

s'agit, par exemple, d'utiliser des systèmes biologiques (bactéries, levures...) pour fabriquer et transformer des molécules grâce à des procédés enzymatiques ou de fermentation. L'utilisation de matériaux recyclables et la valorisation des déchets participent aussi de la chimie verte. Néanmoins, la confusion subsiste parfois et les usages du terme restent multiples en France. Si désormais la chimie verte ne rime plus seulement avec une chimie qui vise une gestion à long terme des ressources, et devient plus soucieuse des impacts toxiques sur la santé et l'environnement, certains lui préfèrent le terme de chimie durable, qui n'est pas défini précisément.

Et la toxicité, qui était pourtant la préoccupation originale de la chimie verte ?

Dès les débuts de la chimie verte, des chimistes ont proposé de déterminer, avec l'aide de toxicologues, les caractéristiques moléculaires responsables de la dangerosité des substances chimiques et ainsi de les éviter en concevant de nouvelles molécules qui en seraient dépourvues. Plusieurs méthodes étaient possibles : analyser les mécanismes d'action et utiliser les relations entre la structure et l'activité, éviter certains groupes fonctionnels ou minimiser la biodisponibilité des molécules, c'est-à-dire les modifier de telle sorte qu'elles n'arrivent pas aux organes qu'elles pourraient endommager.

Qu'en est-il aujourd'hui, 20 ans après les débuts de la chimie verte ? Aux États-Unis comme en France, les propriétés toxiques des

substances sont étudiées à diverses étapes des procédés : on privilégie des solvants moins ou pas dangereux (par exemple, l'eau ou le dioxyde de carbone supercritique remplacent, quand c'est possible, des solvants organiques), on réduit autant que possible les quantités de produits néfastes et on tient compte de la biodégradabilité des matériaux. Toutefois, si des avancées ont bien été enregistrées dans la conception des procédés, la relation entre chimie et toxicologie reste le maillon faible de la chimie verte lorsqu'il s'agit de prévoir que telle nouvelle molécule aura ou non des propriétés toxiques.

Une étude toxicologique encore timide

Certes, quelques illustrations de cette préoccupation toxicologique peuvent être évoquées. À l'Université Carnegie Mellon, aux États-Unis, des chimistes de l'équipe de Terry Collins collaborent avec des spécialistes des perturbations endocriniennes (hormonales) ; leur travail commun a permis de proposer des tests pour anticiper des propriétés indésirables dans la synthèse de nouvelles substances. L'Université de Californie à Berkeley développe aussi des recherches dans ce sens dans son Centre pour la chimie verte, via une équipe interdisciplinaire. À l'Université Yale, P. Anastas coordonne un projet récemment financé par la NSF et l'EPA, visant à développer des démarches toxicologiques prédictives applicables à la chimie de synthèse. En chimie, la modélisation joue déjà un rôle important pour concevoir et optimiser les procédés de synthèse. Il s'agit d'intégrer une composante environnementale aux modèles existants et d'en déduire une estimation de la toxicité des produits de synthèse.

En France, on peut citer la synthèse, par une équipe mixte du CNRS et de l'Université de Rennes, de mousses plastiques, les polyuréthanes biodégradables, sans utiliser d'isocyanates – des substances toxiques. Un autre exemple est l'élaboration, par la Chaire européenne de chimie nouvelle pour un développement durable ChemSuD et une équipe de l'Institut Charles Gerhardt de Montpellier, de résines époxy biosourcées

Les 12 principes de la chimie verte

- 1 Prévention :** il vaut mieux éviter la production de déchets qu'investir dans leur élimination.
- 2 Économie d'atomes et de réactifs :** les synthèses doivent optimiser l'incorporation, dans le produit final, des matériaux utilisés au cours du procédé.
- 3 Synthèse moins nocive :** les méthodes de synthèse doivent utiliser et créer des substances faiblement ou non toxiques pour les humains et pour l'environnement.
- 4 Produits moins toxiques :** pour une fonction donnée, les produits chimiques doivent être conçus de façon à minimiser leur toxicité.
- 5 Solvants moins dangereux :** lorsque c'est possible, éviter l'utilisation de substances auxiliaires (solvants, agents de séparation...) ou utiliser des substances inoffensives.
- 6 Économie d'énergie :** les besoins énergétiques des procédés chimiques ont des impacts sur l'économie et l'environnement et doivent donc être minimisés. Les méthodes de synthèse devraient avoir lieu à température et pression ambiantes.
- 7 Ressources renouvelables :** lorsque c'est faisable d'un point de vue technique et économique, les matières premières utilisées doivent être renouvelables.
- 8 Moins d'agents auxiliaires :** lorsque c'est possible, tout écart inutile au schéma de synthèse (utilisation d'agents bloquants, protection/déprotection, modification temporaire du procédé physique/chimique) doit être évité.
- 9 Catalyse :** les réactifs catalytiques (les plus sélectifs possibles) sont plus efficaces que les réactifs stœchiométriques.
- 10 Dégradation :** les produits chimiques doivent être conçus pour se dissocier en produits de dégradation non nocifs à la fin de leur durée d'utilisation, évitant ainsi leur persistance dans l'environnement.
- 11 Contrôle en temps réel :** des méthodologies analytiques doivent être développées afin de permettre une surveillance et un contrôle en temps réel des procédés, avant qu'il y ait apparition de substances dangereuses.
- 12 Limiter les accidents :** les substances utilisées dans un procédé chimique et leur forme devraient être choisies de façon à minimiser les risques d'accidents chimiques, incluant les rejets, les explosions et les incendies.