

COMMENT LE RECYCLAGE EN CHIMIE CONTRIBUE-T-IL À L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE ?

Éric Bausson

Le recyclage : composante de l'économie circulaire

La transition écologique est une évolution vers un nouveau modèle économique et social qui apporte une solution globale et pérenne aux grands enjeux environnementaux de notre siècle et aux menaces qui pèsent sur notre planète. Opérant à tous les niveaux, elle vise à mettre en place un modèle de développement résilient et durable qui repense nos façons de consommer, de produire, de travailler et de vivre ensemble.

Ceci étant, en [session de clôture](#) du [colloque Chimie et Matériaux Stratégiques](#) qui a eu lieu le 09/11/22, Philippe Varin¹, Président du World Materials Forum depuis 1995, donne quelques chiffres clés sur les enjeux de la transition écologique. En voici quelques-uns :

- actuellement, une personne consomme, en moyenne, 20 tonnes de matériaux par an ;
- un véhicule électrique nécessite six fois plus de matériaux qu'un véhicule thermique ;
- il en est de même pour un kilowatt-heure (kWh) éolien par rapport à un kilowatt-heure produit avec des centrales électriques au gaz ;
- la demande en ressources minières (lithium, nickel, cobalt, etc.) sera aussi en très forte augmentation dans les années qui viennent...

Pour faire face à ce constat et aux changements à opérer, il va de soi qu'il est nécessaire de réfléchir à une éco-conception (ou éco-design) visant à repenser, dès leur conception, toutes les étapes du cycle de vie du produit d'une manière plus responsable et durable. La chimie est bien entendu très sollicitée pour y parvenir.

Dans ce dossier, après avoir défini les contours de l'économie circulaire, nous aborderons quelques exemples du quotidien permettant de souligner le rôle de la chimie dans ce domaine.

Comment le recyclage en chimie contribue-t-il à l'économie circulaire ?

1. Après 25 ans dans l'aluminium chez Pechiney, six ans dans l'acier comme CEO de Corus, six ans dans l'automobile chez P.S.A., puis six ans dans le nucléaire, Philippe Varin fut Président de France industrie jusqu'en 2020 et de Suez de 2020 à 2022.

PLAN ET RESSOURCES POUR TRAITER CETTE QUESTION DU GRAND ORAL

En suivant le questionnaire ci-après et en vous appuyant sur les ressources proposées par [Mediachimie](#), il est possible de répondre à cette problématique.

- Les chimistes au cœur de l'économie circulaire.
- De l'amidon aux sacs plastique et réciproquement.
- Comment recycler certaines bouteilles plastique ?

POURQUOI FAVORISER L'ECO-CONCEPTION?

LE CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT

Fin de vie *Conception*

Usage *Extractions des matières premières*

Transport *Fabrication*

MAITRISE DES COÛTS

96% des entreprises ont remarqué un effet économique positif ou neutre

ACCROISSEMENT DES VENTES

Ouvre la porte à de nouveaux marchés et à un nouveau public

GESTION DES RISQUES

Réduit les risques et prévient d'éventuelles situations de crise

FEDERATION DES EQUIPES

Remotive les équipes et les réunit autour d'un projet commun porteur de sens

<https://www.easyrecyclage.com/blog/pourquoi-favoriser-eco-conception/>

L'éco-conception à toutes les échelles de l'entreprise © Easy recyclable

● **Les chimistes au cœur de l'économie circulaire.**

Pour des raisons environnementales et de raréfaction des ressources non renouvelables, de nouveaux produits industriels devront progressivement être pensés et créés en respectant les principes de l'économie circulaire.

Ces principes sont les suivants :

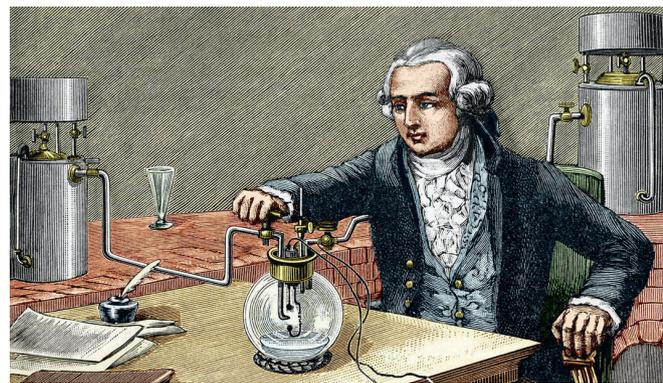
- une utilisation comptée des ressources naturelles ;
- une stratégie d'éco-conception : matières premières renouvelables, déchets de fabrication recyclables, produits ou objets en fin de vie soit réutilisables, soit transformables pour un usage différent, soit recyclables en nouvelles matières premières ;
- se rapprocher du zéro déchet.

Seuls les déchets ultimes pourront être incinérés pour produire de l'énergie ou, en tout dernier recours, enfouis. Si elle peut apparaître comme une contrainte supplémentaire, l'économie circulaire sera aussi source d'innovations et, à terme, d'économies.

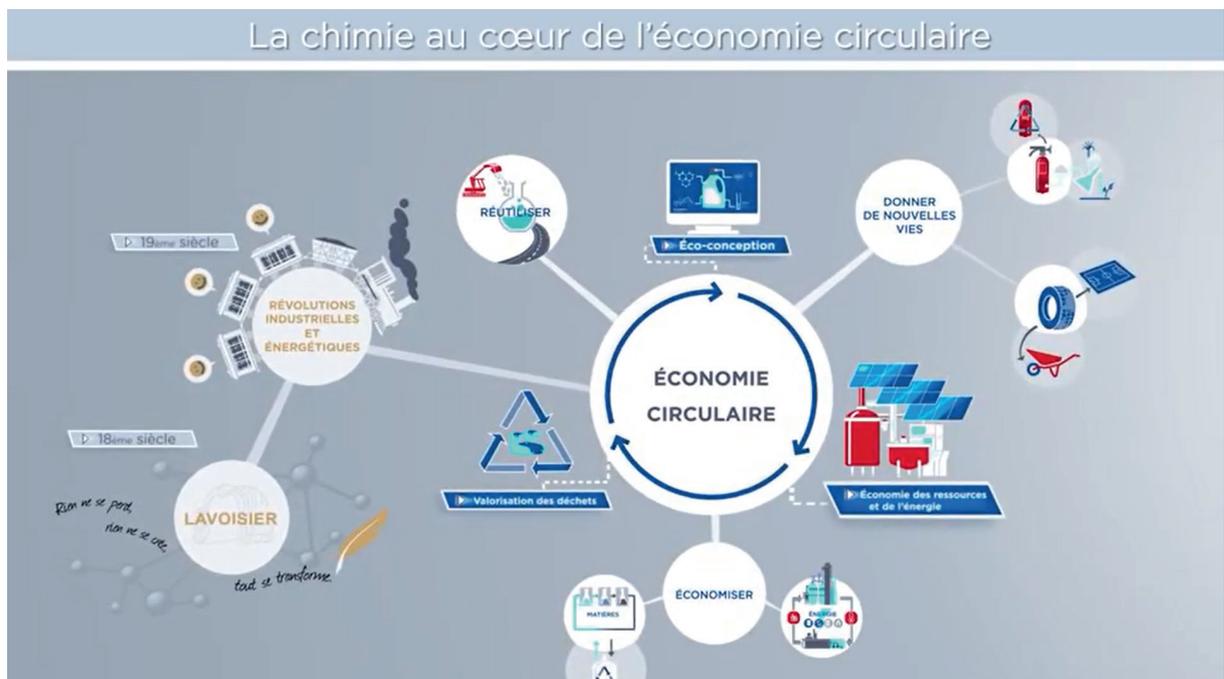
Source : [Les chimistes dans l'économie circulaire](#) – Françoise Brénon et Gérard Roussel

Les chimistes sont bien placés pour participer activement à l'économie circulaire. Le principe de Lavoisier, énoncé au XVIII^e siècle, « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme », en est le parfait repère et une belle illustration.

Il faut donc passer, et cela a déjà commencé bien heureusement, d'une économie linéaire suivant la logique « on produit, on consomme et on jette », à une économie circulaire prenant en compte l'éco-conception, l'économie des ressources et de l'énergie et la valorisation des déchets.



Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794)
© Meer



Source : Vidéo <https://www.facebook.com/watch/?v=408147469604192> – 10/2015

● De l'amidon aux sacs plastique et réciproquement.

À partir du 1^{er} Janvier 2017, l'interdiction des sacs plastique non réutilisables a permis de réduire l'impact de ces plastiques sur l'environnement. En Italie, pays précurseur sur le sujet (loi de 2007), on a constaté, dès la première année, une modification des pratiques des consommateurs comme en France, mais surtout l'Italie enregistre une baisse de 50 % de l'utilisation des sacs plastique à usage unique, compostables ou non, en 3 ans (la consommation de sacs plastique est passée de 180 000 tonnes à 90 000 tonnes entre 2010 et 2013).

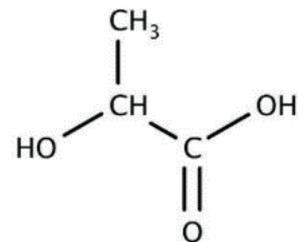


Sac plastique biodégradable
© La Montagne

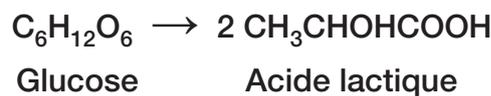
En France, les industriels ont travaillé à l'émergence de bioplastiques, c'est-à-dire de matériaux biosourcés et/ou biodégradables. Remplacer des matières premières issues de ressources fossiles est une autre façon de s'inscrire dans une démarche d'économie circulaire.

L'acide polylactique (PLA), est un exemple de biopolymère utilisé pour des sacs de nouvelle génération.

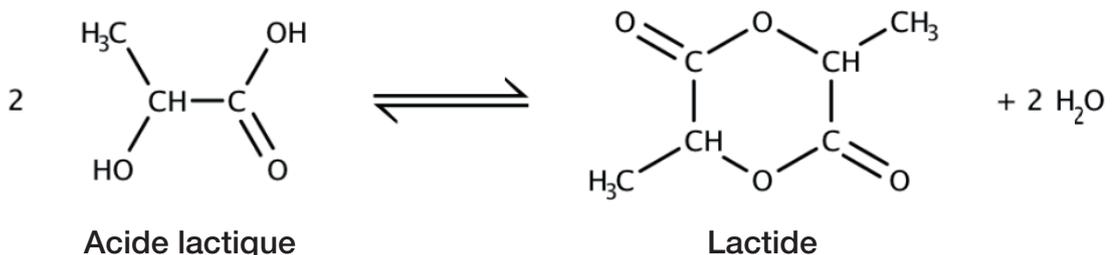
Il est fabriqué à partir d'acide lactique (ci-contre), officiellement « acide 2-hydroxypropanoïque », obtenu par fermentation bactérienne d'amidon ou de sucre.



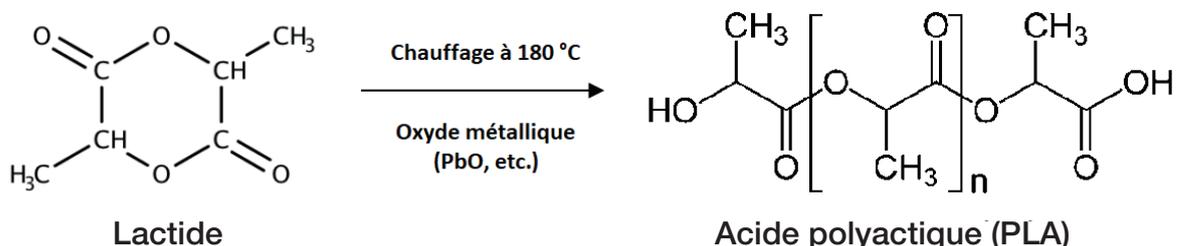
Par exemple, à partir d'amidon de maïs, glucide complexe formé d'unités de glucose C₆H₁₂O₆, la fermentation à l'aide de bactéries lactiques permet de former de l'acide lactique suivant l'équation :



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



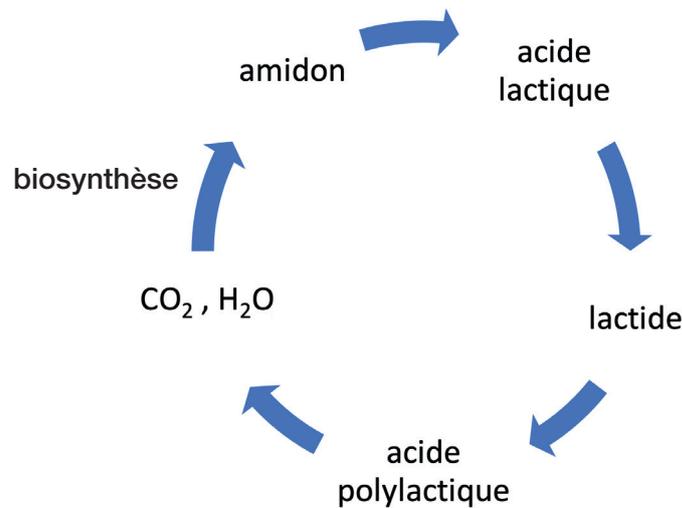
puis en acide polylactique suivant divers procédés possibles, dont celui ci-dessous :



En fin de vie, ces plastiques formés d'acide polylactique sont dégradés par des micro-organismes (bactéries, champignons, algues). Généralement, cette propriété est liée à la présence de liaisons covalentes qui peuvent facilement être rompues, comme dans les esters (OC-O) ou les amides (OC-N). Grâce aux enzymes qu'ils fabriquent, les micro-organismes utilisent les produits de dégradation de ces polymères comme source de carbone et d'énergie.

Le cycle de vie d'un produit est composé d'un ensemble d'étapes qui constituent sa « vie », de l'extraction des matières premières qui le composent à son élimination en fin de vie, en passant par sa distribution et son utilisation.

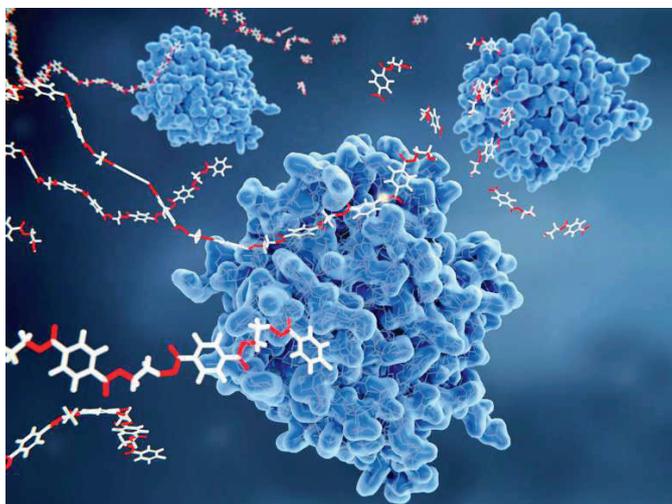
Ceci peut se résumer par le schéma simplifié du cycle suivant :



Pour en savoir plus :

[Zoom sur l'amidon](#) – Jean-Pierre Foulon – Mediachimie

Conférence du [colloque Chimie et Biologie de synthèse](#) – 14/02/2018 – [Le mariage réussi des plastiques et des enzymes](#) (première partie concernant les PLA) – Alain Marty – Mediachimie



Enzyme mutante dévoreuse de plastiques mise au point par Carbios © Néozone

• Comment recycler certaines bouteilles plastique ?

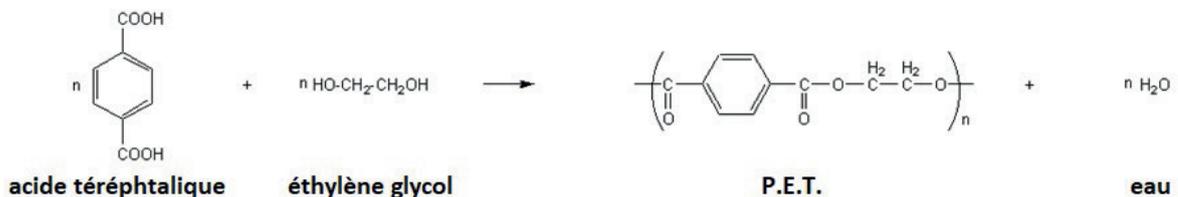
Le **polyéthylène téréphtalate (P.E.T.)** est l'un des plus importants polymères au niveau mondial avec 18 % de la production totale des polymères, après le polyéthylène (P.E.) et le polypropylène (P.P.).

Les applications principales du P.E.T. sont les **fibres textiles** (65 % de la production de P.E.T.) dont le tergal® et les résines de P.E.T. pour les bouteilles en plastique transparent (environ 30 % du marché).



Bouteilles plastique © PET-Recycling Schweiz

Le P.E.T. est produit à partir d'éthylène glycol très pur et d'acide téréphtalique, suivant l'équation :

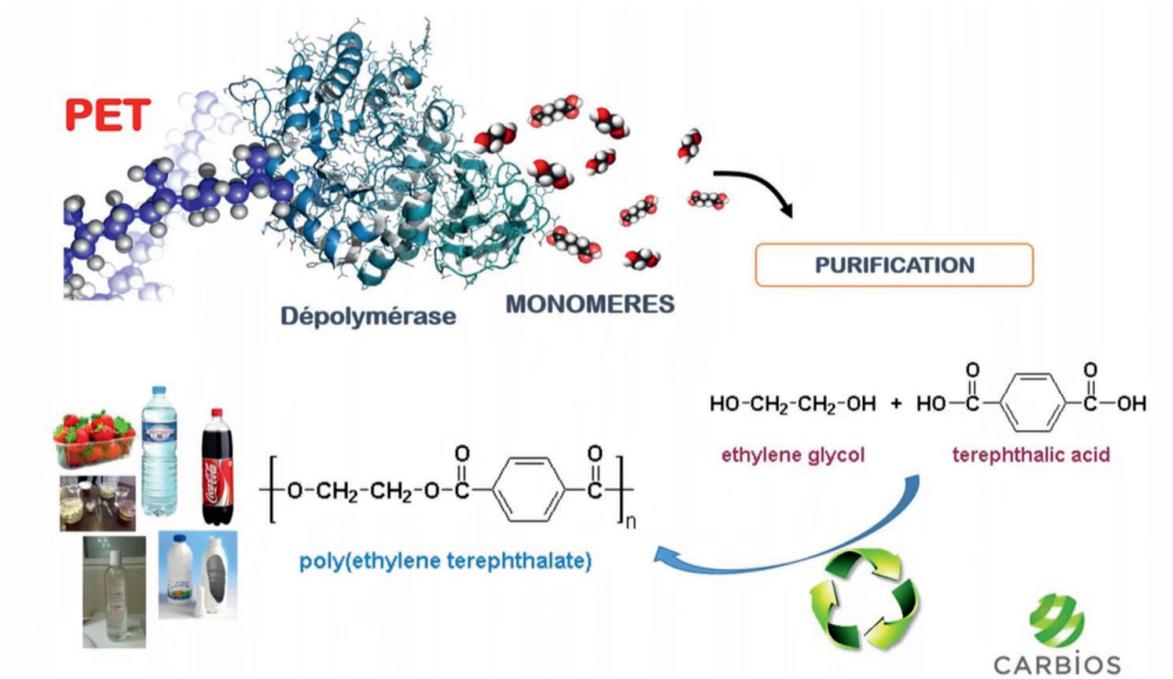


Depuis plusieurs années, nous avons pris l'habitude de placer nos bouteilles en P.E.T. vides dans nos poubelles dédiées au recyclage des matériaux. La filière du recyclage est très active et innovante dans le cas des P.E.T..

S'agissant d'un **thermoplastique**, il est tout d'abord possible de fondre les bouteilles plastique en contenant. Il faut bien entendu ne pas trop les chauffer au risque de dégrader irrémédiablement le P.E.T..

Une fois refondu, le P.E.T. recyclé ne peut plus être au contact de produits alimentaires, mais nous pouvons en porter sur nous car il est recyclé, entre autres, dans les vêtements polaires après avoir filé le P.E.T. fondu pour fabriquer des fibres textiles.

Depuis peu, il existe une autre voie de recyclage permettant de revenir aux réactifs de départ, les **monomères** (acide téréphtalique et éthylène glycol), en utilisant des **enzymes** spécifiques, dénommées « dépolymérase ». Cela permet de produire à nouveau du P.E.T. sans consommer d'atomes de carbone supplémentaires.



Source : [CARBIOS®](#)

En 2025, la première usine de la société Carbios® s'établira à Longlaville en Meurthe-et-Moselle (Grand Est). Cette usine s'installera près du site du plus gros producteur mondial de P.E.T., le thaïlandais Indorama® qui pourra ainsi utiliser les monomères issus du recyclage du P.E.T.. 50 000 tonnes de déchets seront ainsi traitées soit l'équivalent de deux milliards de bouteilles en P.E.T. par an. Il faut 24 heures aux enzymes sélectionnées pour dépolymériser le polyéthylène téréphtalate (PET) usagé, et ainsi obtenir une matière première aux propriétés identiques au P.E.T. vierge et recyclable à l'infini. La boucle est bouclée à nouveau pour le P.E.T. comme pour le P.L.A. vu précédemment.

Source : Conférence du [colloque Chimie et Biologie de synthèse](#) – 14/02/2018 – [Le mariage réussi des plastiques et des enzymes](#) (deuxième partie concernant les PET) – Alain Marty – Mediachimie

Pour en savoir plus :

[Déchets plastiques : les enzymes font le ménage](#) – Mediachimie

[Le recyclage des plastiques, un nouveau mirage ?](#) Jean Claude Bernier – Mediachimie

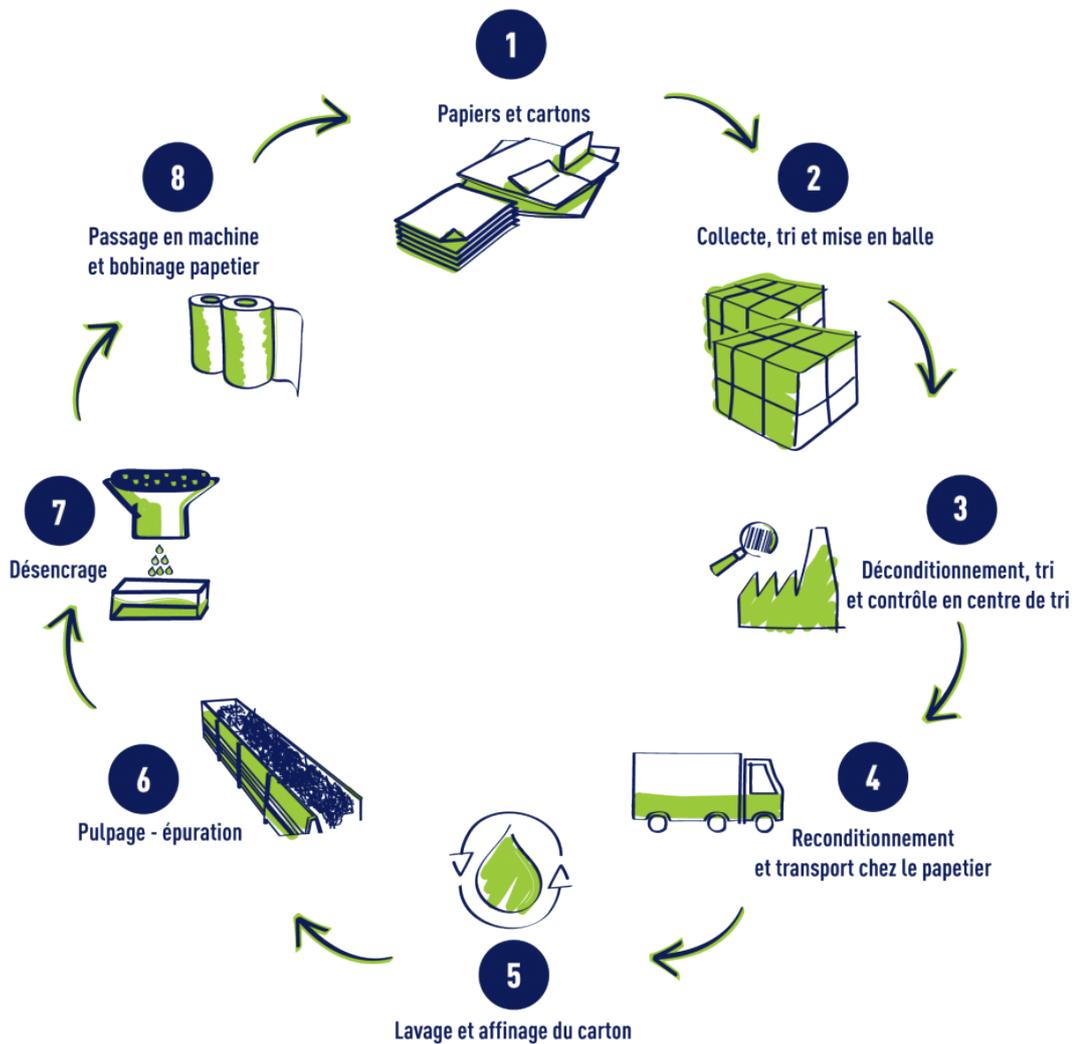
La chimie au cœur de l'économie circulaire : conférence du Congrès national 2022 de l'Union des professeurs de physique et chimie (UdPPC) :

<http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/actualites/veille-scientifique/la-chimie-au-coeur-de-l2019economie-circulaire>

Conclusion

Recycler est un enjeu majeur pour de multiples raisons liées aux pollutions et à la forte croissance de la demande en matériaux divers et variés. Les chimistes y prennent leur part en innovant sans cesse pour établir un cycle de vie plus vertueux aux produits, de leur conception à leur fin de vie.

Les exemples ne manquent pas. Il suffit d'ouvrir les yeux et surtout de regarder les nouveaux objets de notre quotidien tels que les sacs plastique biodégradables ou les bouteilles plastique en P.E.T. que nous venons d'aborder dans ce dossier. Il y en a d'autres bien plus visibles et courants comme le recyclage du verre, du papier et des métaux.



Étapes du recyclage du papier et du carton © Valo Services

Mais le chantier est vaste pour réussir à concilier la demande, la production et réduire au maximum les pollutions engendrées. La recherche demeure très active pour relever autant de défis !

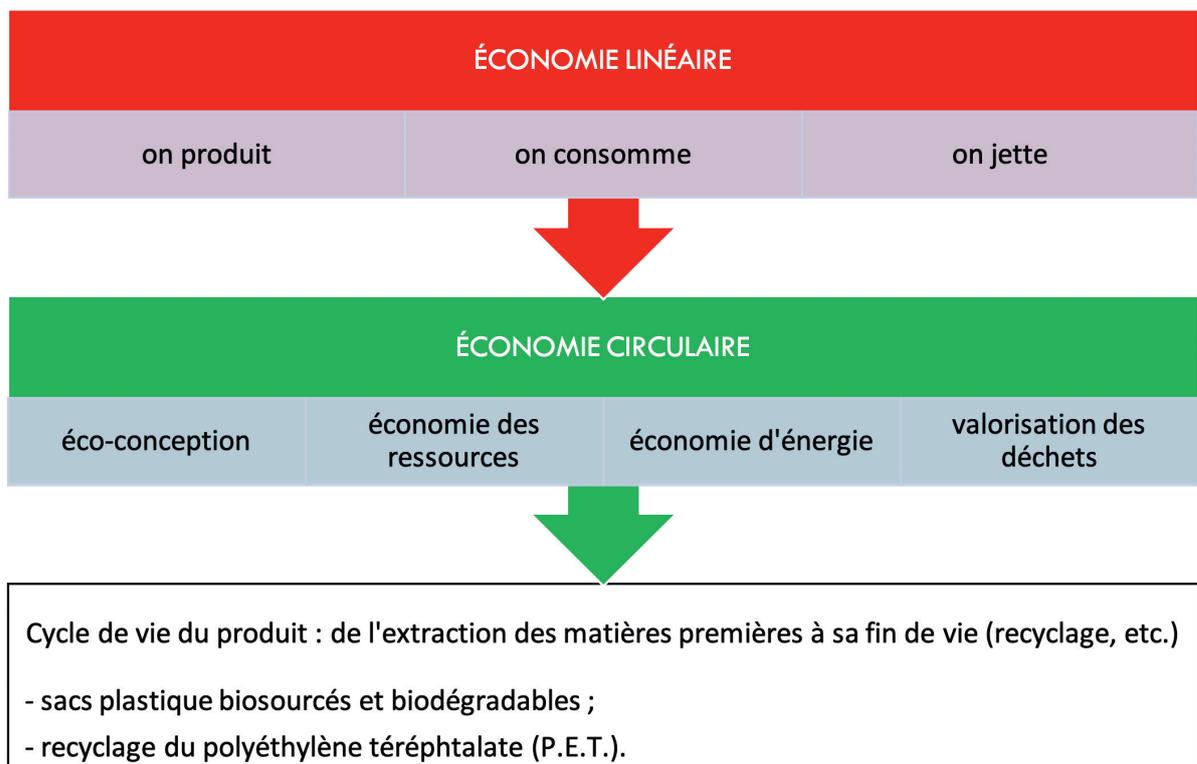
Pour aller plus loin

Les sujets liés au recyclage sont vastes et sources d'inspiration pour le Grand Oral. Voici quelques liens utiles proposés sur le site de Mediachimie :

- [Recycler nos déchets électroniques avec de l'eau à 500 °C sous 250 bars](#)
- [Le recyclage des plastiques](#)
- [Transformer les déchets en ressources](#)
- [Zoom sur la phytoremédiation des métaux lourds](#)
- [Le captage de CO₂ dans les fumées par absorption chimique réversible : comment ça marche](#)
- [Valorisation biologique des agro-ressources](#)
- [Des terres rares dans les aimants : recycler pour faire face à une demande exponentielle](#)

Utiliser le moteur de recherche de Mediachimie et vous en aurez bien d'autres !

EN RÉSUMÉ



LE PROJET PROFESSIONNEL

Pour des raisons environnementales, sanitaires, économiques et de raréfaction de certaines ressources naturelles, le recyclage s'impose à tous comme une nécessité absolue. Il concerne à la fois toutes les étapes de fabrication d'un objet ou produit ainsi que toutes les étapes de récupération des différents éléments de cet objet lorsqu'il est en fin de vie.

Sont concernés les métaux, les minéraux non métalliques, les matières plastiques (polymères organiques), les produits organiques divers et les produits multi composants dont les matériaux composites.

Chaque produit va nécessiter un traitement spécifique : on mesure donc l'ampleur du travail à accomplir pour envisager le recyclage des très nombreux produits existants dans notre quotidien. Prenons quelques exemples.

Les produits à mono-composant, les plus faciles à recycler

C'est par exemple le cas du verre d'emballage des bouteilles, pots et bocaux déposés dans les conteneurs à verre. Prétrié il peut être recyclé à 100 %. En effet, fondu il peut à nouveau être transformé en nouvelles bouteilles... En France, 3 bouteilles sur 4 sont recyclées, ce qui s'accompagne d'une économie notable d'émission de CO₂. [1]



Centre de récupération et de tri de bouteilles en verre à recycler
© LP/Arnaud Dumontier

Les papiers, cartons sont traités pour redonner de la fibre de cellulose qui sera réutilisée pour redonner des papiers et cartons. [2]

Parmi les polymères, citons le **polyéthylène, PE**, thermoplastique, (film d'emballage, bouteilles semi-rigides, opaques, utilisées pour les bouteilles de lait et les flacons de produits liquides d'entretien, jouets pour enfants, film d'emballage, film étirable alimentaire...). Une fois en centre de recyclage, il va être isolé, stocké, broyé, lavé, séché puis transformé en paillettes et incorporé dans de nouvelles applications. Chauffer à 200 degrés, il est prêt à entrer dans la composition de nouveaux objets en « plastique ». Par exemple le film rétractable industriel peut être recyclé à 100 % pour devenir film agricole, puis sac poubelle qui dans un dernier recyclage fournira de l'énergie par incinération. [3]

Les métaux ferreux et non ferreux tels que l'acier, le cuivre, le zinc ou le chrome s'utilisent comme matières premières ou lors d'étapes spécifiques dans la construction automobile, navale ou immobilière. L'aluminium compose certaines pièces automobiles, des encadrements de fenêtres, et surtout les canettes alimentaires (on utilise dans le monde 250 milliards de canettes / an). D'où le tri indispensable de ses déchets par le citoyen. Les canettes récupérées en déchetterie nécessitent une seule première fusion, ce qui représente une économie d'environ 95 % d'énergie à chaque nouvelle utilisation. D'autre part l'acier est recyclable à 100 %. [4]



Empilement de compressions de métal cubiques issues de chutes de production de canettes de boisson © AFP-Sébastien Bozon

Les produits à plusieurs composants. Ils sont de 2 types : ceux assemblés de pièces différentes mais chacune constituée d'un seul composant, et ceux dont les pièces sont des matériaux composites. Ces derniers sont actuellement les plus difficiles à recycler. Citons quelques exemples.

Les batteries

Pour les batteries des véhicules thermiques le recyclage est déjà en place depuis de très nombreuses années afin de récupérer le plomb. Les nouvelles batteries contiennent à la fois des métaux (tels que le lithium, le nickel...) dont les ressources sont limitées et en tension et des polymères (pour les électrolytes, le boîtier...). On peut facilement séparer les métaux des autres composants. Une filière spécifique doit s'organiser, notamment pour le recyclage du lithium. Consulter la ressource [5] « Les batteries lithium-ion : un recyclage en devenir ».



Usine de recyclage de batteries lithium-ion © Romaset

Les smartphones

Ils sont un condensé de chimie. Métaux et matériaux composites sont intimement imbriqués. Pour s'en faire une idée on consultera la ressource « [exploser un smartphone](#) ». Là aussi le recyclage est indispensable à réaliser.

Approfondir avec les ressources « Recyclage des équipements électroniques et des piles usagées » [2] et la vidéo du CNRS « Recycler nos déchets électroniques avec... de l'eau à 500° » concernant les métaux précieux récupérés [6].

Industrie nucléaire

Il s'agit de récupérer des matières valorisables (uranium et plutonium) des combustibles usés, puis de les recycler pour fabriquer de nouveaux combustibles comme le MOX qui sera réutilisé comme combustible nucléaire. [7]

Le cas du dioxyde de carbone produit en grande quantité par de nombreuses industries et dans la production d'énergie : il est essentiel de capter ce dioxyde de carbone afin de le neutraliser pour diminuer sa concentration dans l'atmosphère et ainsi réduire l'effet de serre. Une fois récupéré, il deviendra une source de matières premières pour donner des molécules chimiques carbonées. Ce n'est pas encore rentable mais très étudié. Voir la fiche grand oral « [Que faire du CO₂ ?](#) »

Pour des exemples de recyclage de matériaux, déjà effectifs, au stade de la recherche ou au stade industriel, retrouver les conférences du colloque : « [Le recyclage chimique en science des matériaux : vers une économie circulaire](#) », Rencontres académie-industrie, dont les conférences et résumés sont proposés sur le [site du CNC](#).

Rappel

Noter que le colloque à venir de novembre 2023 à la Fondation de la maison de la chimie aura pour thème Chimie et recyclage.

Les métiers de techniciens(ne)s et ingénieur(e)s les plus concernés pour faire avancer le recyclage en chimie sont ceux des domaines de la [R&D](#), des [procédés](#), de la [production](#), des [matériaux](#), de l'[électrochimie](#) et de l'[analyse](#).

• Les formations

Pour une sortie à Bac+2/3

Citons en particulier :

[BTS métiers de la chimie](#), [BTS pilotage de procédés](#), [BUT science et génie des matériaux parcours métiers du recyclage et de la valorisation des matériaux](#), [BUT génie chimique](#), [génie des procédés parcours conception des procédés et innovation technologique](#), [BUT chimie](#) et [BUT génie chimique et génie des procédés](#)

Pour une sortie à bac + 5/8

Écoles d'ingénieurs et masters accentuent leurs formations en développement durable, recyclage, éco-industrie, environnement et énergie, chimie durable et environnement...

Consulter les pages de chaque école d'ingénieurs de la [Fédération Gay-Lussac](#) (par exemple « De l'écoconception au recyclage » à Chimie Paris Tech) et les [masters des universités](#) (par exemple « Synthèse, formulation et recyclage des polymères » à Lyon 1).

Pour aller plus loin

[1] Sur le verre : Société [Paprec](#)

[2] [Recyclage et valorisation des déchets](#) (sur le site Mediachimie) (1- Papiers/cartons : les bons élèves du recyclage et du bilan carbone, 2- La valorisation des déchets ou leur traitement, 3- Recyclage des équipements électroniques et des piles usagées)

[3] Sur le polyéthylène : Sociétés [Ripack](#) et [Hubency PeHd souple](#)

[4] Pour les métaux non ferreux : société [Hubency ferrailles et métaux](#)

[5] Société Erdyn [Les batteries lithium-ion : un recyclage en devenir](#)

[6] [Recycler nos déchets électroniques avec... de l'eau à 500°](#) - vidéo CNRS

[7] Société Orano [recyclage des combustibles usés](#)

Sur le site Mediachimie :

- Zoom sur [L'éco-conception des produits de consommation : vers une économie circulaire. Exemple des peintures](#)
- La fiche [Les chimistes dans : l'économie circulaire](#)
- Zoom sur [Le génie des procédés](#)
- L'espace [métiers](#)

Ressources proposées en collaboration avec les équipes métiers/orientation de la Maison de la Chimie : Françoise Brénon et Gérard Roussel.