

De la molécule fossile au carbone circulaire : la chimie face à son tournant

La chimie traverse aujourd'hui une mutation profonde, comparable à celles qui ont marqué son histoire au ^{xx}e siècle. Mais, à la différence des révolutions précédentes, cette transformation ne repose pas uniquement sur des avancées scientifiques ou technologiques : elle est désormais largement dictée par une contrainte globale, systémique et incontournable – le changement climatique.

Limiter le réchauffement global et atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 suppose une transformation radicale du système énergétique mondial. Cette transition, bien que progressive, est déjà engagée et irréversible. Selon les scénarios d'organismes de référence tels que l'Agence internationale de l'énergie (IEA), Det Norske Veritas (DNV) ou encore Energy Institute (EI), la part des énergies fossiles dans la consommation mondiale, aujourd'hui proche de 80 %, pourrait chuter entre 15 % et 60 % d'ici 2050, selon les trajectoires retenues [1-3].

Dans ce contexte, la chimie se trouve à la croisée des chemins. À la fois dépendante du carbone fossile et indispensable à la fabrication de matériaux, d'intermédiaires et de produits essentiels à nos sociétés, elle doit se réinventer. Pour la chimie européenne en particulier, cette transition pose une question centrale : comment concilier défossilisation, compétitivité et souveraineté industrielle ? La chimie verte, entendue comme une démarche de transformation profonde des pratiques, des ressources et des procédés, n'est plus une option : elle constitue désormais une nécessité stratégique, scientifique et industrielle.

Transition énergétique : impacts majeurs sur la chimie

La transition énergétique en cours est d'abord portée par une transformation des usages, en particulier dans le secteur des transports. Aujourd'hui encore, ce dernier représente près de 65 % de la demande mondiale en pétrole [2]. Mais cette situation est appelée à évoluer rapidement sous l'effet combiné de l'électrification des véhicules terrestres, du développement des carburants alternatifs et des politiques publiques de décarbonation.

À l'horizon 2050, les carburants d'origine pétrolière devraient voir leur part diminuer significativement, au profit de l'électricité, de l'hydrogène, des biocarburants et des *e-fuels*, c'est-à-dire des carburants de synthèse produits à partir d'hydrogène et de CO₂. Cette évolution est particulièrement marquée dans le transport routier, où les véhicules électriques pourraient représenter entre 40 et 70 % du parc automobile mondial (selon le scénario APS – *Announced Pledges Scenario* – de l'IEA). Elle concerne aussi l'aviation et le transport maritime, où les carburants durables, notamment le SAF (*Sustainable Aviation Fuel*) et les carburants synthétiques joueront un rôle croissant [1,4,5].

Cette baisse structurelle de la demande en carburants fossiles entraîne mécaniquement une transformation profonde du secteur du raffinage. Or, historiquement, la chimie est étroitement liée à ce secteur, dont elle utilise les fractions légères (naphta, gaz de raffinerie) comme matières premières. Paradoxalement, dans un monde en transition énergétique, la chimie pourrait devenir un débouché encore plus important pour le pétrole. Selon BloombergNEF (BNEF), la part de

la demande pétrolière destinée à la chimie pourrait passer d'environ 10 % aujourd'hui à près de 18 % en 2050, voire jusqu'à 40 % dans certains scénarios de neutralité carbone [1,6,7].

Ainsi, même si la chimie doit réduire son empreinte carbone, elle restera un acteur central de la valorisation du carbone, au cœur d'un système énergétique en recomposition. La question n'est donc pas seulement de réduire les émissions associées aux procédés chimiques, mais de repenser progressivement l'origine même du carbone utilisé par la chimie.

Raffineries en transition : du carburant aux molécules

La baisse de la demande en carburants traditionnels se traduit déjà par des surcapacités dans le raffinage, notamment en Europe. Plusieurs installations ont annoncé leur fermeture ou leur reconversion ces dernières années (Shell, BP, etc.), et l'IEA estime qu'entre 1 et 1,5 million de barils par jour de capacité de raffinage pourraient être menacés en Europe d'ici 2030.

Face à cette situation, les raffineries évoluent selon plusieurs trajectoires. La première consiste à renforcer l'intégration entre raffinage et pétrochimie. Les modèles dits *refining-to-chemicals* ou *crude-to-chemicals* visent à maximiser la production de molécules chimiques à partir du pétrole brut, en réduisant la part dédiée aux carburants. Cette stratégie est particulièrement développée au Moyen-Orient et en Amérique du Nord, où les acteurs cherchent à capter davantage de valeur ajoutée dans un contexte d'abondance relative des ressources fossiles. La seconde transformation est celle des bioraffineries. Ces installations utilisent des ressources renouvelables et/ou secondaires – huiles végétales, biomasse lignocellulosique, déchets organiques ou déchets plastiques – pour produire des carburants et des intermédiaires chimiques. Le *co-processing*, qui consiste à traiter simultanément des ressources fossiles, végétales ou matières recyclées dans des unités existantes, peut constituer une étape intermédiaire pragmatique, permettant de limiter les investissements tout en amorçant la transition. Plus flexibles et plus territorialisées, ces bioraffineries évoluent vers un double objectif : fournir des carburants à plus faible empreinte carbone, notamment le SAF, et produire des intermédiaires chimiques à plus forte valeur ajoutée.

Décarboner l'énergie, défossiliser la matière

Une spécificité fondamentale distingue la chimie des autres secteurs industriels : elle ne consomme pas seulement de l'énergie, elle consomme du carbone comme matière première. Aujourd'hui, 85 à 90 % des matières premières de la chimie sont d'origine fossile [6].

Dans ce contexte, parler de « décarbonation » de la chimie est en partie impropre. Le carbone reste indispensable à la fabrication des molécules organiques. L'enjeu n'est donc pas de supprimer le carbone, mais de réduire progressivement la dépendance au carbone fossile : autrement dit, de défossiliser les matières premières de la chimie [7]. Trois grandes voies se dessinent :

- La biomasse, qui fournit du carbone biogénique renouvelable (sucres, huiles, lignine, etc.) ;

Définition du mois

Le **CCU (Carbon Capture and Utilization, ou captage et utilisation/valorisation du CO₂)** désigne l'ensemble des technologies qui consistent à capter du dioxyde de carbone, issu par exemple de fumées industrielles ou directement de l'air, puis à le réutiliser comme matière première. Le CO₂ capté peut ainsi être converti en molécules, carburants de synthèse ou matériaux, contribuant à une logique d'économie circulaire du carbone. En chimie verte, le CCU constitue une voie de défossilisation : il ne s'agit pas seulement de réduire les émissions, mais aussi de substituer une partie du carbone fossile utilisé par la chimie. Les recherches actuelles visent aujourd'hui à améliorer l'efficacité des procédés de conversion, à intégrer des sources d'énergie bas carbone, à mobiliser de l'hydrogène plus durable lorsque cela est nécessaire, et à mieux évaluer le devenir du carbone dans les produits formés. Ces enjeux constituent des défis importants pour les prochaines années afin de faire du CCU une brique stratégique de la chimie verte.

- Le recyclage, mécanique ou chimique, permettant de réintroduire du carbone déjà utilisé ;
- Le *Carbon Capture and Utilization* (CCU), qui consiste à capter le CO₂ et à le réutiliser comme matière première.

Selon une analyse du nova-Institute, ces différentes sources pourraient, à l'horizon 2050, contribuer de manière relativement équilibrée au mix de matières premières de la chimie [8,9]. Mais cette transition n'est pas qu'un changement d'origine du carbone. Ces nouvelles sources de carbone sont souvent plus oxydées que les hydrocarbures fossiles : leur transformation en molécules utiles nécessite donc un apport supplémentaire d'énergie et, surtout, d'hydrogène.

L'hydrogène devient ainsi une brique essentielle de la chimie de demain. L'hydrogène « vert », produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable, pourrait représenter jusqu'à 60-70 % de la production mondiale d'hydrogène en 2050, mais son coût, encore élevé aujourd'hui, demeure un verrou majeur [10-12].

La chimie doit se réinventer : l'innovation comme clé

La transformation des ressources entraîne nécessairement une transformation des procédés. Les nouvelles matières premières – biomasse, CO₂, déchets ou matières recyclées – ne peuvent pas être traitées avec les mêmes technologies que le pétrole. Elles imposent de repenser les voies de synthèse, les catalyseurs, les conditions opératoires et les modèles industriels.

Plusieurs axes d'innovation se dessinent.

Le premier concerne les nouveaux procédés chimiques. L'électrochimie, en particulier, ouvre des perspectives importantes. Les approches dites *power-to-chemicals* utilisent de l'électricité renouvelable pour produire de l'hydrogène, qui peut ensuite être mobilisé pour transformer le CO₂ en molécules comme le méthanol ou pour produire d'autres intermédiaires clés comme l'ammoniac. Ces voies sont déjà en développement, même si leur déploiement à grande échelle est attendu plutôt après 2040 en raison des besoins énergétiques considérables [11-13].

Le second axe porte sur les nouveaux matériaux et polymères. L'émergence de polymères biosourcés, recyclables ou biodégradables (PLA, PHA, PEF, etc.) illustre cette dynamique. Parallèlement, les molécules dites « *drop-in* » biosourcées permettent de reproduire des molécules existantes (PE, PET, PP) à partir de ressources renouvelables, facilitant leur intégration dans les chaînes de valeur existantes.

Le troisième axe concerne l'optimisation des procédés existants. Réduction de la consommation énergétique, intensification des procédés, catalyse plus sélective, utilisation de

réacteurs continus : autant de leviers permettant de réduire l'empreinte environnementale de la chimie, en cohérence avec les principes de la chimie verte [14].

Vers une chimie du carbone circulaire

La chimie de demain ne sera plus fondée uniquement sur le pétrole. Elle reposera sur un ensemble diversifié de ressources – biomasse, CO₂, déchets recyclés – intégrées dans des cycles de matière plus circulaires et alimentées par une énergie décarbonée.

Ce passage d'une chimie du carbone fossile à une chimie du carbone circulaire constitue l'un des grands défis scientifiques et industriels du XXI^e siècle. Il implique une transformation profonde des technologies, des modèles économiques et des compétences.

Dans ce contexte, la formation joue un rôle central. Former des chimistes capables de comprendre ces nouveaux enjeux, de maîtriser des disciplines à l'interface (chimie, énergie, biotechnologies, science des matériaux) et d'innover dans un environnement complexe est une priorité, en particulier en Europe.

Car si l'Europe ne dispose pas de ressources fossiles abondantes, elle possède en revanche des atouts majeurs : une base scientifique solide, des ressources en biomasse et en déchets, et un cadre réglementaire structurant. À condition d'investir dans la formation, l'innovation et le passage à l'échelle, elle peut jouer un rôle de premier plan dans la transition vers une chimie verte plus respectueuse de l'environnement.

La chimie verte n'est donc pas seulement un concept : elle est une trajectoire. Une trajectoire exigeante, mais indispensable, pour construire une chimie à la fois performante, responsable et adaptée aux défis de demain.

[1] International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2024*, scénario *Net Zero Emissions by 2050 (NZE)*, 2024.

[2] DNV, *Energy Transition Outlook 2024*, 2024.

[3] Energy Institute, *Statistical Review of World Energy 2024*, 73rd ed., 2024.

[4] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Rapports et trajectoires de décarbonation du secteur aérien*.

[5] International Maritime Organization (IMO), *Stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre du transport maritime (GHG Strategy)*.

[6] BloombergNEF (BNEF), *Petrochemical Feedstock Outlook*, 2022.

[7] Rystad Energy, *The Future of Refining: What Lies Ahead to 2050?*, 2024.

[8] nova-Institute, *Evaluation of Recent Reports on the Future of a Net-Zero Chemical Industry in 2050*, oct. 2024.

[9] nova-Institute, *Biobased Building Blocks & Polymers – Webinar*, 6 mai 2024.

[10] International Energy Agency (IEA), *The Refinery of the Future*, mai 2024.

[11] International Energy Agency (IEA), *Global Hydrogen Review 2025*, sept. 2025.

[12] DNV, *Hydrogen Forecast to 2050*, 2022.

[13] IDTechEx, *Carbon Capture & Utilization (CCU) Market 2024–2044*, 2024.

[14] P. Anastas, J. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, 1998.

Cet article a été préparé par **Pascale VIÉ**, senior strategy manager & group economist, Strategy & corporate planning, SYENSQO, co-directrice industrielle de la Chimie Verte Academy (pascale.vie@syensqo.com).

La rubrique « Chimie Verte Insights » est coordonnée par **Grégory CHATEL**, directeur de la Chimie Verte Academy, maître de conférences HDR à l'Université Savoie Mont Blanc (gregory.chatel@univ-smb.fr). Elle est en téléchargement libre sur www.lactualitechimique.org