclusion : société, industrie et chimie

Dès les débuts de son histoire moderne, la chimie s'est trouvée confrontée à une question fondamentale : faut-il produire à partir de ressources naturelles renouvelables – issues des animaux ou des végétaux – ou à partir de ressources minérales et fossiles, souvent plus abondantes mais par nature épuisables ?

L'histoire de la synthèse de l'aspirine est, à cet égard, particulièrement emblématique. Antalgique à base d'acide acétylsalicylique (composé artificiel) parmi les plus diffusés au monde, sa production industrielle par Bayer repose sur les améliorations de sa synthèse apportées en 1897 par Felix Hoffmann, permettant d'obtenir un composé moins irritant que ceux à base d'acide salicylique naturel. Toutefois, une question demeure aujourd'hui : faut-il privilégier des ressources végétales, telles que l'écorce de saule blanc, ou recourir à des dérivés pétrochimiques issus de la chimie industrielle pour sa fabrication ?

Une interrogation comparable apparaît dans l'histoire des colorants synthétiques. Lorsque William Henry Perkin découvre en 1856 la mauvéine, premier colorant artificiel de synthèse, il ouvre la voie à une industrie entièrement nouvelle fondée sur l'exploitation du goudron de houille, qui concurrence progressivement les colorants naturels traditionnellement extraits de plantes comme l'indigotier.

Ces exemples montrent combien les choix techniques de la chimie ont toujours été étroitement liés aux attentes économiques et sociales de leur époque. Aujourd'hui, ces attentes évoluent. Les préoccupations environnementales, la gestion des ressources et les contraintes énergétiques conduisent la société à interroger à nouveau l'industrie, qui se tourne à son tour vers les chimistes.

La chimie verte n'apporte pas à elle seule des réponses définitives à ces questions complexes. Elle propose cependant un cadre de réflexion et d'action permettant d'imaginer des procédés plus sobres, plus sûrs et plus respectueux de l'environnement. En ce sens, elle invite à penser la chimie non seulement comme une science de la transformation de la matière, mais aussi comme une science du compromis entre innovation, industrie et société. Elle ouvre ainsi un espace de questionnement et de responsabilité, où chaque choix, chaque protocole, chaque transformation peut être repensé à l'aune de ses impacts [3].

[1] P. Ndiaye, *Du nylon et des bombes*, Belin, 2001, p. 161-162.

[2] J. Augé, M.-C. Schermann, *Chimie Verte, Concepts et applications*, EDP Science, 2016, p. 14.

[3] G. Chatel, Redonner du sens à la chimie verte : principes, leviers et perspectives, *L'Act. Chim.*, 2026, 511, p. 8-9, <https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/redonner-du-sens-a-la-chimie-verte-principes-leviers-et-perspectives-p8-n511/>

[4] S. Rup-Jacques, E. Jacques, *De la chimie fossile à la chimie durable*, Ellipses, 2017, p. 233.

Éric JACQUES\* est professeur de chimie en BTS au lycée Louis-Vincent, Metz, et formateur en chimie à la Maison pour la Science en Lorraine.

\* eric.jacques@ac-nancy-metz.fr