

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

Eric Bausson

Programmes spécifiques de physique-chimie pour les classes de première et de terminale Bac professionnel propres au groupement de Spécialités 5.

Le Groupement 5 rassemble les spécialités de baccalauréats professionnels mobilisant des compétences professionnelles qui nécessitent de solides connaissances dans le domaine de la chimie. Il réunit les spécialités de secteurs professionnels variés : l'industrie chimique, la bio-industrie, la cosmétologie, la teinturerie, les textiles, la plasturgie, l'esthétique, la gestion des pollutions et la protection de l'environnement, la verrerie, les plastique et composite...

MOTS-CLÉS :

économie circulaire, bioplastiques, PLA, batteries, recyclage.

ANGLE CHOISI :

À travers l'utilisation de documents de nature diverse, issus du site Media-chimie, le lecteur prendra conscience, si ce n'est pas déjà le cas, de la richesse de ce site et pourra poursuivre sa quête d'informations.



Le recyclage du verre © Futura Sciences

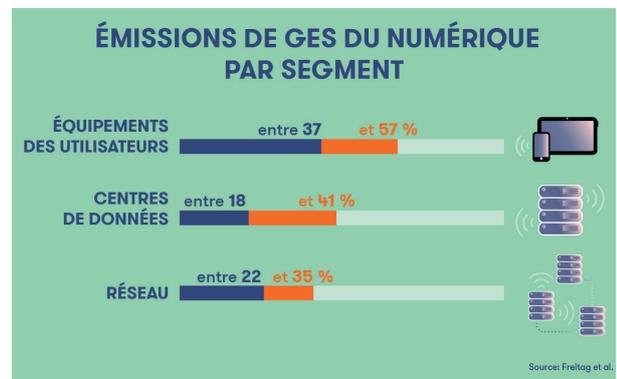
A. Introduction

Opérant à tous les niveaux, les transitions écologique et énergétique visent à mettre en place un modèle qui repense nos façons de consommer, de produire, de se déplacer, 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 en France ;
- un véhicule électrique nécessite six fois plus de matériaux pour sa production qu'un véhicule thermique ;
- l'empreinte matériaux est aussi à peu près six fois plus élevée 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...

À ces chiffres clés exprimés lors de cette conférence, ajoutons que l'impact des réseaux de communication, des terminaux et des usages du numérique sur l'environnement est un sujet d'attention croissant. Selon l'ARCEP (Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse), la consommation du numérique représente déjà, en 2023, 3 à 4 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le monde et 2,5 % de l'empreinte carbone en France.

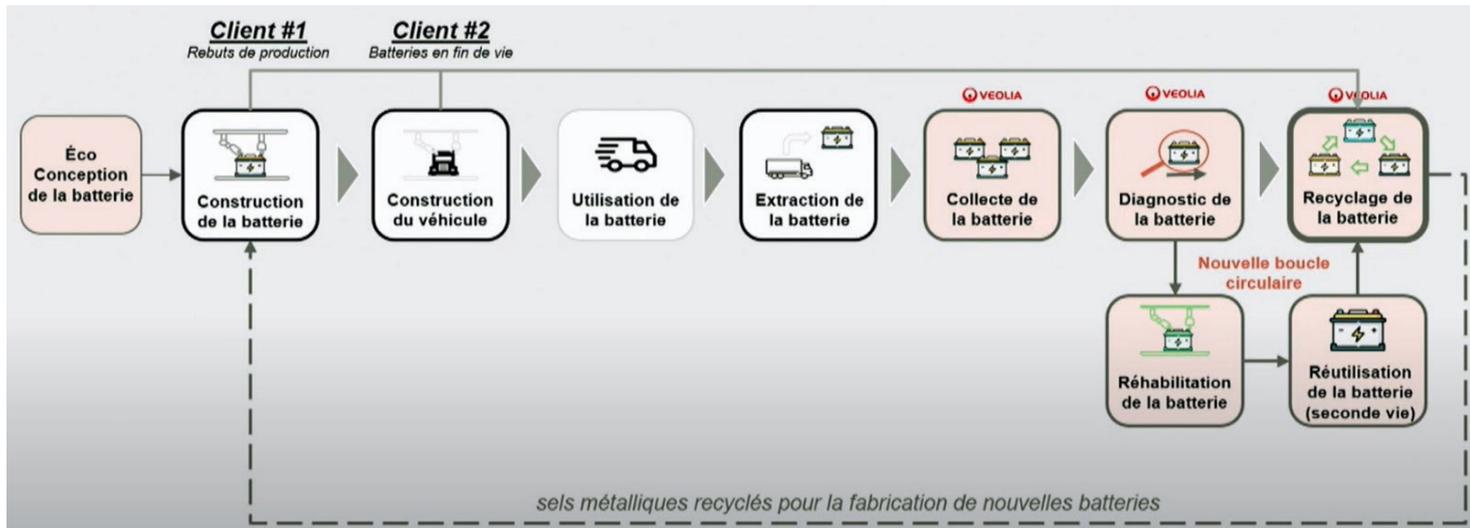


Pour faire face à ce constat et aux changements à opérer, il est nécessaire de réfléchir à une éco-conception (ou éco-design) visant à repenser dès leur conception toutes les étapes du cycle de vie du produit d'une manière plus responsable et durable. La chimie est bien entendu très sollicitée pour y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

Comme c'est le cas dans de multiples secteurs (énergie avec les pales d'éoliennes, ou les panneaux photovoltaïques, industries de construction ou de transport utilisant l'acier, l'aluminium et le cuivre, ainsi que leurs alliages...), les industries fabriquant des batteries électriques (voitures, téléphones portables, etc.) mettent en œuvre les principes de l'éco-conception pour faciliter leur recyclage en fin de vie.

1. Après 25 ans dans l'aluminium chez Pechiney, 6 ans dans l'acier comme CEO de Corus, 6 ans dans l'automobile chez P.S.A., ensuite 6 ans dans le nucléaire, Philippe Varin fut Président de France industrie jusqu'en 2020 et de Suez de 2020 à 2022.

Voici un exemple proposé par M. Pascal Muller lors de sa conférence « [L'hydromé-tallurgie au service du recyclage des batteries de véhicules électriques](#) » lors du colloque [Chimie, Recyclage et Economie circulaire](#) du 08/11/2023.



Dans cet exemple l'enjeu est de montrer comment recycler chimiquement l'équivalent de 10 000 à 20 000 tonnes batteries issues du broyage et pré-traitement de batteries de véhicules électriques afin d'en extraire les métaux stratégiques et les réintroduire dans les boucles industrielles de production.

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.

B. Les chimistes au cœur de l'économie circulaire

Pour des raisons environnementales et de raréfaction des ressources fossiles non renouvelables (pétrole, gaz, charbon, etc.), de nouveaux produits industriels doivent 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, produit ou objet 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 est aussi source d'innovations et d'économies.

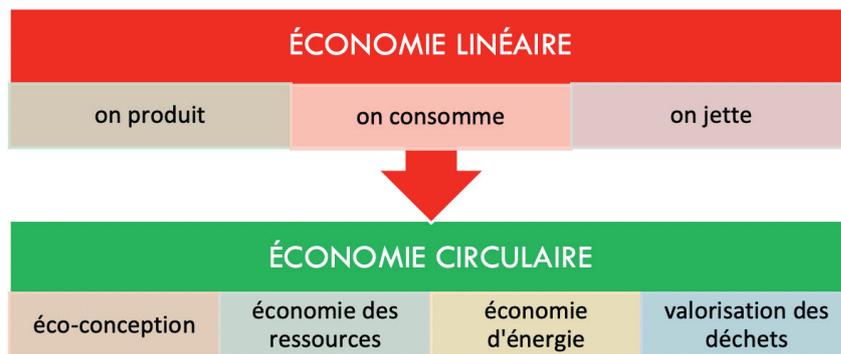
Source : [Les chimistes dans l'économie circulaire](#) – Françoise Brénon et Gérard Roussel

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 (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)



C. De l'amidon aux sacs bioplastiques et réciproquement ?

À partir du 1^{er} janvier 2017, l'interdiction des sacs plastiques 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. Cela est vrai en France mais surtout en Italie où le pays enregistre une baisse de 50 % de l'utilisation des sacs plastiques à usage unique (compostables ou non) en 3 ans (la consommation de sacs plastiques est passée de 180 000 tonnes à 90 000 tonnes entre 2010 et 2013).

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. Parmi ces matières premières, nous retrouvons l'amidon issu du maïs.



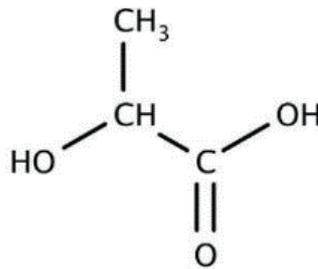
Amidon de maïs et grains de maïs. DR Bitmage

Activité 1 : Du maïs à l'acide lactique

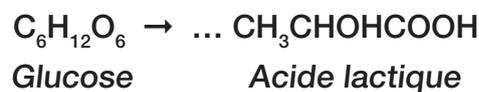
L'acide polylactique (PLA) est un exemple de biopolymère utilisé pour des sacs de nouvelle génération.

Il est fabriqué à partir d'acide lactique obtenu par fermentation bactérienne d'amidon ou de sucre.

- 1** Dans la formule chimique de l'acide lactique ci-dessous, entourer les deux groupements caractéristiques présents. En déduire les deux fonctions organiques présentes dans l'acide lactique.

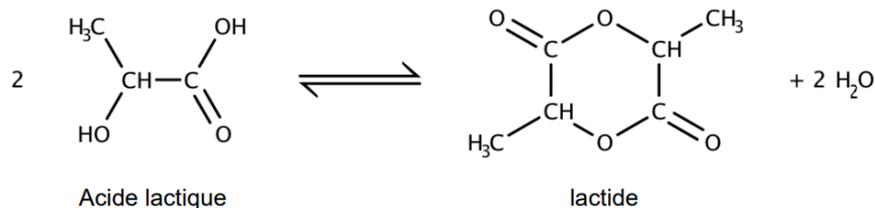


À partir d'amidon de maïs, glucide complexe formé d'unités de glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, la fermentation à l'aide de bactéries lactiques permet de former de l'acide lactique.

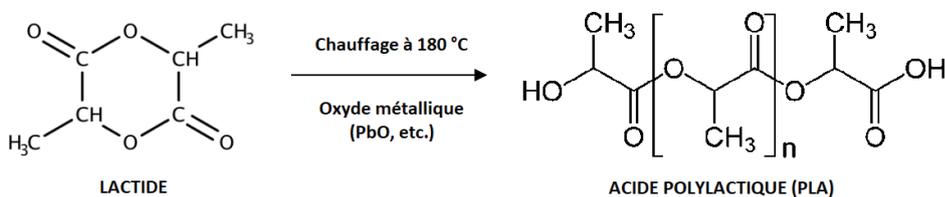


- 2** Compléter l'équation chimique ci-dessus en y indiquant le nombre stœchiométrique manquant.

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 :

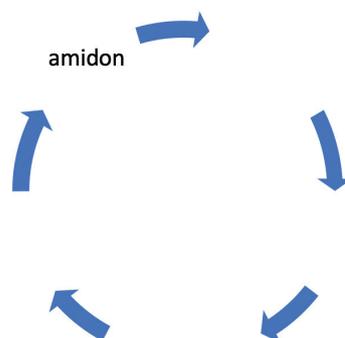


En fin de vie, ces plastiques formés d'acide polylactique sont dégradés par des micro-organismes (bactéries, champignons, algues). Généralement, cette propriété est liée à la présence de liaisons covalentes (liaison entre deux atomes résultant de la mise en commun d'électrons provenant séparément de chacun d'eux) qui peuvent facilement être rompues. 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 l'ensemble des étapes qui constituent la « vie » d'un produit, de l'extraction des matières premières qui le composent à son élimination en fin de vie, en passant par sa distribution et son utilisation.

Activité 2 : En résumé...

Compléter le diagramme ci-dessous avec les termes suivants : acide polylactique / CO_2 , H_2O , biosynthèse / acide lactique / lactide.



Parmi les nombreuses applications de l'acide polylactique, initialement blanc, citons sa présence dans des bobines de filaments utilisées dans l'impression 3D. L'impression 3D consiste à additionner de multiples couches d'un matériau donné pour fabriquer un objet en 3D, par exemple avec des dépôts successifs de fils d'acide polylactique en fusion.



Filaments de bobines imprimante 3D © Mika

Pour en savoir (beaucoup) 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
- Conférence du [colloque Chimie et matériaux stratégiques](#) – 09/11/2022 – [Le défi des matériaux polymères biosourcés](#) – Luc Averous – Mediachimie

D. Comment recycler les batteries électriques ?

De nouvelles règles européennes pour les batteries (appareils nomades, voitures, etc.) ont été adoptées en 2023 pour garantir qu'elles puissent être réutilisées, remises à neuf ou recyclées une fois arrivées en fin de vie. Tout ceci devrait favoriser l'économie circulaire et la stratégie industrielle de l'éco-conception au recyclage des batteries au sein de l'Union européenne.

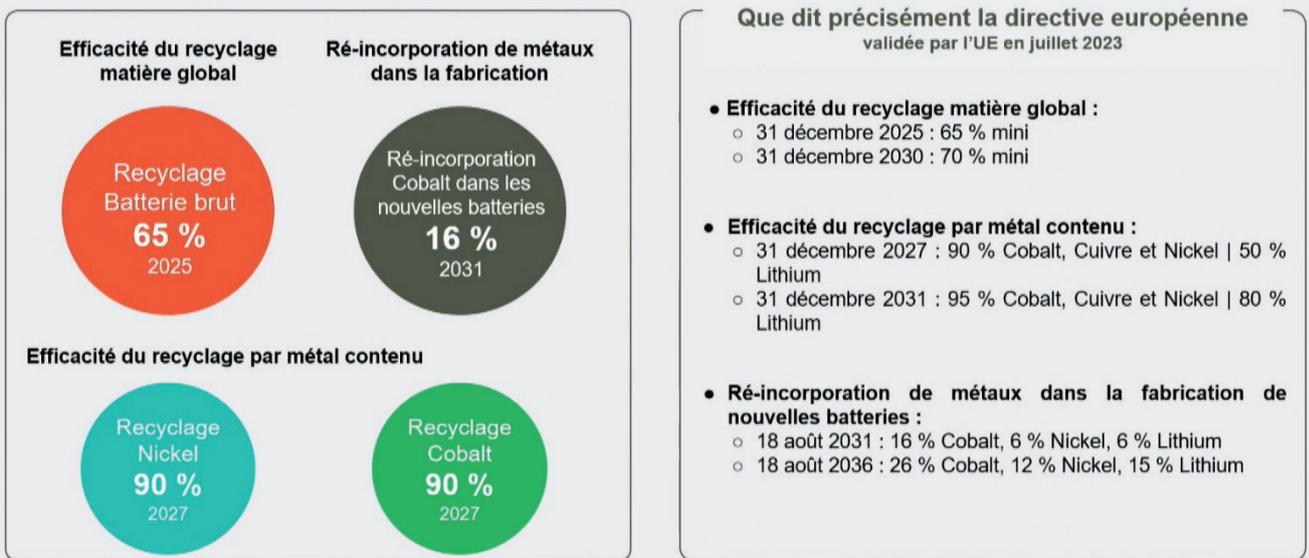


Usine de production de batteries de véhicules électriques © InsDev

Voici quelques objectifs que les industriels doivent atteindre à (très) court terme :

L'Europe en pointe sur les batteries à recycler

Une nouvelle directive européenne qui incite au recyclage



Source : Conférence « L'hydrométallurgie au service du recyclage des batteries de véhicules électriques » - M. Pascal Muller - Colloque « Chimie, Recyclage et Economie circulaire » du 08/11/2023.

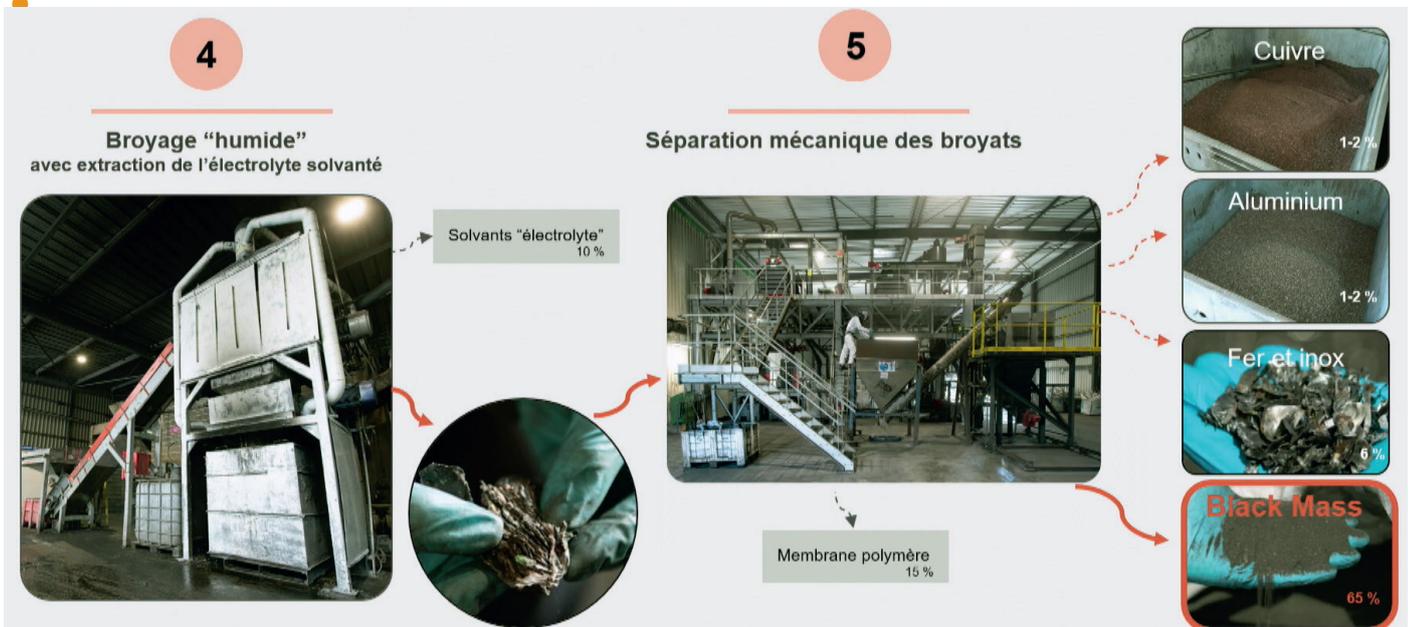
Pour en savoir plus sur les directives européennes sur les batteries électriques, cliquer [ici](#).

Il est donc crucial de rechercher et de continuer à développer des procédés industriels permettant d'optimiser le recyclage des métaux présents dans ces batteries.

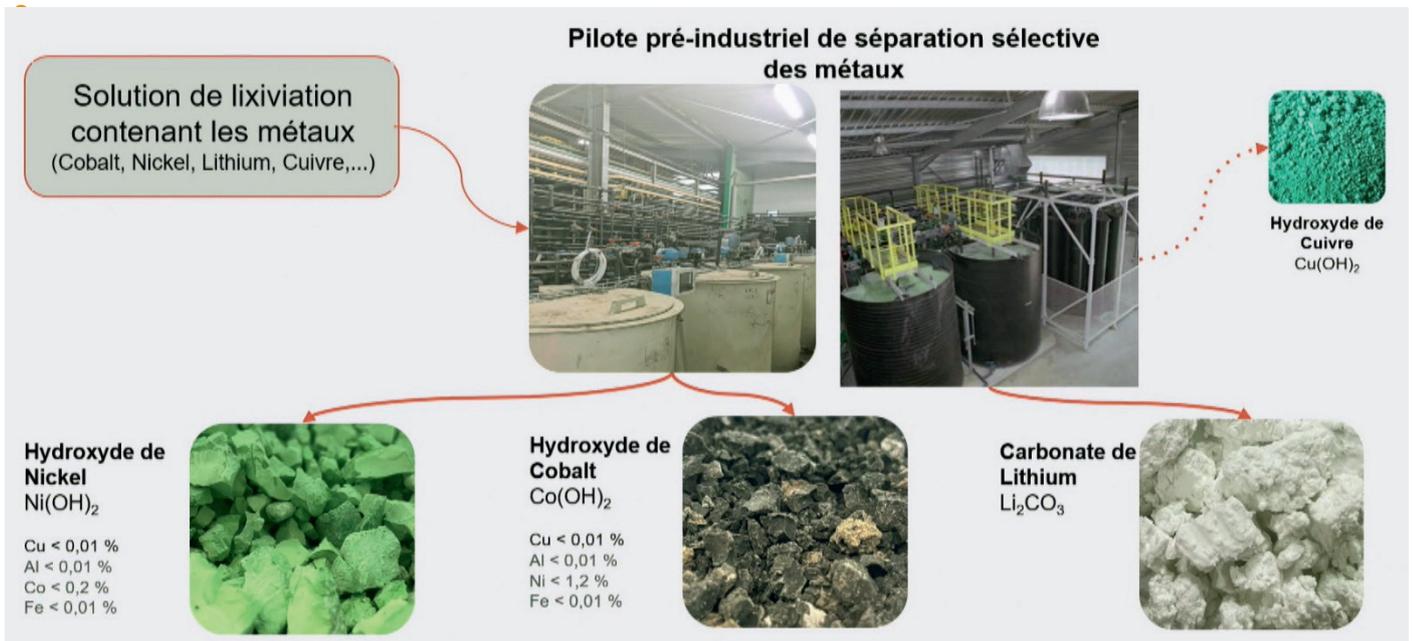
M. Pascal Muller, lors de sa conférence « L'hydrométallurgie au service du recyclage des batteries de véhicules électriques » lors du colloque [Chimie, Recyclage et Economie circulaire](#) du 08/11/2023, présente les grandes étapes du recyclage des métaux présents dans une batterie de voiture électrique :



Il faut tout d'abord décharger toutes les batteries avant de commencer à les démonter pour retirer les modules contenant des cellules, élément de base d'une batterie électrique.



Ensuite, après broyage et séparation mécanique, il est possible de séparer les solvants, les plastiques, les métaux et la « masse noire » (« black mass ») contenant des éléments chimiques très recherchés, comme le lithium et le cobalt, et du carbone.



La solution de lixiviation (du latin « lixivia » : lessive) est obtenue après dissolution chimique de la « masse noire » principalement en milieu acide. Après transformations chimiques et séparation, nous obtenons divers composés chimiques sous forme d'hydroxydes ou de carbonates permettant de récupérer les éléments chimiques de valeur.

Activité 3 : Une histoire d'ions

1 Sachant que l'ion hydroxyde a pour formule chimique HO^- , en déduire celles des ions nickel (Ni), cobalt (Co) et cuivre (Cu) présents dans les divers hydroxydes mentionnés dans l'illustration ci-dessus.

.....

.....

.....

2 Sachant que l'ion lithium a pour formule chimique Li^+ , en déduire celle de l'ion carbonate présent dans le carbonate de lithium Li_2CO_3 .

.....

Conclusion

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 donc 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. Cet objectif concerne également les productions existantes qu'il faudra abandonner, réadapter ou modifier.

Recycler est et restera donc 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.

Nous avons pris pour habitude de recycler nos déchets (verre, papier, métaux, etc.) et il faut accentuer nos efforts.

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 mais tout ceci a un coût qui se répercutera de toute façon sur le prix des biens de consommation ! Il faudrait donc consommer plus intelligemment... et donc avec sobriété.

Pour aller plus loin

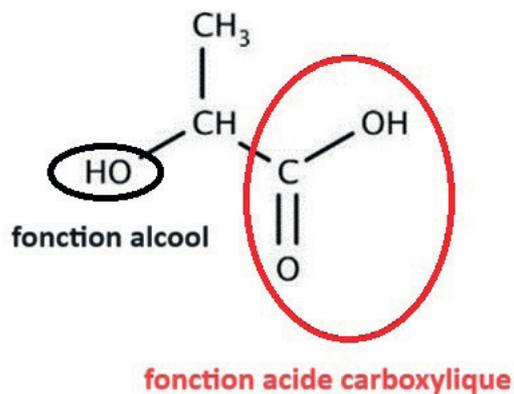
Les sujets liés au recyclage sont vastes. Voici quelques liens utiles sur Mediachimie :

- Vidéo du CNRS - [Recycler nos déchets électroniques avec de l'eau à 500 °C sous 250 bars](#)
- Vidéo de Véolia - [Le recyclage des plastiques](#)
- [Transformer les déchets en ressources](#) - Conférence de Madame Muriel Olivier
- [Zoom sur la phytoremédiation des métaux lourds](#) - Jean-Pierre Foulon
- [Le captage de CO₂ dans les fumées par absorption chimique réversible : comment ça marche](#) - Document EDF
- [Valorisation biologique des agro-ressources](#) - Pierre Monsan
- Vidéo « Des idées plein la tech » - [Des terres rares dans les aimants : recycler pour faire face à une demande exponentielle](#)

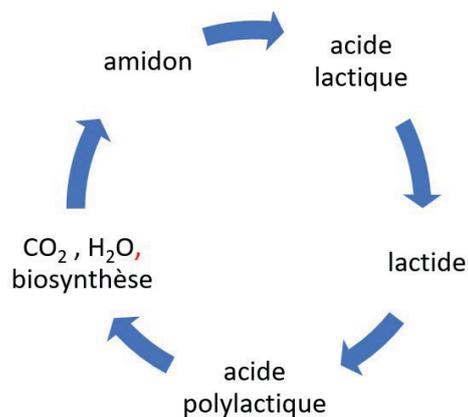
Utiliser le moteur de recherche de Mediachimie et vous en aurez bien d'autres !

Activité 1

1.

**Activité 2**

1.

**Activité 3**

1. Tout solide ionique étant électriquement neutre, voici les formules de ces trois ions :

- Ni^{2+}
- Co^{2+}
- Cu^{2+}

2. Li_2CO_3 contenant deux ions Li^+ le groupement carbonate doit contenir deux charges négatives donc il s'agit de CO_3^{2-} .

VOTRE PROJET PROFESSIONNEL

Les métiers d'opérateurs et opératrices, 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](#).



Technicien unité de recyclage de plastiques en fibre de carbone © Bio1



Opérateurs électrochimie © INP

Les formations

[Pour une sortie au niveau CAP, Bac Pro et Bac technologique](#), en tant qu'opérateur, citons en particulier les CAP Employé technique de laboratoire et des Métiers des industries chimiques, les Bacs pro Laboratoire contrôle qualité, Procédés de la chimie, de l'eau et des papiers cartons, bio-industries de transformation, Traitement des matériaux et les Bac technologiques STL et STI2D.



Jeunes en formation Bac Pro Procédés de la chimie, de l'eau et des papiers cartons © Lycée Lavoisier (78)

Il est bien sûr possible de continuer sa formation.

[Pour une sortie à Bac + 2/3](#), citons en particulier

- [BTS métiers de la chimie](#) et [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 et les licences pro dédiées.](#)

Puis [pour une sortie à bac + 5/8](#)

Ecoles 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 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.

Du Bac Pro au diplôme d'ingénieur, un certain nombre de ces formations peuvent se faire soit en formation continue soit par la voie de l'alternance en apprentissage.

Partie orientation proposée et rédigée par Françoise Brénon
et Gérard Roussel (Maison de la Chimie)