

Chimie verte : une vision et une expérience industrielles

Michel PHILIPPE

Le développement durable est un objectif clé dans le monde entier pour tous les chimistes, qu'ils soient issus de la recherche universitaire ou industrielle. Il est en effet essentiel d'en intégrer les principes à toutes les étapes du cycle de vie d'un produit, de sa conception à son utilisation par le consommateur.

Cet objectif fondamental, conforme aux principes du *Pacte Mondial des Nations Unies* [1], doit s'exprimer par des actions industrielles ambitieuses, basées sur des technologies et des produits respectueux de l'environnement.

De plus, l'innovation durable permettra de respecter au mieux les limites de notre planète, détaillées et suivies depuis 2009 par une équipe internationale du Stockholm Resilience Center, montrant en détail tous les impacts du développement humain [2].

La réduction des émissions des gaz à effet de serre constitue l'un des objectifs majeurs afin de limiter les impacts sur le changement climatique. Ceci pourra être réalisé notamment en développant des technologies à faible impact et en limitant l'utilisation des ressources fossiles, grâce à leur remplacement par des ressources durables, conformément aux principes de la chimie verte précédemment détaillés dans cette rubrique [3].

Au-delà de l'utilisation des matières premières biosourcées, le respect de ces principes est particulièrement stratégique pour le développement d'ingrédients respectueux de l'environnement.

Les trois piliers de la chimie verte

Cette approche s'appuie sur trois piliers fondamentaux, tels que décrit par le groupe L'Oréal, pionnier dans leur implémentation pour l'industrie cosmétique dès 2005 [4,5] :

- l'utilisation de matières premières renouvelables, notamment issues de co-produits des filières végétales existantes et de la « chimie circulaire » ;
- le développement de procédés respectueux de l'environnement, y compris des procédés biotechnologiques ;
- la validation du faible impact environnemental des produits obtenus.

Ces trois piliers sont inséparables pour assurer la conformité aux principes de la chimie verte. Par exemple, se concentrer uniquement sur l'origine végétale, ou à l'inverse, uniquement sur le développement de procédés respectueux de l'environnement, bien que cela soit nécessaire, ne suffit pas à répondre à ces principes.

De plus, il est fondamental de cibler le développement et l'intégration d'ingrédients à faible empreinte eau afin de limiter l'impact des futurs produits sur le milieu aquatique en fin de vie [6].

La chimie verte : la crédibilité par les mesures

Des outils de mesure, tels que la méthode de dosage du carbone 14 pour valider l'origine renouvelable des matières premières, sont essentiels pour valider le premier pilier, à savoir l'origine biosourcée des matières premières. Cette méthode établit une distinction très fiable et reproductible entre le carbone contemporain et celui dérivé de ressources fossiles.

Par exemple, en 2019, une étude a porté sur la recherche et la quantification de composés renouvelables par leur teneur intrinsèque en ^{14}C , appliquée aux ingrédients cosmétiques [7]. Ainsi, 216 ingrédients cosmétiques représentatifs, à base de carbone et couvrant différentes propriétés et structures, ont été soigneusement sélectionnés et analysés à l'aide de cette technique, validant sa contribution essentielle à l'évaluation de l'origine renouvelable d'un ingrédient.

La cohérence avec le deuxième pilier, fondé sur le développement de voies et procédés de synthèse durables pour des ingrédients éco-respectueux, est basée sur des évaluations et mesures spécifiques à la chimie verte, telles que les calculs d'économie d'atomes, permettant de maximiser l'incorporation des atomes des réactifs dans le produit final, ou le facteur E [8], qui évalue la masse de déchets générés par les procédés de synthèse.

Cette dernière mesure revêt une importance particulière, car elle peut être estimée dès la phase d'écoconception, au sein d'un laboratoire académique ou industriel, puis réévaluée

LES 3 PILIERS DE LA CHIMIE VERTE, fondamentaux pour concevoir des produits durables



Ces trois piliers sont interdépendants et doivent être optimisés conjointement.

jusqu'au stade de développement industriel, afin notamment de réduire au minimum les volumes de solvants et de déchets de procédés.

De plus, l'implémentation d'une stratégie de chimie verte constitue un levier essentiel pour améliorer les procédés existants, par exemple en sélectionnant, sur la base de critères rigoureux, des solvants plus sûrs, comme le propose un consortium d'industriels de la pharmacie [9], ou en mettant en place des outils spécifiques, tels que celui du groupe Mane dans l'industrie des parfums [10].

Concernant le troisième pilier et à titre d'exemple, l'évaluation de l'impact environnemental en milieu aqueux pourra notamment être réalisée par :

- La mesure de la biodégradabilité qui correspond à la capacité d'un ingrédient à être entièrement biodégradé par les microorganismes de l'environnement. Cela est notamment très important pour les produits ayant un usage dispersif et continu.
- L'évaluation de l'empreinte eau définie par le volume théorique d'eau de dilution nécessaire pour obtenir une concentration sans impact prévisible pour l'environnement, après usage du produit par le consommateur.

La biodégradation pourra notamment être mesurée par un test OCDE (301/310) qui mesure le taux de carbone dégagé pendant 28 jours en présence de microorganismes. Quant à l'empreinte eau, elle prend en compte l'écotoxicité aquatique et la dégradation [6].

La chimie verte, ses principes clés pour la standardisation au niveau mondial : l'exemple de l'évaluation de la naturalité en cosmétique

L'utilisation et le développement de ces mesures permettent non seulement d'évaluer précisément l'origine, les procédés de synthèse et les impacts des produits, afin d'assurer leur conformité avec les 12 principes, mais aussi d'évaluer avec crédibilité la naturalité des ingrédients, notamment dans le domaine cosmétique, répondant ainsi à une demande très forte des consommatrices et consommateurs.

Il est en effet essentiel d'évaluer précisément l'origine ainsi que les procédés d'extraction ou/et de transformation de chacun des ingrédients contenus dans les formulations cosmétiques sur le marché [11]. Cette évaluation à grande échelle permet d'acquérir une connaissance approfondie de leur naturalité et de leur degré de dénaturation.

Une telle approche peut être stratégique pour la gestion du portefeuille des matières premières industrielles. Elle permet non seulement d'innover par la sélection de nouvelles matières premières éco-respectueuses, mais également de substituer, grâce une approche rationnelle et rigoureuse, les matières premières et les procédés existants à plus fort impact environnemental par des alternatives à plus faible impact.

Cet enjeu a conduit, après plusieurs années de travail d'experts internationaux, à la rédaction des standards ISO 16128-1 et 16128-2, qui définissent des lignes directrices relatives aux ingrédients d'origine naturelle en cosmétique [12].

Standard ISO 16128



International
Organization for
Standardization



Lignes directrices sur les définitions techniques et les critères des ingrédients et produits cosmétiques naturels et biologiques

Il est recommandé d'appliquer les principes de la chimie verte aux procédés.

Référence aux 12 principes de la chimie verte

(Anastas & Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, 1998)

www.epa.gov/greenchemistry

La chimie verte : de l'écoconception au développement durable

En résumé, la chimie verte constitue une approche essentielle dans le cadre de l'écoconception d'ingrédients, en amont de leur développement pour une mise sur le marché. Elle contribue pleinement à une démarche préventive et innovante, visant à réduire les impacts négatifs d'un produit ou service sur l'environnement, tout en préservant ses qualités d'usage. Elle s'inscrit ainsi dans la définition de l'écoconception telle que décrite par la norme internationale ISO 14006:2020 [13]. Cette cohérence met en évidence l'importance de la « pensée cycle de vie », essentielle pour un développement durable prenant en compte les impacts environnementaux d'un produit à toutes les étapes de son cycle de vie.

[1] L. Kingo, Le Pacte mondial des Nations Unies : proposer des solutions aux défis mondiaux, Nations Unies, www.un.org/fr/chronique/le-pacte-mondial-des-nations-unies-proposer-des-solutions-aux-d%C3%A9fis-mondiaux

[2] J. Rockström *et al.*, Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity, *Ecol. Soc.*, **2009**, *14*(2), 32, <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>

[3] G. Chatel, Redonner du sens à la chimie verte : principes, leviers et perspectives, *L'Act. Chim.*, **2026**, *511*, p. 8-9.

[4] M. Philippe, B. Didillon, L. Gilbert, Industrial commitment to green and sustainable chemistry: using renewable materials & developing eco-friendly processes and ingredients in cosmetics, *Green Chem.*, **2012**, *14*, p. 952-56, <https://doi.org/10.1039/C2GC16341A>

[5] J. Hitce *et al.*, UN sustainable development goals: how can sustainable/green chemistry contribute? Green chemistry as a source of sustainable innovations in the cosmetic industry, *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, **2018**, *13*, p. 164-69, <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.06.019>

[6] J. L'Haridon *et al.*, Ecodesign of cosmetic formulae: methodology and application, *Int. J. Cosmet. Sci.*, **2018**, *40*, p. 165-77, <https://doi.org/10.1111/ics.12448>

[7] B. Boussouira, L. Bui Bertrand, M. Philippe, L. Gilbert, Tracing and quantifying renewable compounds by their intrinsic ¹⁴C content. Application to cosmetic ingredients, *Annal. falsif. expert. chim. toxicol.*, **2019**, *990*, p. 32-39

[8] R. Sheldon, The E factor: fifteen years on, *Green Chem.*, **2007**, *9*, p. 1273-83, <https://doi.org/10.1039/B713736M>

[9] D. Prat *et al.*, CHEM21 selection guide of classical- and less classical-solvents, *Green Chem.*, **2016**, *18*, p. 288-96, <https://doi.org/10.1039/C5GC01008J>

[10] T.V. Tony Phan, C. Gallardo, J. Mane, GREEN MOTION: a new and easy to use green chemistry metric from laboratories to industry, *Green Chem.*, **2015**, *17*, p. 2846-52, <https://doi.org/10.1039/C4GC02169J>

[11] M. Philippe, B. Didillon, L. Gilbert, Naturalness: its assessment in the development of sustainable and green chemistry ingredients. An industrial commitment, *Annal. falsif. expert. chim. toxicol.*, **2016**, *985*, p. 36-43.

[12] ISO 16128-1:2016, Lignes directrices relatives aux définitions techniques et aux critères applicables aux ingrédients et produits cosmétiques naturels et biologiques – Partie 1 : Définitions des ingrédients ; ISO 16128-2:2017, *ibid.*, – Partie 2 : Critères relatifs aux ingrédients et aux produits.

[13] ISO 14006:2020, Systèmes de management environnemental – Lignes directrices pour intégrer l'éco-conception.

Michel PHILIPPE*, consultant Eco-design, Green Chemistry and Naturalness, ex-L'Oréal Fellow, président de la division Chimie industrielle de la Société Chimique de France.

*michel.philippe7@wanadoo.fr