

LA CHIMIE PEUT-ELLE SE METTRE AU VERT ?

Éric Bausson

Feu vert pour une chimie durable

Dès l'Antiquité, les mines de plomb, de cuivre et d'argent étaient exploitées. C'est le début de la métallurgie. À titre d'exemple, la mine de Laurion près d'Athènes (voir photo ci-contre) a été exploitée dès les années -3 000 avant J.-C. Toutefois, le grand essor de la chimie a commencé au XX^e siècle et son innovation en fait l'une des sciences les plus productives. La chimie verte s'imposera en ce XXI^e siècle face à la raréfaction des ressources naturelles, au réchauffement climatique, aux risques chimiques et à la dépense énergétique. Tout processus chimique devra être analysé dès sa conception sous tous ses aspects, de la matière première et son origine jusqu'au produit final et son recyclage ou sa gestion comme déchet ultime en fin de vie.

L'industrie chimique a déjà fortement investi dans des procédés moins polluants, dans la réutilisation des produits secondaires issus de procédés non complètement sélectifs. Elle met également un point d'honneur à décontaminer en amont tout rejet dans l'air et l'eau, tandis que les rejets solides sont limités au strict minimum.



Mine d'argent du Laurion
© Janice Siegel



Explosion sur le site AZF de Toulouse
le 21/09/2001 © France Info

La notion de risques et de sécurité fait partie intégrante de la culture des entreprises chimiques et de la formation de ses salariés. Toutefois il faut aller encore plus loin car cette industrie de pointe est légitimement pointée du doigt lors d'accidents industriels notoires : n'oublions pas par exemple Seveso, en Italie (1976), Lubrizol, à Rouen (2019) et AZF, à Toulouse (2001).

L'explosion sur le site AZF de Toulouse est due au nitrate d'ammonium NH_4NO_3 , engrais très utilisé mais devant être stocké en respectant certaines règles strictes de sécurité (température, à l'écart de certains produits chimiques, etc.).

L'approche transversale de la chimie verte permettra l'anticipation et la minimisation du risque chimique.

Pour en savoir plus...

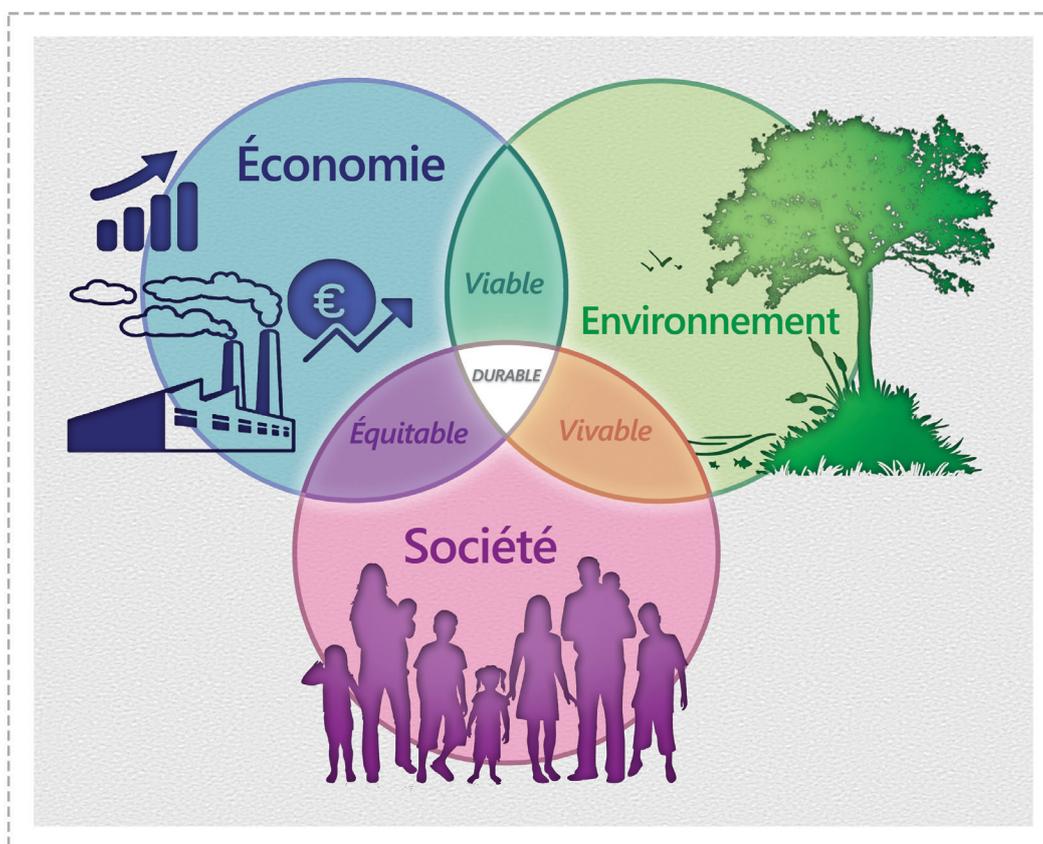
[Le nitrate d'ammonium, un engrais dangereux ? Jean-Claude Bernier – Mediachimie](#)

Comment faire pour que la chimie passe durablement au vert ?

PLAN ET RESSOURCES POUR TRAITER CETTE QUESTION DU GRAND ORAL

En suivant le questionnaire ci-après, permettant de définir puis de montrer quelques applications de la chimie verte, et en vous appuyant entre autres sur les ressources proposées parmi toutes celles de Mediachimie, la médiathèque de la Fondation de la Maison de la Chimie, il est possible de répondre à cette problématique.

- Quels sont les douze principes de la chimie verte ?
- Comment faire des économies d'atomes ?
- Comment choisir une synthèse chimique parmi d'autres ?
- La chimie verte est-elle une des clés pour lutter contre le réchauffement climatique ?



• Quels sont les douze principes de la chimie verte ?

Paul Anastas et John C. Warner ont été les premiers à proposer en 1998 les douze principes de base de la chimie verte qui ont vocation à être universels. Réunis sous forme de tableau, ils ont pour objectifs entre autres de développer une chimie qui utilise et produise moins de substances dangereuses et soit, de fait, plus respectueuse de l'environnement.

Voici ces douze principes de la chimie verte.



© EDP Sciences, 2016

Ces douze principes de la chimie verte permettent de mieux répondre aux attentes communes de trois domaines distincts, mais omniprésents dans notre quotidien, que sont l'économie, l'environnement et notre société en promouvant entre autres une **chimie plus durable**. De nos jours, il faudrait ajouter à ces principes celui du recyclage des sous-produits et plus particulièrement au devenir des produits en fin de vie ne pouvant être biodégradables.

Source: [Les douze principes de la chimie verte comme moteur d'innovation pour la formulation des parfums](#) – Jean-Marie Aubry – Mediachimie

Pour en savoir plus: Les 12 principes de la chimie verte

<https://jcmarot.files.wordpress.com/2021/05/douze-principes.pdf>

FOCUS

La catalyse est un des grands enjeux de la chimie verte. Les réactions catalytiques sont des réactions réalisées en présence d'un catalyseur, élément solide ou liquide, qui accélère la vitesse de la réaction en abaissant la barrière énergétique, autrement dit le seuil d'énergie nécessaire pour permettre à la réaction de se produire. Il est ainsi possible d'économiser de l'énergie et d'abaisser le temps de réaction. Il n'est pas détruit lors de cette dernière et peut être, dans certains cas, récupéré et réutilisé. Enfin, il a la propriété d'être sélectif en privilégiant la formation du produit désiré au détriment d'autres secondaires. On aurait donc tort de s'en priver !

Parmi les nombreuses applications, nous pouvons dénombrer au moins quarante procédés catalytiques pour une automobile (pneus, carburants, plastiques et bien entendu les pots catalytiques abaissant la pollution).

Si vous désirez en savoir plus à ce sujet, vous pouvez voir la conférence de J. P. Brunelle sur [la catalyse et les voitures de tourisme](#) – [Colloque Chimie et transports](#) (3 Avril 2013) – Maison de la Chimie

• Comment faire des économies d'atomes pour répondre au deuxième principe ?

En considérant deux réactions conduisant au même produit, noté P, explicitons la notion d'économie d'atomes (deuxième principe de la chimie verte).

P peut être obtenu par une réaction de condensation de type $A + B \rightarrow P$, ou bien par une réaction d'addition, de type $A' + B' \rightarrow P + Q$ conduisant également à un sous-produit Q.

L'économie d'atomes (EA) a ici pour expression :

$$EA (\%) = \frac{M(P)}{M(A)+M(B)} \times 100 \quad \text{ou} \quad EA (\%) = \frac{M(P)}{M(A')+M(B')} \times 100$$

avec $M(X)$: masse molaire de X en $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$

Ce calcul ne tient pas compte des solvants utilisés, ni des quantités de réactifs introduits en excès. On en déduit que pour les deux réactions citées auparavant :

$A + B \rightarrow P$	EA = 100 %
$A' + B' \rightarrow P + Q$	0 % < EA < 100 %

Pour respecter ce deuxième principe de la chimie verte, il faut donc limiter au maximum les sous-produits, et si c'est impossible, privilégier ceux qui ont une faible masse molaire... donc de petites molécules, mais bien entendu non nocives ou que l'on peut facilement isoler et retraiter.

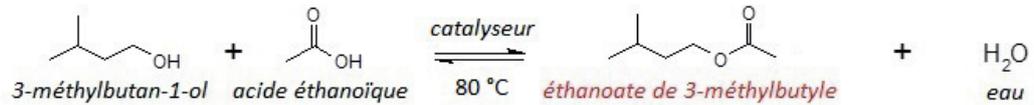
Dans le cadre de synthèses organiques pour obtenir le même produit d'intérêt, si on se base uniquement sur le critère d'économie d'atomes, il vaut mieux effectuer des réactions d'addition au lieu des réactions d'élimination ou de substitution pour lesquelles des sous-produits sont aussi présents.

Source : [La chimie au cœur du développement durable](#) – M. Augé – Mediachimie

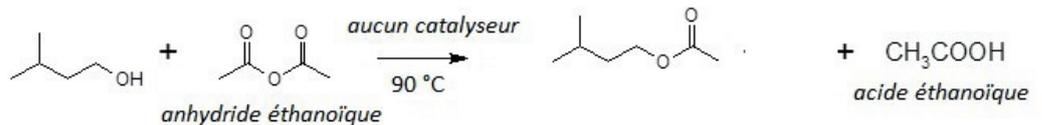
● Comment choisir une synthèse chimique parmi d'autres ?

Pour produire de l'éthanoate de 3-méthylbutyle, plus connu sous le nom d'acétate d'isoamyle, faisant partie de la famille des esters, liquide incolore et transparent ayant l'odeur de banane, trois voies de synthèse différentes sont proposées ci-dessous sachant que les deux dernières sont rapides, même sans catalyseur.

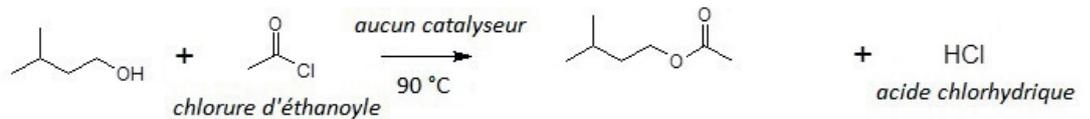
Synthèse 1



Synthèse 2



Synthèse 3



	Synthèse 1	Synthèse 2	Synthèse 3
Économie d'atomes (%)	87,8	68,4	77,8
Rendement (%) (réactifs dans les proportions stœchiométriques)	67	100	100

Si on se base uniquement sur l'économie d'atomes, la synthèse 1 semble la meilleure. De plus, l'eau, le sous-produit de la réaction ne pose pas de problème de traitement après séparation du produit d'intérêt.

Cependant, son rendement est plus faible que pour les synthèses 2 et 3, ce qui impose pour le mélange réactionnel initial de la synthèse 1 en vue d'obtenir la même quantité de produit d'intérêt (éthanoate de 3-méthylbutyle):

- soit d'utiliser plus de réactifs dans les proportions stœchiométriques ;
- soit de placer un des deux réactifs en excès pour déplacer l'équilibre vers la droite tout en recyclant tous les excédents ;
- soit d'éliminer l'eau au fur et à mesure de la synthèse ce qui déplace l'équilibre. Ceci est réalisable en utilisant un tube décanteur de Dean Stark comme le montre la vidéo [Éliminer l'eau d'un milieu réactionnel](#).

Par conséquent, la synthèse 3 présente le meilleur compromis entre rendement et économie d'atomes, et peut satisfaire à un très grand nombre des douze principes de la chimie verte, si et seulement si le sous-produit HCl, l'acide chlorhydrique, est traité ou réutilisé pour une autre synthèse. Resterait le problème de la consommation d'énergie liée au chauffage à 90 °C... Mais il est nécessaire au préalable de synthétiser le chlorure d'acyle ce qui nécessite de faire réagir l'acide carboxylique avec le chlorure de thionyle (SOCl₂) ou le pentachlorure de phosphore (PCl₅), avec obtention comme produits secondaires SO₂ et HCl ou POCl₃ et HCl.

Le choix ne pouvant se limiter à satisfaire uniquement au principe 2 seul ou à un des 12 principes de la chimie verte pris isolément, il faut donc tenir compte de l'ensemble des étapes, du choix des matières premières en amont jusqu'au produit final.

Il faut tout faire pour respecter les principes de la chimie verte et répondre aussi à ceux de l'économie circulaire.

Pour en savoir plus, consulter le [Zoom sur l'éco-conception des produits de consommation : vers une économie circulaire. Exemple des peintures](#).

● La chimie verte est-elle une des clés pour lutter contre le réchauffement climatique ?

Le texte original datant de 1998, aucun des 12 principes de la chimie verte ne fait explicitement référence à la problématique du CO_2 en tant que sous-produit/déchet mais de nos jours, il faut en tenir compte. Par ailleurs, l'industrie chimique repose encore massivement sur l'utilisation de ressources fossiles car la très grande majorité des composés organiques produits dérivent du pétrole et du gaz naturel. La prise de conscience des risques liés au réchauffement climatique et les crises passées et actuelles obligent l'humanité à changer de posture et à concevoir des procédés innovants en lien avec les principes de la chimie verte.

Pour concilier les besoins en produits organiques et la maîtrise des émissions de dioxyde de carbone (CO_2), il faut donc changer progressivement les ressources en matières premières carbonées pour qu'elles soient renouvelables, et quoi de mieux que d'utiliser ce dioxyde de carbone ?

Valoriser le dioxyde de carbone, dans des conditions douces de température et de pression, en des produits à haute valeur ajoutée est un des enjeux du XXI^e siècle. Le CO_2 deviendrait ainsi une nouvelle source de carbone pour synthétiser de nombreux produits existants ou nouveaux tout en limitant la teneur en CO_2 dans l'atmosphère. Les chercheurs ont réussi à mettre au point de nouveaux catalyseurs non métalliques, moins coûteux et moins toxiques, pour la conversion du CO_2 .

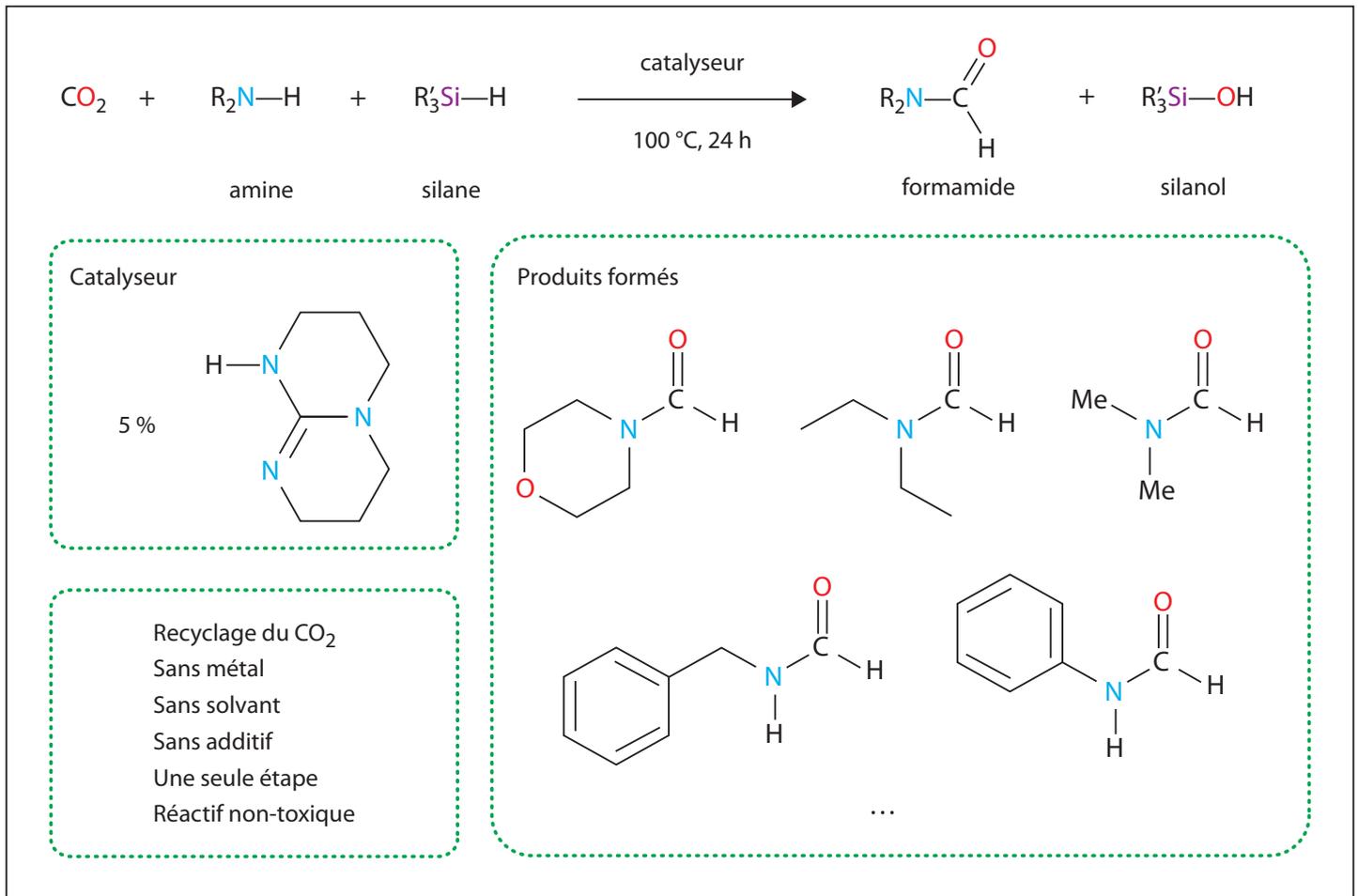
Appuyons-nous sur l'exemple des formamides, amides formés à partir de l'acide méthanoïque (HCOOH), aussi dénommé acide formique, ce même acide formique présent dans les orties, provoquant une sensation de brûlure, et que certaines fourmis projettent sur leurs ennemis, comme ci-dessous !



Fourmis projetant de l'acide formique © GuruMéditation

En faisant réagir du dioxyde de carbone (CO₂) avec une amine secondaire et du silane, en présence d'un catalyseur non métallique, il est possible de former plusieurs formamides, ayant tous un intérêt industriel.

Voici la réaction mise en jeu et les produits obtenus :



Ci-dessus à gauche, sont présentés les avantages non négligeables de cette synthèse de formamides, tous en lien avec les principes de la chimie verte.

Source: Conférence de M. Bigot « [La chimie, une science au cœur des énergies d'avenir](#) »
 – Colloque « Chimie et enjeux énergétiques – 14/11/2012

Conclusion

Depuis quelques décennies, l'industrie chimique a pris conscience qu'il lui était impossible de conserver la même trajectoire que par le passé. Les douze principes de la chimie verte s'imposent dorénavant et permettront d'envisager toute nouvelle synthèse sous un angle différent, voire même d'en modifier certaines encore en cours pour les rendre plus conformes à nos attentes. Le recyclage du CO₂, parfait exemple des possibilités offertes par la chimie verte et la recherche, ne cesse d'innover dans ce sens !

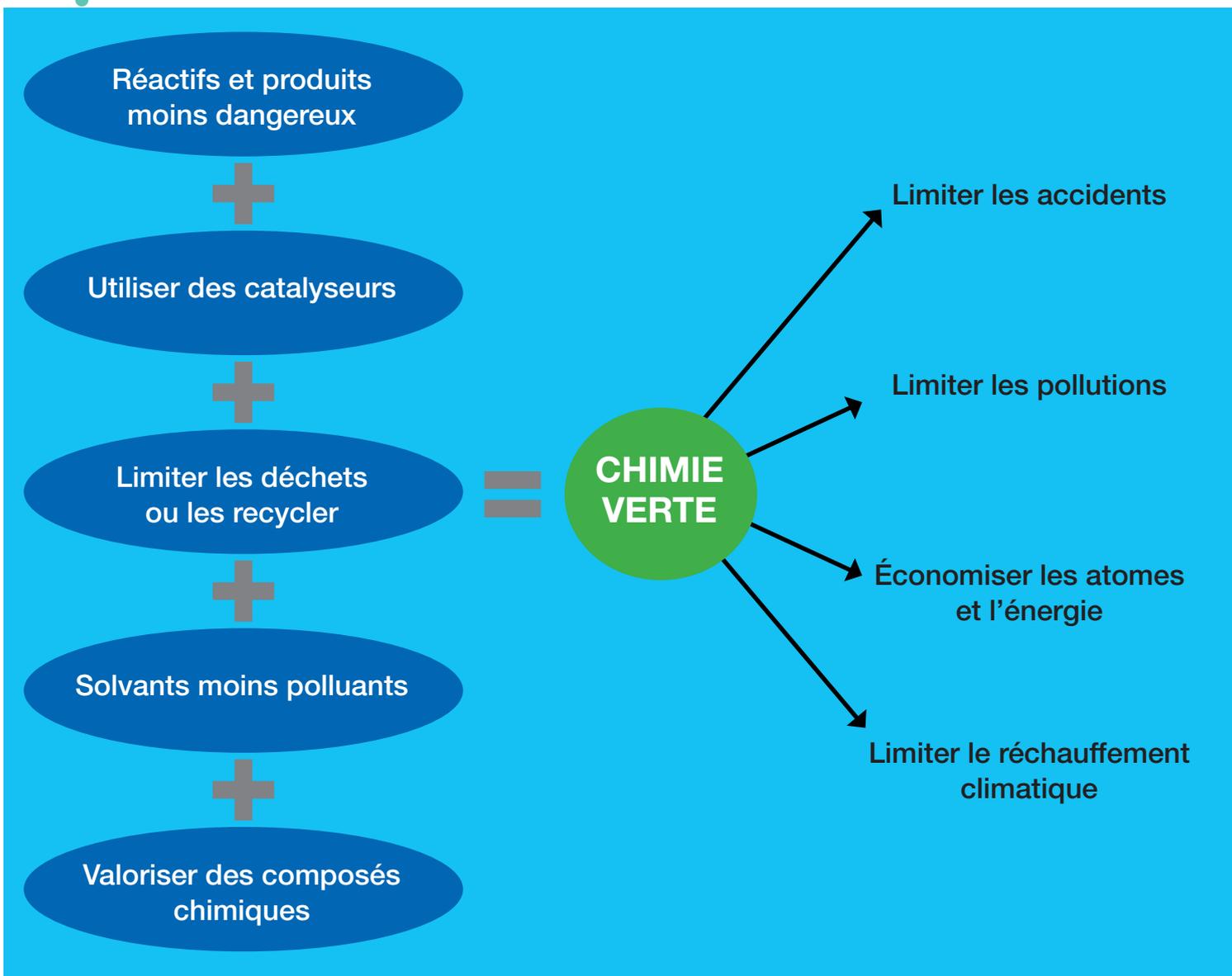
Pour aller plus loin

- [La catalyse hétérogène: un outil clé pour le développement durable](#) – Mediachimie
- Les Savanturiers n°24 - CEA - www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/les-savanturiers/chimie-verte.aspx
- www.mediachimie.org/ressource/la-chimie-verte-pour-un-futur-durable
- [Quel défi pour les catalystes!](#) – Mediachimie
- [Zoom sur la catalyse hétérogène: de l'empirisme à la modélisation](#) – Mediachimie
- [Pour une chimie propre et durable](#) – Mediachimie
- [La chimie au cœur du développement durable](#) – Mediachimie
- Colloque « [Chimie et changement climatique](#) » – 18/11/2015 – Maison de la Chimie
- [Le dioxyde de carbone, la molécule-clé de la chimie du développement durable](#) – Mediachimie
- [Le dioxyde de carbone: enjeux énergétiques et industriels](#) – Mediachimie
- [Rapports du G.I.E.C.](#) Qu'ils soient techniques, méthodologiques ou de synthèse, ces textes publiés consistent en une évaluation scientifique et technique exhaustive du changement climatique.

EN RÉSUMÉ

La chimie verte ne se limite pas au seul choix des réactifs pour une réaction conduisant au produit recherché.

À l'échelle industrielle, il faut que l'ensemble des étapes du procédé qui va du choix des matières premières et des solvants, de l'énergie consommée tout au cours du procédé jusqu'au recyclage des produits en fin de vie et de la limitation des déchets, réponde à la règle des 3 R qui accompagne la chimie verte : Réduire, Réutiliser et Recycler.



LE PROJET PROFESSIONNEL

La démarche générale incitant à conduire à une chimie plus verte est déjà en route et s'applique à tous les produits des industries de transformation de la matière, que ce soit la chimie lourde, la chimie fine, la chimie de spécialités (pour en savoir plus sur ces définitions, consulter [Où travaillent les chimistes](#)), la pharmacie, la cosmétique, l'énergie, les Industries Agroalimentaires...

Que ce soit dans les activités de recherche, d'analyse, de procédés, de réglementation, de sécurité, d'environnement, les spécialistes de ces différents secteurs verront leur rôle impacté par ces nouvelles exigences. Pour s'en faire une idée on consultera la fiche [Les chimistes dans l'économie circulaire](#) et le [Zoom sur l'éco-conception des produits de consommation : vers une économie circulaire. Exemple des peintures.](#)



Schéma pour l'économie circulaire

Les métiers clés associés sont les métiers des procédés (il est parfois indispensable de revoir l'ensemble d'un schéma de synthèse pour répondre aux principes de la chimie verte). Ces métiers qui vont des technicien(ne)s aux ingénieur(e)s et chercheurs et chercheuses sont décrits dans l'[espace métiers à la rubrique « PROCÉDES »](#).

Le [Zoom sur le génie des procédés](#) permet de comprendre et de voir l'évolution déjà fortement en marche dans cette science et ses applications industrielles. Il faut noter en particulier que la révolution numérique et l'intelligence artificielle permettent un important travail en amont de modélisation, simulation et optimisation, et amènent des changements profonds dans la conception des usines du futur à l'ère des évolutions écologique, énergétique et numérique.

Les **BTS Pilotage de Procédés** ainsi que les **BUT génie chimique, génie des procédés** forment tout particulièrement en 2 à 3 ans à des métiers de techniciens dans ce domaine www.mediachimie.org/metier/34.

Plusieurs écoles d'ingénieurs du [groupe Gay Lussac](#) sont spécialisées dans le génie des procédés et génie chimique tels que l'[ENSIC](#) à Nancy, l'[ENSIACET](#) à Toulouse, l'[UTC](#) à Compiègne, l'[INSA](#) de Rouen, [CPE LYON](#) et Centrale Marseille. En [vidéo un professeur et un étudiant de l'UTC de Compiègne présentent la formation d'ingénieur proposée par le département Génie des procédés](#) et la diversité des applications qui touchent aux grands défis actuels.

D'autres écoles et plusieurs universités offrent des masters spécialisés comme celui par exemple [Procédés, Energies Renouvelables et Géosciences](#) proposé par l'école Centrale Supélec en association avec l'Université Paris Saclay.

La liste des universités proposant ce type de formation en [master génie des procédés peut être consultée sur le site de l'ONISEP](#).

Les domaines de l'analyse, de la recherche et développement, de l'hygiène sécurité et environnement ainsi que les affaires réglementaires sont bien entendu aussi concernés.

Ces domaines sont décrits dans l'[espace métiers de Mediachimie](#).

Citons quelques exemples de métiers ciblés associés à ces secteurs :

[Ingénieur de recherche / Chercheur \(H/F\)](#)

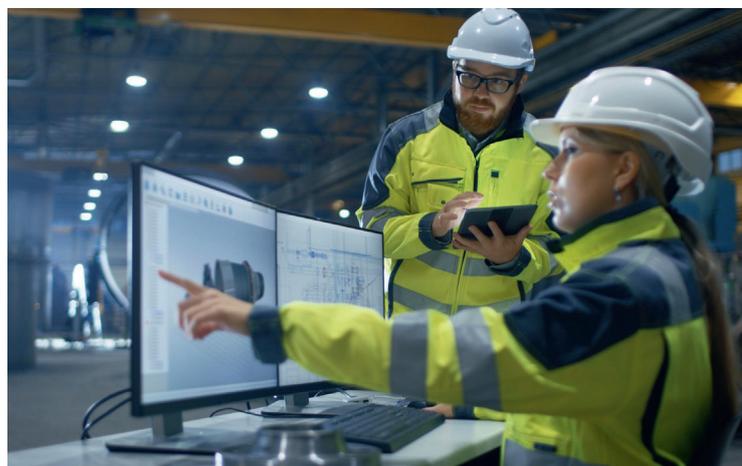
[Responsable de laboratoire d'analyses / contrôle qualité \(H/F\)](#)

[Technicien d'analyse chimie / physico-chimie \(H/F\)](#)

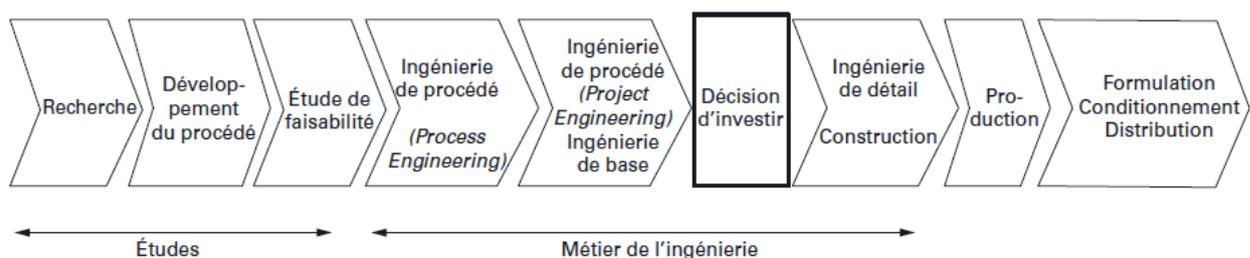
[Responsable / Ingénieur Hygiène Sécurité Environnement \(H/F\)](#)

[Technicien environnement \(H/F\)](#)

[Responsable / Directeur des affaires réglementaires \(H/F\)](#)



Ingénieurs santé, sécurité et environnement © France Chimie



Représentation du processus d'industrialisation. Source : [Chimie pour un développement durable](#) SECF