

COMMENT PEUT-ON RÉDUIRE NOTRE EMPREINTE CARBONE ?

Éric Bausson

Partie des programmes de physique-chimie associées

- ▶ Programme de physique-chimie de la classe de seconde générale et technologique – partie « Constitution et transformations de la matière »
- ▶ Programme de physique-chimie des classes de première et de terminale STI2D – parties « Matière et matériaux » et « Ondes et information ».
- ▶ Programme de la spécialité physique-chimie de terminale générale – partie « Constitution et transformations de la matière »
- ▶ Mots-clés : empreinte carbone, nanochimie, composites, polymères, matériaux biosourcés, alliages, acide polylactique, dihydrogène

INTRODUCTION

La mobilité est aujourd'hui au cœur des enjeux environnementaux, économiques et sociétaux. Face aux émissions de gaz à effet de serre (GES) liées aux transports, importantes comme nous le montre la **figure 1**, la chimie joue un rôle essentiel dans la transition vers des modes de déplacement plus durables.

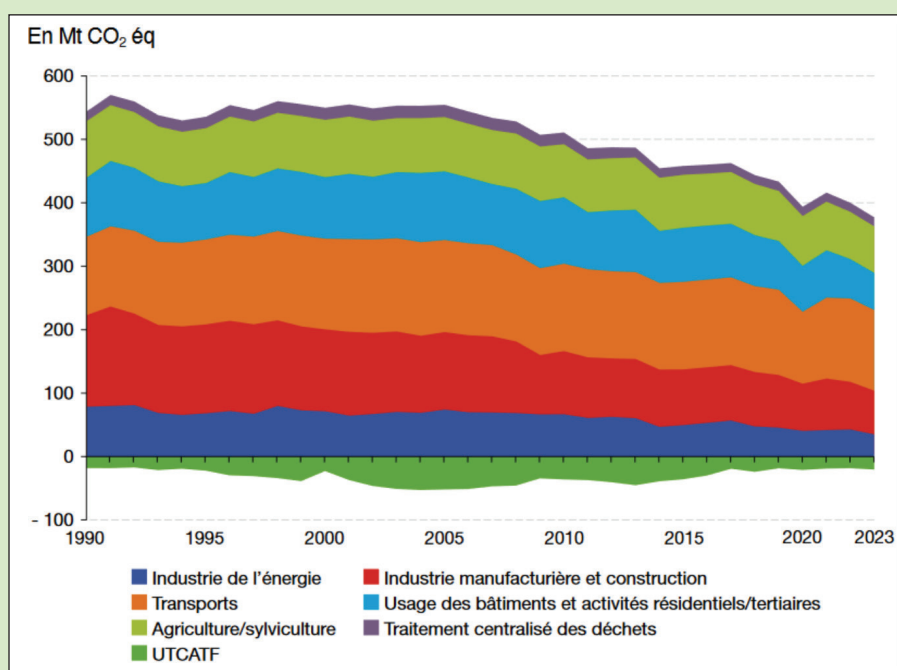


Figure 1. Évolution des émissions de GES en France par secteur entre 1990 et 2023 [les données 2023 sont une estimation préliminaire]. Source Citepa, 2024, <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone-ressources/article/les-emissions-francaises-de-gaz-a-effet-de-serre>.

En effet, l'innovation chimique permet de concevoir de nouveaux matériaux, carburants et procédés capables de réduire l'empreinte carbone des véhicules tout au long de leur cycle de vie. L'objectif n'est plus seulement d'améliorer les performances techniques, mais aussi de limiter la consommation de ressources fossiles et les impacts environnementaux associés.

Dans ce contexte, les matériaux biosourcés occupent une place croissante. Issus de ressources renouvelables comme le bois, le lin, le chanvre ou encore l'amidon, ils permettent de remplacer partiellement certains matériaux pétrosourcés traditionnels. Par exemple, les fibres naturelles sont désormais utilisées dans les matériaux composites automobiles pour alléger les véhicules tout en conservant de bonnes propriétés mécaniques. Des polymères biosourcés, tels que le PLA (acide polylactique) ou certains polyamides issus d'huiles végétales, trouvent également des applications dans les habitacles ou les pièces techniques.

Parallèlement, la chimie développe des matériaux innovants à haute performance destinés à réduire les consommations énergétiques. Les composites à fibres de carbone, les alliages légers à base d'aluminium ou de magnésium, ainsi que les matériaux nanostructurés permettent d'alléger considérablement les véhicules. Or, un véhicule plus léger nécessite moins d'énergie pour se déplacer, ce qui diminue directement les émissions de CO₂. Dans le domaine des mobilités électriques, les avancées en électrochimie ont conduit à la mise au point de batteries lithium-ion plus performantes, mais aussi à des recherches sur des technologies plus durables comme les batteries solides ou les matériaux de stockage utilisant moins de métaux critiques.

Ainsi, la chimie apparaît comme un levier majeur de la mobilité du futur. Grâce aux matériaux biosourcés et aux innovations technologiques, elle contribue à concilier performance, sécurité et réduction de l'impact environnemental. Les défis restent importants, notamment en matière de recyclage, de disponibilité des ressources et de bilan global des procédés, mais les progrès actuels montrent que la transition vers des mobilités plus durables repose largement sur les avancées de la chimie moderne.

DES MATÉRIAUX TOUJOURS PLUS LÉGERS

L'un des leviers les plus efficaces vers cette transition consiste à diminuer la masse des véhicules afin de réduire leur consommation énergétique.

Les recherches actuelles portent notamment sur :

- ▶ les composites à fibres de carbone recyclées ;
- ▶ les composites biosourcés à base de fibres naturelles ;
- ▶ les polymères biosourcés plus facilement recyclables ;
- ▶ les alliages utilisés par exemple dans des jantes de roue (voir figure 2) ;
- ▶ les matériaux nanostructurés.

L'objectif est double, celui de réduire la consommation énergétique (carburant, etc.) pendant l'usage tout en diminuant l'empreinte carbone de la fabrication. Les fibres végétales, incorporées en qualité de renforts au sein des plastiques de l'habitacle d'une automobile, d'un train ou d'un avion, deviennent particulièrement intéressantes car elles présentent un excellent rapport masse/rigidité.

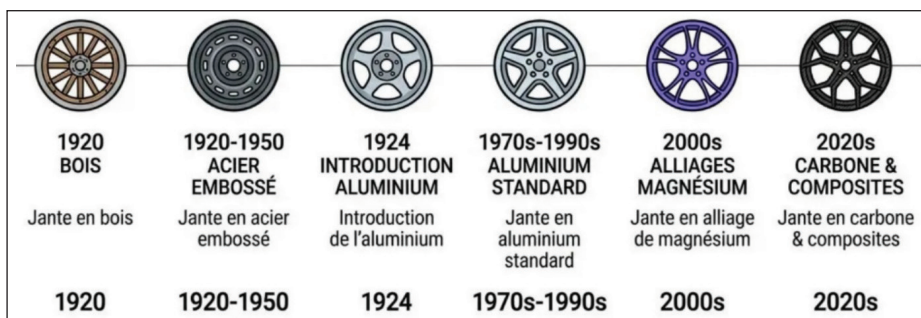
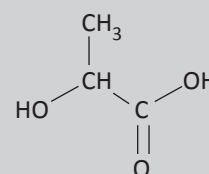


Figure 2. Évolution de la composition des jantes. D'après <https://gt-pulse.com/blogs/infos/le-meilleur-metal-pour-les-jantes?srltid=AfmB0ortWyHYWSXXdjgph5PAUiNncv5ErgB-GzqkJ0tiqNL2bWX9qvYq>.

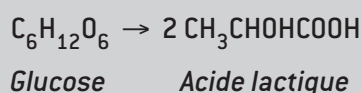
Zoom sur l'acide polylactique (PLA)

L'acide polylactique (PLA), est un exemple de biopolymère utilisé dans le secteur de l'automobile, principalement employé pour les habillages intérieurs, et pour d'autres applications indirectes de mobilité (casque de vélo, etc.).

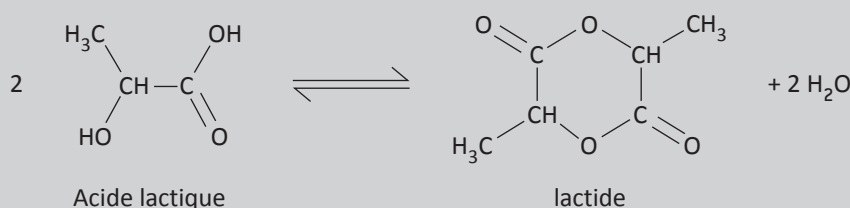
Il est fabriqué à partir d'acide lactique (représenté ci-contre), de nom officiel « acide 2-hydroxypropanoïque », obtenu par fermentation bactérienne d'amidon ou de sucre.



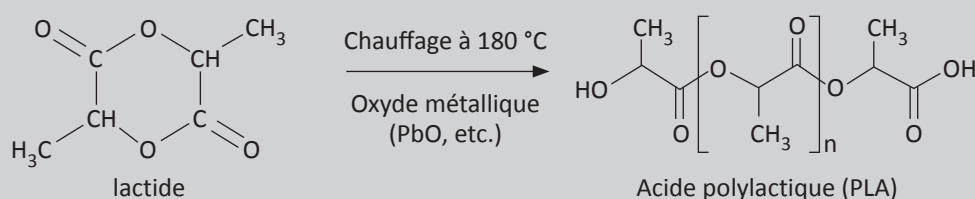
Par exemple, à partir d'amidon de maïs, glucide complexe formé d'unités de glucose $C_6H_{12}O_6$, la fermentation à l'aide de bactéries lactiques permet de former de l'acide lactique suivant l'équation :



L'acide lactique ainsi formé conduit au lactide à la suite d'une cyclisation accompagnée d'une perte de molécules d'eau :



puis en acide polylactique suivant divers procédés possibles, dont celui ci-dessous :



Le PLA présente plusieurs avantages. Il est produit à partir d'une matière première 100 % renouvelable permettant la réduction des émissions de CO_2 par rapport à de nombreux plastiques pétrosourcés. Il a une faible masse volumique ($1,25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) abaissant la consommation énergétique de nos véhicules. Il présente des inconvénients comme une résistance limitée aux températures élevées, une fragilité relativement importante et une tenue au choc inférieure à celle de certains polymères techniques. Pour toutes ces raisons, il est souvent utilisé seul pour des pièces non structurales ou renforcé par des fibres naturelles (lin, chanvre, cellulose, bambou) pour la fabrication de matériaux composites biosourcés.

Zoom sur des matériaux nanostructurés omniprésents

Lors de sa conférence « Comment la chimie à l'échelle nanométrique influence les performances des aimants permanents », Baptiste Gault présente les aimants permanents nanostructurés, composants essentiels de nombreux moteurs électriques utilisés dans les véhicules électriques, les trains, les vélos à assistance électrique ou encore les éoliennes produisant l'électricité nécessaire à ces mobilités.

Un aimant au néodyme est un aimant permanent composé d'un alliage de néodyme (Nd), de fer (Fe) et de bore (B). Il a une structure extrêmement contrôlée à l'échelle du nanomètre comme illustré en **figure 3** par la répartition spatiale des atomes :

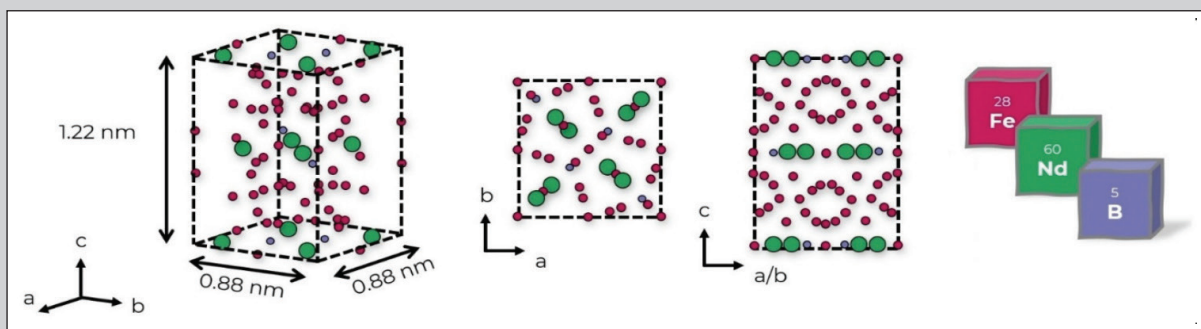


Figure 3. La structure atomique des aimants permanents $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Source : Baptiste Gault, « Comment la chimie à l'échelle nanométrique influence les performances des aimants permanents », Chimie et mobilités, ISBN : 978-2-7598-4101-1.

Il permet d'augmenter le rendement des moteurs électriques, de réduire les pertes énergétiques, de diminuer la masse des moteurs et de limiter la quantité de néodyme (Nd), terre rare nécessaire.

La conférence « La chimie au cœur des évolutions technologiques de batteries » de Patrice Simon met indirectement en jeu de nombreux matériaux nanostructurés : parmi eux, les nanoparticules de phosphate de fer et lithium (LiFePO_4), les oxydes lamellaires nanostructurés riches en nickel (Ni), le silicium (Si) nanostructuré pour les anodes et les matériaux pour batteries solides. L'intérêt est d'améliorer la densité énergétique, la vitesse de recharge, la durée de vie et la sécurité des accumulateurs.

La conférence de Jean-François Gérard sur « Les matériaux composites au cœur des systèmes de mobilité » met en lumière l'évolution vers des composites multifonctionnels. Les recherches actuelles portent notamment sur les nanotubes de carbone, le graphène, les nanocelluloses et les nanoparticules de silice. Ces renforts permettent d'obtenir des matériaux plus légers et plus résistants, réduisant ainsi la consommation énergétique des véhicules.

La conférence de Stefan Drawin « La chimie au secours des pièces chaudes dans les moteurs aéronautiques » concerne également des matériaux dont les performances dépendent fortement de leur structure parfois nanométrique. Les applications visées sont les barrières thermiques, les superalliages et les revêtements anti-oxydation. Ces matériaux permettent de faire fonctionner les moteurs à plus haute température, donc avec un meilleur rendement.

LES BATTERIES EN CONSTANTE ÉVOLUTION

La chimie des accumulateurs reste l'un des sujets majeurs.

Plusieurs tendances se dégagent actuellement :

- ▶ réduction de l'usage du cobalt (extrêmement rare dans la croûte terrestre ; la République démocratique du Congo en est le quasi unique fournisseur) ;
- ▶ durabilité plus importante de batteries lithium-fer-phosphate (nombre plus important de cycles complets charge 0-100 % puis décharge), utilisées par exemple dans les véhicules électriques et les batteries domestiques associées aux panneaux solaires ;
- ▶ développement des batteries au sodium Na-ion (le sodium Na attire particulièrement l'attention car il est abondant, peu coûteux et mieux réparti géographiquement que le lithium Li) ;
- ▶ sécurisation et densité énergétique plus conséquente des batteries solides car elles remplacent l'électrolyte liquide, solvant chimique hautement inflammable, des batteries actuelles par un matériau solide qui ne l'est pas ;
- ▶ amélioration du recyclage des métaux critiques.

LES CARBURANTS BAS CARBONE

Pour les secteurs difficiles à électrifier, notamment l'aéronautique et une partie du transport lourd, la chimie travaille sur :

- ▶ les carburants durables d'aviation (SAF et e-SAF), carburants alternatifs non fossiles qui remplacent en partie le kérosène. Le SAF est produit à partir de la biomasse (huiles de cuisson usagées, graisses animales, résidus de bois, ou cultures intermédiaires poussant sur des sols non arables) et le e-SAF à partir de CO_2 capturé dans l'air et de l'hydrogène vert H_2 (produit par électrolyse de l'eau avec de l'électricité d'origine renouvelable) ;
- ▶ les biocarburants de deuxième génération issus de la transformation de la lignocellulose contenue dans les résidus agricoles (paille) et forestiers (bois), dans des plantes provenant de cultures dédiées (taillis à croissance rapide) ou de la valorisation des déchets industriels ;
- ▶ les e-fuels synthétisés à partir de dihydrogène vert et de CO_2 capté ;
- ▶ le méthanol vert et l'ammoniac pour certaines applications maritimes.

Ces solutions permettent de réduire les émissions de CO_2 sans remplacer immédiatement toutes les infrastructures existantes.

LE DIHYDROGÈNE H_2

Le dihydrogène reste un axe stratégique, particulièrement pour :

- ▶ les trains sur lignes non électrifiées ;
- ▶ les poids lourds ;
- ▶ certains usages industriels liés aux transports.

Les recherches concernent surtout :

- ▶ les électrolyseurs plus efficaces (rendement et consommation énergétique) ;
- ▶ les catalyseurs utilisant moins de métaux nobles et plus abondants (moins chers !) ;
- ▶ le stockage solide du dihydrogène dans des hydrures métalliques ;
- ▶ les piles à combustible offrant un meilleur rendement.

Mais il faudra optimiser le coût énergétique de production et disposer d'électricité bas carbone abondante.

Zoom sur la production de dihydrogène H_2 « décarboné » par électrolyse

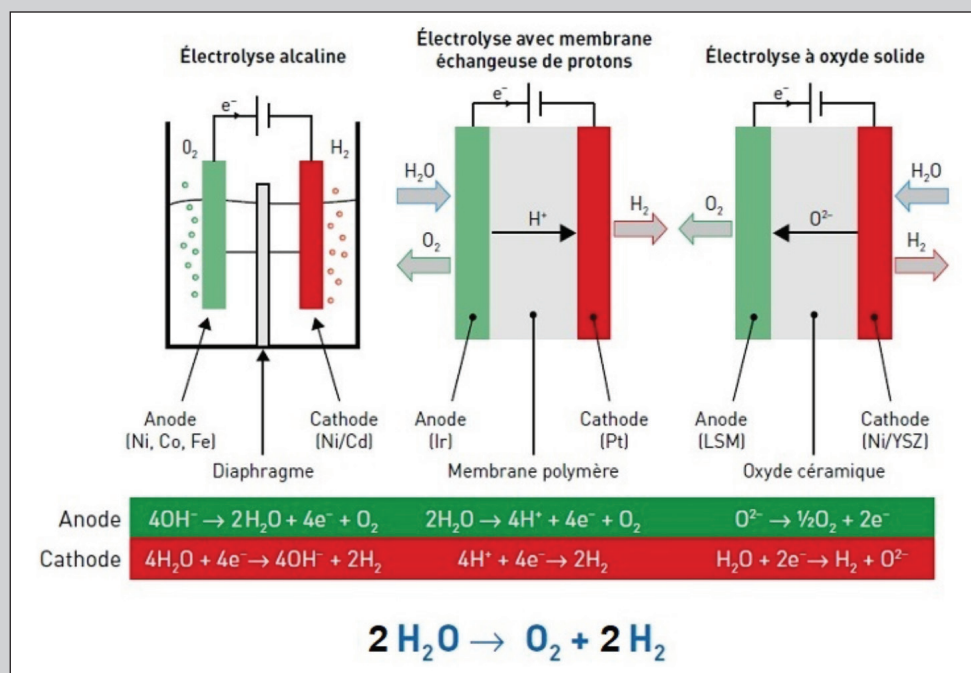


Figure 4. L'électrolyse de l'eau. Source : <https://www.mediachimie.org/ressource/zoom-sur-les-derniers-r%C3%A9sultats-de-la-production-d%E2%80%99hydrog%C3%A8ne-%C2%AB-d%C3%A9carbon%C3%A9-%C2%BB>.

Le surplus d'énergie électrique produite par les sources d'énergie renouvelables photovoltaïques et éoliennes permet d'alimenter en électricité, et donc en électrons, des électrolyseurs (trois types présentés en [figure 4](#)) où a lieu une transformation forcée.

À la cathode, siège de la réduction, est toujours produit du dihydrogène H_2 .

Ce procédé d'électrolyse de l'eau, très abondante sur Terre, n'engendre pas de gaz à effet de serre. Il s'agit donc d'une production de dihydrogène décarboné, contrairement au vaporeformage du méthane ($CH_4 + 2 H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4 H_2$) utilisé actuellement pour produire 95 % du dihydrogène !

QUELS SONT LES PERSPECTIVES, LIMITES ET DÉFIS À PRÉVOIR ?

L'enjeu n'est plus seulement de produire des véhicules moins polluants, mais de concevoir des systèmes entièrement recyclables :

- ▶ batteries remplaçables ;
- ▶ plastiques recyclables chimiquement ;
- ▶ composites réparables ;
- ▶ récupération systématique des métaux critiques.

La chimie évolue vers une logique d'économie circulaire où les déchets deviennent une ressource.

Les industriels cherchent à remplacer progressivement les ressources fossiles par :

- ▶ des polymères issus de la biomasse ;
- ▶ des résines biosourcées ;
- ▶ des fibres végétales ;
- ▶ des carburants issus de déchets organiques.

Cette évolution pourrait réduire fortement les émissions liées à la production des matériaux de transport.

Le colloque « Chimie et mobilités » souligne également l'essor des nouvelles mobilités urbaines : vélos électriques, véhicules légers partagés et transports collectifs décarbonés. Dans ce domaine, la chimie intervient principalement dans :

- ▶ les batteries à recharge rapide ;
- ▶ les matériaux ultralégers ;
- ▶ les revêtements fonctionnels ;
- ▶ les systèmes de stockage d'énergie.

Malgré ces avancées, plusieurs difficultés demeurent :

- ▶ la disponibilité du lithium, du nickel et des terres rares ;
- ▶ la consommation énergétique de certaines productions et pollutions associées ;
- ▶ un recyclage encore incomplet de nombreux matériaux composites ;
- ▶ le coût élevé des carburants synthétiques ;
- ▶ la nécessité d'une production massive d'électricité décarbonée.

Comme cela a été rappelé dans les différentes présentations du colloque, la transition des mobilités reposera davantage sur la combinaison de plusieurs solutions que sur une technologie unique.

CONCLUSION

L'actualité de la chimie appliquée aux mobilités montre une évolution profonde car il ne s'agit plus seulement d'améliorer les performances des véhicules, mais de transformer l'ensemble de leur cycle de vie. Les matériaux biosourcés, les batteries de nouvelle génération, le dihydrogène, les carburants synthétiques et le recyclage avancé constituent aujourd'hui les principaux axes de recherche.

Les perspectives pour les prochaines décennies visent une mobilité plus légère, plus circulaire et moins dépendante des ressources fossiles. La chimie apparaît ainsi comme l'une des disciplines clés pour atteindre les objectifs de neutralité carbone dans les transports tout en maintenant les capacités de déplacement des personnes et des marchandises.

POUR EN SAVOIR PLUS

Voici quelques liens vous permettant d'élargir vos connaissances sur l'empreinte carbone et/ou sur les mobilités :

- ▶ [De l'hydrogène stocké sous forme solide](#) – Michel Latroche – CNRS

Et sur le site [Mediachimie](#) :

- ▶ Conférences du colloque « [Chimie et mobilités](#) » du 11 février 2026
- ▶ [La Chimie au cœur des évolutions des batteries](#) – Patrick Simon
- ▶ [Recycler les matériaux, une des réponses pour une économie circulaire. Illustration pour les polymères](#) – Jean-François Gérard
- ▶ [L'ammoniac : un des futurs e-fuel pour une production d'énergie à zéro empreinte carbone](#) – Christine Rousselle (10/02/2021)
- ▶ [Vision de l'hydrogène pour une économie décarbonée](#) – Xavier Vigor (10/02/2021)
- ▶ [Nouveaux véhicules électriques et thermiques : quel impact sur l'environnement ?](#) – Jean-Claude Bernier (10/02/2021)
- ▶ [Matériaux critiques et axes stratégiques pour l'industrie automobile](#) – Gildas Bureau (09/11/2022)
- ▶ [L'hydrométallurgie au service du recyclage des batteries de véhicules électriques](#) – Éric Bausson
- ▶ [Le lithium, un élément chimique indispensable pour notre mobilité actuelle](#) – Éric Bausson
- ▶ [Chimie et mobilités : le bioéthanol](#) – Éric Bausson

Éric Bausson est professeur de physique-chimie

Comité éditorial : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen