



Chimie recyclage et économie circulaire

Armand Ajdari
Jacques Amouroux
Hervé Antonsanti
Jean-Christophe Arnal
Estelle Cheret
Jean-Michel Douarre
Jean-François Gérard
Lama Itani
Olivier Larcher
Katell Le Lannic
Constance Maréchal-Dereu
Fanny Mas
Pascal Muller
Yohan Parsa
Renaud Rohe

*Coordonné par
Danièle Olivier
et Paul Rigny*



Chimie et recyclage et économie circulaire



Chimie, Recyclage et Économie Circulaire

Mercredi 8 novembre 2023

Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie, Recyclage et Économie circulaire »
qui s'est déroulé le 8 novembre 2023 à la Maison de la Chimie.

« COLLECTION CHIMIE ET ... »

Collection dirigée par Philippe Gœbel

Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Chimie et recyclage et économie circulaire

Armand Ajdari, Jacques Amouroux, Hervé Antonsanti, Jean-Christophe Arnal,
Estelle Cheret, Jean-Michel Douarre, Jean-François Gérard, Lama Itani,
Olivier Larcher, Katell Le Lannic, Constance Maréchal-Dereu, Fanny Mas,
Pascal Muller, Yohan Parsa, Renaud Rohe

Coordonné par Danièle Olivier et Paul Rigny

Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
Pascal Ferrari

Crédits couverture :
Images Adobe Stock : © Therina Groenewald – © monticelllo –
© saelim – © sida – © VisualProduction – © Janar Siniväli –
© Andrei Merkulov – © Joaquin Corbalan

Mise en pages et couverture : Patrick Leleux PAO
Conception graphique, visuel du colloque : CB Defretin

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-3624-6

ISBN (ebook) : 978-2-7598-3625-3

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© 2025 – Fondation de la Maison de la Chimie

Fondation de la Maison de la Chimie
28, rue Saint-Dominique
75007 Paris, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Armand Ajdari

*Vice-président R&D du groupe
Arkema*

Jacques Amouroux

*Professeur DC émérite, DHC
– École nationale supérieure
de Chimie de Paris/PSL –
Université Pierre et Marie
Curie/Sorbonne Université*

Hervé Antonsanti

*Chef de service, Directeur
de la branche Valorisation,
traitement des déchets,
entreprise Pizzorno*

Jean-Christophe Arnal

*Docteur en génie des procédés
et directeur de l'usine de
fabrication du verre plat sur
le site Saint-Gobain d'Aniche-
Émerchicourt*

Estelle Cheret

*TotalEnergies VP OneTech
R&D Downstream Process
& Polymers*

Jean-Michel Douarre

*Responsable du programme
de Recherche sur les
Matériaux, Michelin*

Jean-François Gérard

*Directeur adjoint scientifique
CNRS Chimie, directeur
programme PEPR « Recyclage,
Recyclabilité & Réutilisation
des Matériaux », professeur
INSA Lyon – Ingénierie des
Matériaux Polymères UMR
5223 CNRS*

Lama Itani

*Solvay, Rhodia Opérations,
Terres Rares Business Line*

Olivier Larcher

*Solvay, Rhodia Opérations,
Terres Rares Business Line*

Katell Le Lannic

*Responsable du service
R&D Recyclage chimique
des plastiques TotalEnergies
OneTech Belgium*

Constance Maréchal-Dereu

*Cheffe du service de l'industrie
à la Direction générale
des entreprises (ministère
de l'Économie, des Finances
et de la Souveraineté
industrielle et numérique).
Précédemment directrice
générale de France
Logistique*

Fanny Mas

*Ingénieure Recherche et
Développement en métallurgie
chez Constellium*

Pascal Muller

*Directeur, Pôle Hauts
de France et Grand Est,
Sarpi Veolia*

Yohan Parsa

*Directeur Recherche
& Développement de Rosi Solar*

Renaud Rohe

*Solvay, Rhodia Opérations,
Terres Rares Business Line*

Équipe éditoriale :

*Danièle Olivier
et Paul Rigny*

Sommaire

Avant-propos, par Paul Rigny	9
Préface, par Danièle Olivier	11

Partie 1 : Recyclage des composites et des polymères

Chapitre 1 : Recycler les matériaux, une des réponses pour une économie circulaire : illustration pour les polymères par Jean-François Gérard	17
--	----

Chapitre 2 : Recyclage des plastiques vers une économie circulaire par Estelle Cheret et Katell Le Lannic	37
---	----

Chapitre 3 : L'émergence de l'économie circulaire du pneu : un défi passionnant ! par Jean-Michel Douarre	47
---	----

Chapitre 4 : Matériaux de spécialité pour une économie circulaire : illustration sur le recyclage des pales d'éoliennes par Armand Ajdari	57
--	----

Partie 2 : Recyclage et transition énergétique

Chapitre 5 : Le recyclage des matériaux : Enjeux et stratégie – procédés chimiques et bioprocédés par Jacques Amouroux	73
---	----

Chapitre 6 : Le recyclage des terres rares : une stratégie d'approvisionnement à la taille de leurs enjeux par Lama Itani, Olivier Larcher et Renaud Rohe	97
--	----

Chapitre 7 : L'hydrométallurgie au service du recyclage des batteries de véhicules électriques
par **Pascal Muller** 109

Chapitre 8 : Industrie photovoltaïque : les enjeux de la circularité
par **Yohan Parsa** 125

Partie 3 : Problématique du recyclage et de l'économie circulaire des matériaux de grande diffusion

Chapitre 9 : Recyclage de l'aluminium : enjeux, défis et opportunités
par **Fanny Mas** 143

Chapitre 10 : Recyclage du verre plat
par **Jean-Christophe Arnal** 157

Chapitre 11 : Tri et valorisation de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, l'installation de Pierrefeu
par **Hervé Antonsanti** 169

Chapitre 12 : Stratégie pour accélérer l'économie circulaire
par **Constance Maréchal-Dereu** 179

Avant- propos

Le recyclage des matériaux par et pour l'industrie ! Quel problème !

Voilà qu'en une génération, on est passé d'une attitude négative – pour ne pas dire méprisante – sur ce domaine à un véritable enthousiasme. Ce serait même le sauveur de la civilisation. L'industrie était développée et on savait qu'il nous faudrait des quantités toujours plus importantes de matières premières, mais on avait confiance : la brillante activité minière du xx^e siècle ne montrait-elle pas que tout existait dans la planète Terre et qu'avec de l'imagination et du travail... on aurait ce qui était nécessaire ?

C'est la démographie qui a fait exploser cet optimisme. En passant de trois milliards à sept milliards d'habitants au xx^e siècle, on a compris les limites essentielles : le développement annonce l'épuisement des ressources (le cas du pétrole + gaz est le plus spectaculaire), l'explosion des quantités de déchets « à stocker » comme si on pouvait s'en débarrasser, leurs effets mortels, le cas du CO_2 qui nous promet le changement climatique étant même générateur de paniques de plus en plus affolées.

Depuis les années 2000, l'humanité comprend de mieux en mieux qu'elle est menacée par elle-même. Et progressivement, elle se mobilise pour chercher et exploiter les moyens de fuir ce destin mortel. Tout le monde s'implique : les industries, les écoles, les associations de citoyens de partout : Europe, Amérique, Asie et les autres. Tout le monde sollicite les exemples du passé et surtout l'imagination et le travail des chercheurs dans toutes les disciplines techniques et scientifiques. Imaginons, imaginons, imaginons encore : pour être plus sobres, pour comprendre et respecter la nature et sa diversité impressionnante qui peut nous servir de modèle pour économiser les ressources ! Facile à dire, peut-être, mais pas facile à faire dans un monde devenu global et encore gouverné par l'économie et la concurrence.

Petit à petit, le pessimisme, né de la prise conscience de nos excès potentiellement mortels, fait place à des réalisations magnifiques qui viennent contrer les mauvaises tendances. Nous voyons dans ce colloque « Chimie, recyclage et économie circulaire » les exemples et les résultats

d'entreprises qui intègrent ou ont intégré le recyclage dans leur stratégie et leur pratique. Par des exemples sur des composants techniques de la vie quotidienne (les pneus, le verre plat, les plastiques), on saisit mieux les défis posés aux entreprises et aux laboratoires... Et des aventures industrielles et scientifiques similaires se généralisent aujourd'hui dans le pays ou dans des collaborations internationales.

Et puis, bien naturellement, on insiste aussi dans cet ouvrage sur la question de l'énergie, si prioritaire qu'elle ne laisse personne indifférent : où la prendre si la Terre ne la fournit plus ? Le soleil, le vent sont sacrés comme des sauveurs, mais qu'en est-il vraiment ? Comment pourra-t-on préserver une accessibilité économique dans ces domaines si concurrentiels ? De beaux exposés montrent comment la réalité prend ces préoccupations en charge.

Et ces « matériaux rares » mobilisés comme jamais par la civilisation technologique, dont nous ne pouvons pas imaginer qu'elle disparaisse, par quoi les remplacer ? Nos téléphones portables en dépendent ! On se tourne vers la sobriété avec de nombreux exemples de succès pratiques des plus concrets : il nous faut les connaître.

Ces développements nous emmènent dans des chemins que nous ne soupçonnions même pas il y a peu. Déjà, depuis 150 ans, les chimistes avaient ouvert une magnifique nouvelle branche dans les laboratoires : la chimie des polymères. Sans se contenter d'étonner et d'émerveiller les laboratoires, elle avait conquis

l'estime étonnée des industriels qui en avaient imaginé et obtenu des prouesses de performances pour contourner ou différer les obstacles au développement... que l'on pense à l'industrie textile – supprimez les polymères, que reste-t-il aujourd'hui dans les magasins de mode ou d'équipements divers ? Et comment sont alors faites les voitures, retournent-elles à la lourdeur et au manque de souplesse d'antan ? Et bien, les polymères eux aussi terminent leur vie en déchets si l'on ne fait rien. Il faut apprendre à les traiter, eux aussi sont consommateurs de science avec toute leur capacité de s'adapter et de diversifier leurs natures chimiques. Les laboratoires ont proposé des techniques et, aujourd'hui, des entreprises les mettent en œuvre. Et recycler les plastiques n'est plus un mystère pour qui a assisté aux exposés du colloque.

Les efforts qui sont présentés dans ce colloque montrent qu'on est bien passé du pessimisme originel à une démarche énergique et responsable déjà couronnée de beaux succès. La démarche continuera, c'est évident. Parce que les objectifs sont toujours nombreux, que le contexte national (la demande des citoyens) et international y conduisent. Également parce que les laboratoires se mobilisent, laissant espérer de nouvelles idées, de nouvelles entreprises et de nouveaux succès.

Le recyclage : nouvelles motivations pour les laboratoires et les entreprises !

Paul Rigny
Conseiller du président
de la Fondation de la Maison
de la Chimie

Préface

Le thème du recyclage est un sujet d'actualité dont les défis à résoudre sont fondamentaux pour l'avenir de la planète.

On en parle beaucoup et partout, pas toujours de façon rigoureuse et réaliste sur le plan scientifique et il est important que le grand public, et notamment les jeunes, prennent conscience qu'il ne suffit pas de bien trier ses ordures et que la mise en œuvre d'un recyclage et d'une économie circulaire efficace est un problème difficile, complexe et financièrement coûteux.

Non seulement il faut gérer la logistique de la gestion des produits usagés et des déchets, mais il faut mettre en œuvre une nouvelle discipline de déconstruction et de reconstruction de la matière, coûteuse, dans laquelle les chimistes jouent et joueront un rôle important.

Pour faire le point dans les principaux domaines, nous avons donc fait appel à des experts scientifiques industriels et universitaires qui ont accepté de faire l'effort pédagogique pour être compris par

tous, notamment par le jeune public.

Cet ouvrage rassemble les versions écrites des conférences du colloque du 8 novembre 2023. Pour des raisons d'homogénéité thématique et de compréhension pédagogique, le sommaire n'est pas présenté dans le même ordre que les vidéos des conférences du colloque.

Compte tenu de l'importance de la gestion des déchets plastiques, nous avons rassemblé dans la première partie les présentations dédiées au recyclage des composites et des polymères.

Dans le premier chapitre, **Jean-François Gérard**, directeur scientifique adjoint de l'Institut de chimie du CNRS et responsable du Programme de recherche national coordonné par le CNRS sur le recyclage de cinq principales classes de matériaux (plastiques, composites, métaux stratégiques, textiles, papier/cartons), a centré son intervention sur le recyclage des polymères.

Les trois chapitres suivants sont dédiés aux recyclages industriels développés par les grands groupes pour faire face aux tonnages croissants.

Estelle Cheret, responsable de R&D des polymères, présente les différentes technologies sur lesquelles **TotalEnergies** travaille pour trouver des solutions pour aider à être plus vertueux vis-à-vis de l'utilisation et du développement de l'économie circulaire des plastiques, l'ambition étant de produire 30 % de polymères recyclés et renouvelables d'ici 2030.

Jean-Michel Douarre décrit l'émergence de l'économie circulaire du pneu alors que, aujourd'hui, plus de la moitié des pneus européens en fin de vie sont encore exportés. Dans ce cadre, il présente les actions mises en place par **Michelin** dans le cycle de vie du pneu et dans la capacité de pouvoir recycler le pneu usé dans le pneu neuf en développant des technologies permettant de trouver des solutions de valorisation des pneus en fin de vie non réutilisables.

Armand Ajdari, directeur de la R&D, **expose les solutions mises au point par Arkema** dans le champ de l'économie circulaire pour permettre le recyclage des polymères de grande diffusion et pour produire des matériaux avancés intrinsèquement recyclables. **Il traite notamment le cas particulier** par la dimension et les volumes importants attendus **des éoliennes**. Il présente les défis actuels et futurs et les voies de recyclage possibles avec la résine Elium mise au point par Arkema.

Ce chapitre fait la transition avec **la deuxième partie de cet ouvrage qui rassemble les**

articles sur le recyclage et la transition énergétique.

Jacques Amoureux présente les problèmes posés par : d'une part, **les procédés de recyclage** technique dans les cas **des batteries et du photovoltaïque**, et d'autre part, **les bioprocédés appliqués au recyclage du gaz carbonique et des lanthanides** qui apparaissent comme un enjeu stratégique.

Pascal Muller montre comment **le Groupe Veolia explore des voies de recyclage des batteries des véhicules électriques en fin de vie et des sous-produits de leurs productions**. Il présente les méthodes prenant en compte la gestion des risques intrinsèques à la manipulation de batteries usagées, leur mise en sécurité, leur démantèlement, le broyage des fractions unitaires et l'extraction sélective des métaux stratégiques par voie chimique. Ces travaux ont abouti à un premier concept pilote qui a confirmé la pertinence de ces technologies.

Actuellement, 70 à 80 % des véhicules électriques et 100 % des éoliennes « off-shore » fonctionnent grâce aux aimants à terres rares (TR). Pour sa transition énergétique et pour la mobilité, l'Europe aura besoin de TR, mais malheureusement elle n'en dispose pas et c'est le problème aujourd'hui.

Lama Itani explique comment les décennies d'expertise que Solvay a dans le domaine des terres rares ont permis de mettre au point **les procédés**

de recyclage des aimants à TR issus des équipements en fin de vie, qui constituent une mine urbaine dont l'exploitation contribuera à la préservation des ressources naturelles, car les TR recyclées présenteront les mêmes performances que celles des TR primaires.

L'énergie photovoltaïque permet maintenant de remplacer rapidement et à un coût compétitif les énergies fossiles, mais elle doit encore satisfaire à d'importantes exigences quant à sa circularité, car les quantités de modules arrivant en fin de vie sont en pleine explosion. Les techniques de broyage des panneaux photovoltaïques sont largement inefficaces puisqu'elles ne permettent ni de récupérer l'entièreté des matériaux, ni de le faire avec un haut niveau de pureté. L'innovation et le développement de procédés dédiés permettent de relever ces défis. **Yohan Parsa** (Directeur Recherche et Développement, **Rosi Solar**) décrit l'émergence de ces procédés de recyclage à haute valeur ajoutée, permettant de mettre en place des solutions plus durables **pour le traitement des déchets photovoltaïques**.

Les défis et enjeux du recyclage des matériaux usuels sont présentés dans la troisième partie.

Dans le chapitre de **Fanny Mas**, nous voyons que **le processus de recyclage de l'aluminium** ne nécessite que 5% de l'énergie nécessaire à la production d'aluminium primaire et qu'il permet la récupération des déchets d'aluminium usagé. La canette en aluminium qui se

recycle très bien est un parfait exemple de cette économie circulaire.

Les différentes méthodes utilisées par **Constellium** pour stimuler le recyclage de l'aluminium sont exposées. Une nouvelle métallurgie est en train de voir le jour, riche de nombreux sujets de recherche, comme la nécessité de développer des alliages capables d'absorber les déchets issus des blocs moteurs des voitures thermiques en fin de vie.

Le verre fait partie de notre quotidien, il se retrouve partout et sa particularité est d'être recyclable à l'infini. Il s'inscrit donc naturellement dans un projet d'économie circulaire.

Bien développées pour les bouteilles, les filières de recyclage pour le verre plat sont cependant moins matures. **En cela, le recyclage du verre plat décrit dans le chapitre de Jean-Christophe Arnal (Saint-Gobain)** est donc un sujet d'actualité qui s'inscrit dans une évolution nécessaire des comportements.

Hervé Antonsanti, industriel spécialisé dans la gestion des déchets ménagers (**Entreprise Pizzorno**), montre qu'il est possible de concevoir des solutions innovantes pour transformer ces déchets en ressources à partir de l'exemple de la **réutilisation des résidus urbains issus des déchets ménagers incinérés, appelés mâchefers**, en utilisant des technologies intelligentes, d'une part pour améliorer la collecte, le tri et le recyclage, d'autre part en développant une technologie de réutilisation du produit issu

des mâchefers en l'intégrant dans le béton pour la fabrication de pavés biorecyclés. Ainsi, les déchets d'hier deviennent de véritables ressources de demain.

Le chapitre de conclusion de cet ouvrage est issu de la conférence de clôture du colloque présentée par **Constance Maréchal-Dereu**. Il a pour objectif de présenter **les stratégies nationales mises en œuvre pour accélérer l'économie circulaire**.

Cet ouvrage a pour objectif d'apporter des informations utiles, récentes et scientifiquement rigoureuses, sur un sujet d'actualité important pour notre société. Nous souhaitons être utiles à tous les publics et notamment aux enseignants.

Dans ce cadre, nous avons conscience que la richesse et le niveau du contenu de certains textes, malgré les efforts des auteurs, demandent encore un gros travail pour être directement exploitables en classe. C'est pourquoi, le contenu de cet ouvrage a servi de base pour la rédaction de fiches pédagogiques, adaptées aux programmes de l'enseignement secondaire, fiches que vous retrouverez dans l'espace enseignement de notre médiathèque www.mediachimie.org.

Nous vous souhaitons une bonne lecture.

Danièle Olivier
*Vice-présidente de la Fondation
internationale de la Maison
de la Chimie*

Partie 1

Recyclage des composites
et des polymères

Recycler les matériaux, une des réponses pour une économie circulaire : illustration pour les polymères

Jean-François Gérard, directeur adjoint scientifique CNRS Chimie, directeur programme PEPR « Recyclage, Recyclabilité & Réutilisation des Matériaux », professeur INSA Lyon – Ingénierie des Matériaux Polymères UMR 5223 CNRS

L'objectif de ce chapitre est de montrer l'implication de la communauté scientifique et comment celle-ci travaille sur les problématiques de recyclage, de recyclabilité et de réutilisation des matières. Le rôle des scientifiques est d'apporter des connaissances scientifiques ouvrant sur des solutions technologiques

permettant de répondre à ces enjeux majeurs pour notre société. Ensuite, les politiques pourront également s'emparer de leurs travaux pour pouvoir les mettre en place dans des politiques publiques. La problématique du recyclage est très systémique, il ne faut pas en avoir une vision parcellaire. C'est l'ambition

de l'engagement de la communauté scientifique dans sa grande diversité disciplinaire, identifier des questions scientifiques originales porteuses de ruptures technologiques.

1 Circularité et matériaux : un chemin important à parcourir

Le programme confié au CNRS pour le recyclage, la recyclabilité et la réutilisation des matières dans le cadre du programme *France 2030* et l'une de ses stratégies nationales d'accélération (SNA), concerne cinq grandes classes de matériaux.

1.1. Matériaux stratégiques et terres rares

La première est celle des métaux stratégiques. On peut

les définir différemment selon le périmètre que l'on prend.

Sur le tableau périodique (*Figure 1*), issu de travaux du BRGM, le code couleur montre que peu d'éléments sont aujourd'hui recyclés et réutilisés en termes de matériaux. Un élément dont on parle beaucoup est le lithium qui a aujourd'hui un taux de recyclage extrêmement faible, alors que nous avons des gisements potentiellement très importants qui sont traditionnellement issus des domaines de l'électronique et l'électroménager (*Figure 2*). Les gisements des batteries de type Li-ion sont en constante croissance ces dernières années.

Des filières industrielles sont déjà organisées sur ces problématiques. Le recyclage des produits en fin de vie est un vrai problème, car souvent on n'a pas un objet mono-matériau mais un produit qui contient plusieurs matériaux. Il est donc nécessaire dans un premier temps de démonter le produit avant de considérer les matériaux eux-mêmes pour leur recyclage.

De nouveaux gisements apparaissent comme ceux issus des nouvelles technologies de l'énergie : l'éolien (dans les rotors et les aimants) ou le photovoltaïque (les terres rares¹). Dans les piles, on utilise également des nanoparticules² de platine en faibles quantités, mais les éléments sont très importants. Il y a

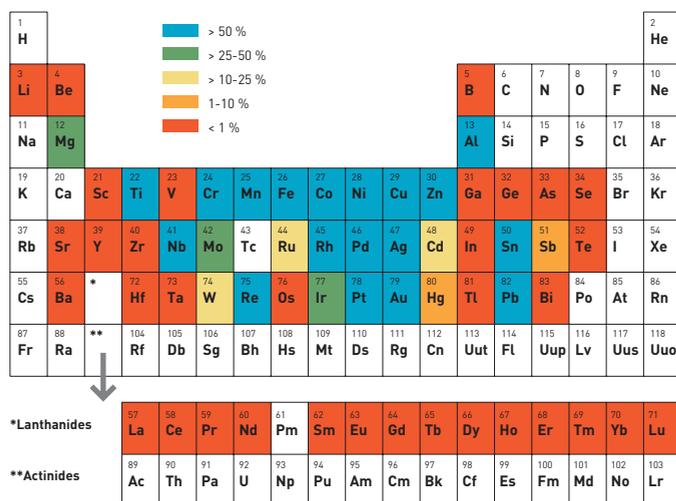


Figure 1

Taux de recyclage des métaux des produits en fin de vie. Les couleurs indiquent les éléments recyclés et ceux qui sont réutilisés directement. Les pourcentages désignent le taux de recyclabilité pratiqué.

Source : UNEP 2011

1. Un groupe de métaux aux propriétés voisines comprenant le scandium Sc, l'yttrium Y et les quinze lanthanides.

2. Des molécules dont la taille varie entre 1 et 100 nanomètres.

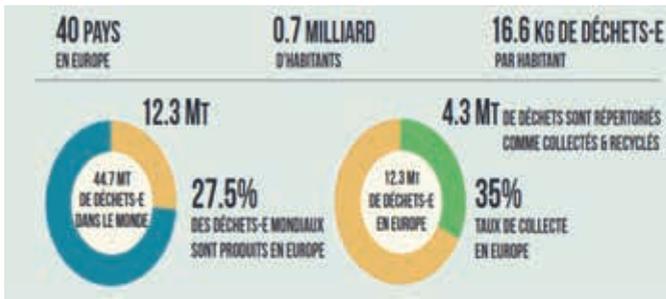


Figure 2

Part des déchets mondiaux produits en Europe en 2016.

Source : Baldé, 2017

aussi, bien entendu, le domaine des batteries. C'est un domaine extrêmement important qui est à considérer dans le futur comme une source de gisement de matériaux stratégiques très divers et en quantité.

1.2. Matériaux composites : des gisements croissants

Le deuxième type de matériaux sur lequel la stratégie nationale souhaite mobiliser des travaux de recherche est celui des matériaux composites³. Les matériaux composites sont typiquement des objets complexes par nature, faisant appel à l'association d'au moins deux types de matériaux : des fibres et une matrice⁴ le plus souvent polymère. On les connaît depuis longtemps dans le domaine maritime pour les bateaux et le nautisme. On peut penser aussi à l'aéronautique ou au domaine spatial, cela représente des quantités de déchets

relativement faibles à l'échelle mondiale.

Si on analyse l'évolution de l'implantation mondiale des éoliennes (Figure 3), le recyclage devient un élément essentiel de la chaîne de valeur. Sont typiquement concernés les déchets des pales ou des mâts d'éoliennes pour lesquels très peu de solutions vertueuses sont développées à l'échelle industrielle. Celles-ci font appel à la mise en décharge, c'est-à-dire

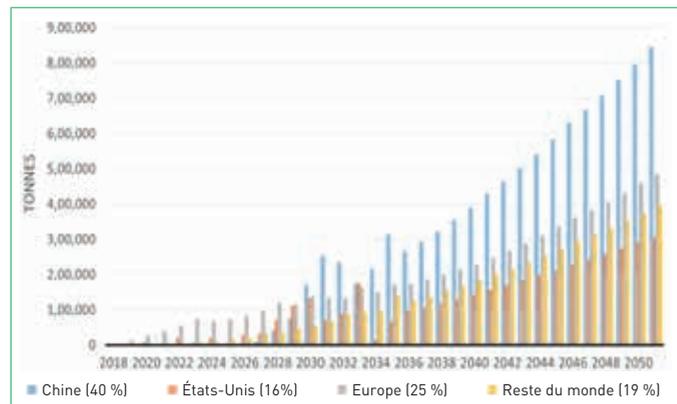


Figure 3

Prévisions d'évolution des quantités de déchets issues des éoliennes par région du monde jusqu'en 2050.

Source : P. Liu et al., 2017

3. Un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles donnant des propriétés améliorées.

4. Un matériau permettant d'assurer la tenue chimique et la cohésion du matériau tout en donnant la forme souhaitée au produit final.

l'enfouissement. Un gros travail est donc nécessaire sur ce sujet.

1.3. Les textiles : encore très peu de valorisation matière

Le troisième type de gisement important à recycler est celui des textiles, en particulier les textiles de l'habillement. Leur recyclage « matière » est encore très faible car aujourd'hui la plupart des textiles (73 %) sont mis en décharge ou sont incinérés.

Généralement dans nos pays européens, les déchets textiles sont exportés. Extrêmement peu des matériaux qui constituent le textile sont réutilisés en tant que matériaux pour faire de nouveaux textiles ou pour une autre application. C'est un défi très important, comme pour les autres précédents matériaux, où des méthodologies de chimie doivent être travaillées pour permettre une extraction, la décoloration et

une purification, de ces matériaux comme le polyester, le polyamide ou le polyuréthane mais aussi les substances naturelles (*Figure 4*).

1.4. Les papiers/cartons : un recyclage important

Le quatrième type de matériaux auxquels sont destinées les actions de la stratégie nationale est celui des papiers et cartons. C'est un domaine où le recyclage est déjà important. On recycle en effet près de 80 % des papiers et cartons mais on conduit ce qu'on appelle du *downcycling*⁵, c'est-à-dire que la réutilisation du papier et du carton est faite dans des utilisations qui sont de moindre valeur que celles des produits de départ. Il y a là un vrai challenge car le papier est un matériau complexe avec une industrie et des procédés qui sont

5. Décyclage, « infrarecyclage ».

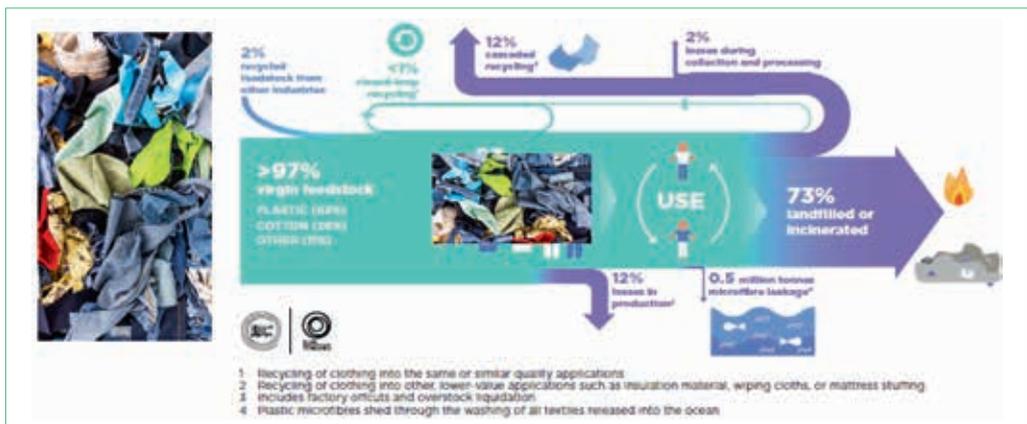


Figure 4

Taux de recyclage des déchets textiles en 2015 pour le monde.

Source : A New Textile Economy, E. McArthur Foundation, 2017

extrêmement impactants aux étapes de production mais aussi de recyclage, avec les processus de blanchiment, de désencrage, etc.

Ce sont des procédés sur lesquels il faut travailler pour réduire leur impact environnemental, en particulier au niveau de l'utilisation d'eau et de composés chimiques. De plus, les investissements industriels sont très importants, à la fois les investissements initiaux, ce qu'on appelle les CAPEX (c'est-à-dire la mobilisation de fonds au départ pour construire des usines), puis les coûts opérationnels (OPEX) qui sont également très élevés car les installations industrielles sont très lourdes en termes de maintenance. Il faut donc travailler sur la réutilisation du papier pour que l'on puisse faire autre chose que ce fameux downcycling en étant capables de générer des matériaux de haute valeur ajoutée et/ou de concevoir des produits de valeur au moins égale à ceux des matières dont ils sont issus.

1.5. Les polymères

Enfin le dernier type de matériaux à recycler apparaît comme le plus important : ce sont les plastiques, ou plus exactement les polymères⁶. On commence aujourd'hui pour certains à les recycler mais encore trop se retrouvent dans l'environnement sous forme de nano et micro plastiques, et on en met encore trop en décharge. C'est une problématique très

importante puisque les polymères sont partout tout autour de nous : dans les objets de notre quotidien comme les emballages ou l'électroménager, l'habillement, l'automobile, le bâtiment...

Une courbe intéressante issue de *Plastics Europe* qui, chaque année, produit des statistiques sur les polymères, leur production, leurs usages et leurs fins de vie, est présentée (Figure 5). Aujourd'hui en Europe, on recycle environ 30 à 40 % des plastiques, on en brûle environ 40 % et le reste est mis en décharge. La France est au milieu des pays européens, avec un taux de recyclage trop faible encore par rapport à la mise en décharge. On pourrait envisager de les incinérer pour produire de l'énergie, comme le font les pays du Nord qui

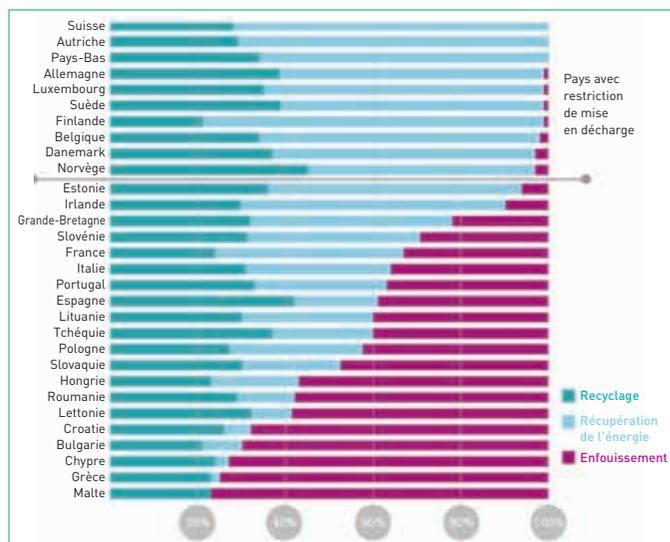


Figure 5

Le devenir des plastiques en fin de vie (recyclage, incinération, mise en décharge) dans les pays de l'Union européenne en 2018.

Source : Plastics Europe. Plastics the Facts, 2019

6. Des molécules de masse molaire élevée constituée d'une chaîne de motifs semblables et répétitifs appelés unités monomères.

sont vertueux au sens où ils mettent moins de plastiques en décharge que les pays du Sud. C'est une question importante mais difficile parce que l'incinération est un sujet de débats difficiles en France.

En plus de ces cinq classes de matériaux, il faudrait bien entendu aussi parler du verre, des déchets inertes du bâtiment et plus largement du BTP, etc. mais la stratégie nationale d'accélération « Recyclage, Recyclabilité & Ré-Utilisation des Matières » se focalise sur les matériaux évoqués ci-dessus.

L'objectif de la stratégie nationale d'accélération, et plus précisément du programme d'équipements et de projets de recherche (PEPR) qui lui est attaché, est réellement de travailler sur la circularité des matières, afin d'avoir un minimum de prélèvement de matières premières sur les ressources naturelles qu'elles soient fossiles ou renouvelables, issues de la

biomasse avec des impacts environnemental et énergétique minimaux.

2 Économie circulaire et matériaux

Pour les problématiques d'économie circulaire, le recyclage est une des solutions mais ne peut pas être la seule mobilisée (Figure 6).

La première solution est de reconcevoir les matériaux. La chimie a alors un rôle très important pour travailler sur les ressources utilisées comme dans le cas des polymères ou des matériaux composites (ressources fossiles ou renouvelables). Il faut bien entendu aussi intégrer tout le cycle de vie et s'intéresser aux étapes de fin de vie dans la conception même des matières.

La deuxième solution est de repenser les procédés de formulation et de mise en forme des matériaux pour qu'ils soient plus économes en énergie dans toutes les étapes de leur synthèse, formulation, mise en forme, usages, etc., et que certaines étapes par exemple n'utilisent pas de solvants. Là aussi le chimiste a beaucoup à faire. Il faut travailler sur l'éco-conception car, comme on l'a dit, les objets que nous utilisons sont souvent multi-matériaux. Une simple brique d'eau par exemple est un produit complexe : un bouchon, probablement en polypropylène⁷ ou en



Figure 6

Les contributions à l'économie circulaire et à des matériaux responsables. En bleu, figurent des matériaux directement réutilisés ; en vert, les matériaux recyclés, c'est-à-dire réutilisés après traitement industriel.

Source : GoLocal, 2018

7. Un polymère thermoplastique (modelable à haute température) issu de la polymérisation du propylène, un hydrocarbure simple ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$).

polyéthylène⁸, un corps fait de polyéthylène, de papier/carton et d'aluminium, afin que tout soit étanche. Donc ce n'est pas une problématique d'un matériau proprement dit mais une problématique « produit ».

Le troisième aspect à travailler pour avoir une meilleure circularité est de repenser aussi les usages, c'est-à-dire d'intégrer des fonctionnalités multiples aux matériaux pour ne pas les multiplier dans un produit donné. Par exemple, dans un objet tel que la brique d'eau, où l'on utilise du papier/carton avec un polymère pour garantir l'étanchéité et de l'aluminium pour garantir l'imperméabilité, on peut essayer de travailler sur un mono-matériau qui intégrera ces trois fonctions plutôt que d'associer trois matériaux qui seront difficiles à séparer par la suite en démantelant le produit complexe.

Le quatrième point est de travailler sur la durabilité, c'est-à-dire la capacité des matériaux et des objets à durer, c'est-à-dire à s'autoréparer ou à se réparer sous un stimulus extérieur comme un changement de température ou sous l'action de la lumière. Beaucoup de travaux sont actuellement en cours sur ce point.

Enfin, le dernier aspect, et c'est là que le recyclage intervient, c'est de pouvoir garantir la circularité et de pouvoir réutiliser les matériaux, soit sous leur forme initiale, soit sous une autre forme. Pour le textile typiquement, on récupérera

le polymère, le polyester et/ou le coton pour en refaire un textile, une chaise ou un autre objet.

3 La mobilisation de la recherche académique au sein d'un PEPR : Recyclage, recyclabilité et ré-utilisation des matières de France 2030

Un projet national lancé pour les six années à venir par *France 2030* a été confié au CNRS pour mobiliser la communauté scientifique autour du recyclage, de la recyclabilité, de la réutilisation des matières. Beaucoup de travaux ont été faits ou sont en cours, mais cette implication des scientifiques français manque de coordination pour apporter des réponses pertinentes aux questions technologiques posées et leur donner une visibilité européenne.

Le CNRS est chargé de coordonner ces travaux dans le cadre d'une stratégie d'accélération (**Figure 7**). D'autres stratégies d'accélération de ce type ont également été lancées : sur l'hydrogène décarboné, sur les batteries, sur la décarbonisation de l'industrie, sur le calcul ou les technologies quantiques⁹... Le programme PEPR « Recyclage, recyclabilité et ré-utilisation des matières » est donc un programme qui mobilise un budget de l'ordre de quelques dizaines de millions dans cette stratégie qui mobilisera environ un milliard d'euros.

8. Un des polymères thermoplastiques les plus répandus synthétisé à partir d'éthylène ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$).

9. Des calculs s'appuyant sur les lois de la physique quantique.

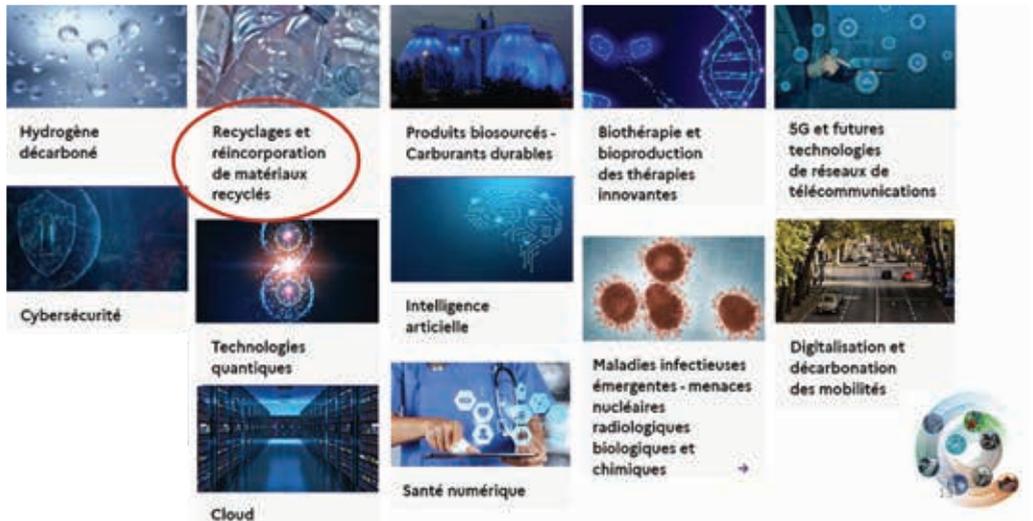


Figure 7

Stratégies nationales d'accélération lancées par le gouvernement (PEPR/Stratégie).

Ce programme de recherche est couplé avec d'autres actions (Figure 8), comme celle consacrée aux formations nécessaires à mettre en place pour développer les métiers nécessaires au déploiement de la stratégie, et celles liées à la

montée en termes de maturité industrielle (TRL) pour aller jusqu'au déploiement industriel.

Le travail des scientifiques est de produire la science et les connaissances qui sont nécessaires pour passer à

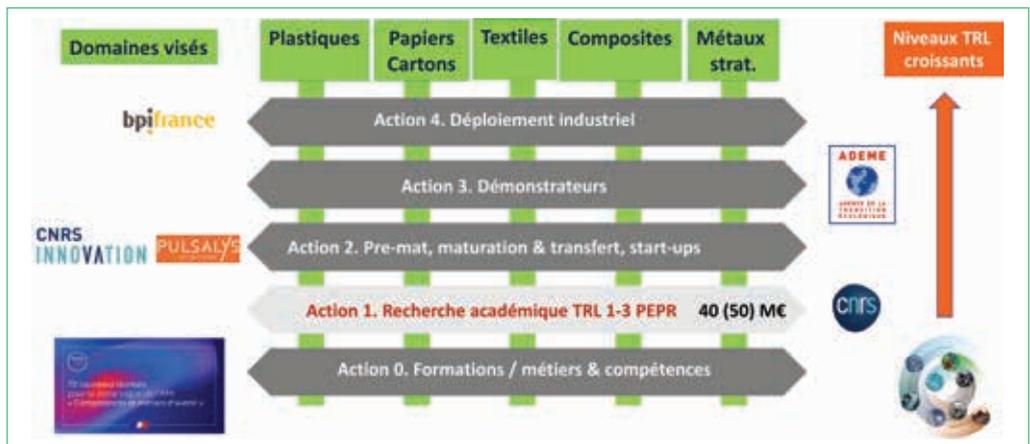


Figure 8

Stratégie d'accélération : recyclabilité, recyclage et réincorporation des matières recyclées. Opérations de formations pour la mise en œuvre de la stratégie de développement du recyclage ou de l'incorporation des matières premières recyclées.

l'innovation et au déploiement industriel. C'est un bel exemple pour ne pas opposer la recherche fondamentale à la recherche dite appliquée et montrer que des vraies questions de recherche peuvent être issues de problématiques technologiques.

Le programme PEPR mobilise aujourd'hui environ 80 laboratoires et, à terme, peut-être le double, autour des cinq grandes classes de matériaux, en mobilisant les sciences de la matière, de la chimie, de la physique, de l'ingénierie, etc. Par exemple, recycler des plastiques fera appel à des procédés chimiques différents de ceux de l'hydrométallurgie¹⁰ déployée pour les métaux stratégiques, de la chimie ou de la physico-chimie mobilisables pour les papiers et cartons. Le programme est ainsi basé sur cinq axes correspondant aux matières précédemment évoquées.

La problématique du recyclage est toutefois une problématique transdisciplinaire qui nécessite une attention particulière pour son animation scientifique, mais aussi de considérer une approche systémique qui implique plus encore d'expertises scientifiques. Il faut alors considérer les problèmes posés dans un système global et avoir une vision qu'on appelle holistique¹¹ de la problématique du recyclage. Il sera donc important de considérer toutes les étapes comme celle où il faudra savoir comment identifier

les matériaux sur une chaîne de tri, comment les séparer. Ce seront alors des problématiques de spectroscopie, de robotique ou encore de numérique qui devront être déployées. Mais il sera essentiel de prendre en compte les volets de toxicologie : quels sont les polluants présents sur les déchets que l'on collecte ? Quels sont les polluants ou les produits que l'on va former pendant les étapes de recyclage ?

Il est aussi important de s'intéresser à l'ensemble du cycle de vie du produit. Chaque objet a en effet une histoire différente et des moyens potentiellement spécifiques développés en fin de vie.

Ce sont aussi des problématiques économiques : il faut identifier les flux, les gisements de ressources à récupérer, leur localisation et les quantités disponibles à différentes échelles (locale, nationale, européenne). Il est ainsi très important d'avoir l'ensemble de ces outils d'analyse pour justifier le déploiement de filières industrielles. Ce sont aussi des problématiques de normalisation et avoir la capacité de s'interroger sur les lois ou des normes en cours aujourd'hui ou qui pourraient être mises en place. Les questions sont nombreuses : quels matériaux pour quels usages ? Quelles sont les capacités et les moyens nécessaires pour organiser le recyclage ? y compris les problématiques de sociologie et de perception et d'acceptabilité du citoyen. En effet, il paraît essentiel d'avoir l'ensemble de ces réponses avant de mettre en place une politique publique

10. Procédé de purification des métaux.

11. Qui s'intéresse à une problématique dans sa globalité.

afin d'anticiper et de mesurer ses effets.

Les problématiques qui intéressent les chercheurs impliqués dans le programme PEPR sont donc globales et mobilisent des chimistes, des physiciens, des ingénieurs, des économistes, des sociologues, des spécialistes du droit, etc.

Ce n'est pas une démarche impliquant strictement les matériaux, mais, comme on l'a dit, les produits, c'est-à-dire les matériaux au sein des objets. Pour cela, on s'intéressera à travers des projets dits transverses à des filières « produits », comme les

batteries, les nouvelles technologies de l'énergie, les DEEE (équipements électriques et électroniques) ou encore des déchets ménagers.

4 Le recyclage : contribution à la circularité des matériaux polymères

4.1. Polymères et recyclage

Si l'on s'intéresse aux prévisions mondiales de croissance de la production des polymères (*Figure 9*), aujourd'hui ce sont 400 millions de tonnes de polymères environ qui

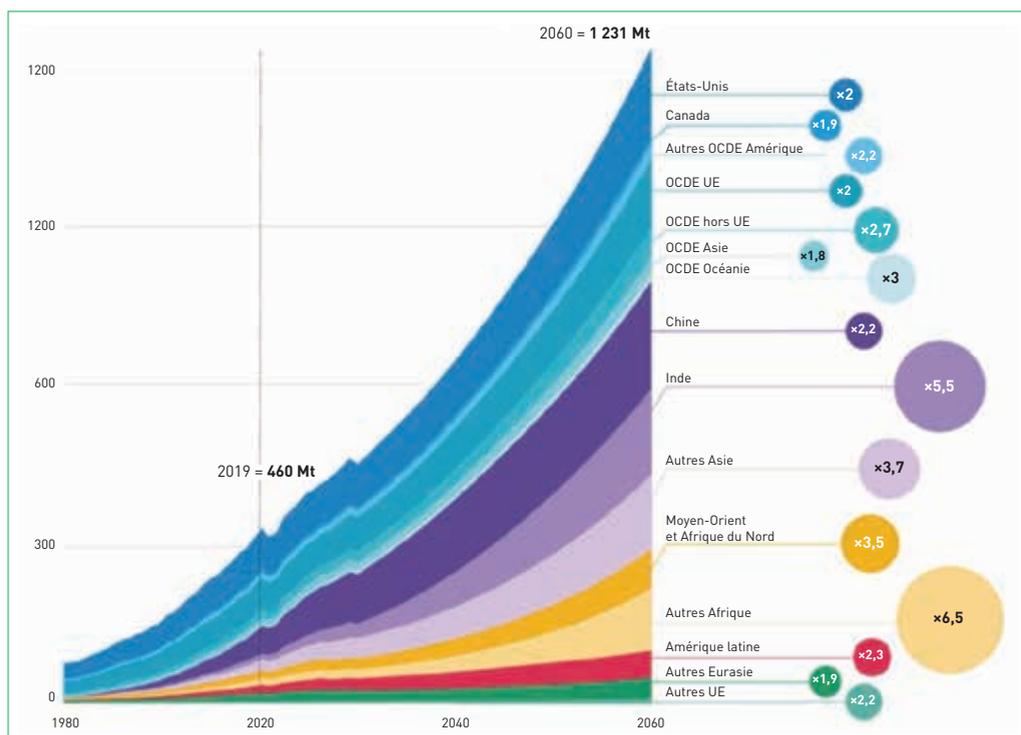


Figure 9

Prévisions mondiales de croissance de production des polymères de 1990 à 2060.

Source : Global Plastics Outlook OCDE – Policy scenarios to 2060, 2020

sont produites chaque année. Aujourd'hui, on utilise environ 6 à 7 % des ressources pétrolières pour synthétiser des plastiques, le reste de ces ressources est destiné à la génération d'énergie et au transport. L'Europe n'est pas en forte croissance pour la production et l'utilisation de plastiques alors que des pays comme la Chine sont dans des dynamiques d'expansion très importante.

De nombreux types de plastiques sont aujourd'hui utilisés car on a réussi, au fil du temps, à les concevoir pour chaque usage grâce à la recherche en chimie et matériaux. Toutefois, quand on observe les types de polymère produits et utilisés, le nombre de familles est en fait limité (Figure 10).

La plupart des polymères utilisés sont des polyoléfines¹² (polyéthylènes et polypropylènes). Le polystyrène¹³, le PVC¹⁴ et le PET¹⁵ (poly éthylène téréphtalate) comptent aussi parmi les polymères les plus rencontrés. Quand on s'intéresse alors à leurs applications, les emballages, la construction et l'automobile sont les principaux marchés des polymères cités ci-dessus, chacun étant plus spécifiquement utilisé dans un domaine

d'application donné. Par exemple, aujourd'hui le PVC n'est plus utilisé pour l'emballage car les bouteilles alors incinérées avec les ordures ménagères contribuaient à la formation de fumées acides, mais ce polymère est largement utilisé pour le bâtiment : fenêtres, tubes de canalisations, goulottes électriques...

Il faut noter que ces polymères, polymères à priori les plus simples dans leur composition chimique, sont les plus difficiles à recycler et qu'ils n'ont pas été conçus en intégrant leur recyclabilité.

Aujourd'hui, cette production voisine de 400 millions de tonnes (Figure 11) est issue de ressources fossiles et encore très peu de polymères sont issus du recyclage et encore moins de bioressources (Figure 12). Aujourd'hui, une part des objectifs est dédiée à la substitution des polymères pétro-sourcés par des polymères issus de bioressources qui doivent posséder

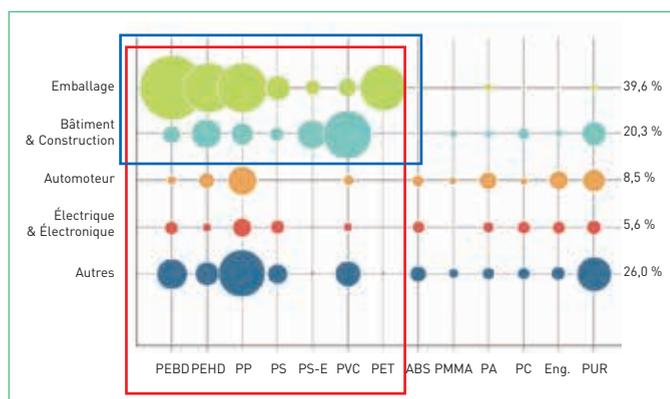


Figure 10

Demande européenne en plastiques par domaine d'activité et type de polymère.

Source : Plastics Europe, 2020

12. Des polymères issus de la polymérisation d'alcènes (C_nH_{2n}).

13. Polymère dont le monomère est le styrène formé d'un cycle benzénique substitué par la fonction $CH=CH_2$.

14. Le polychlorure de vinyle est un polymère thermoplastique semi-cristallin.

15. Un polyester saturé thermoplastique est obtenu par exemple par condensation de l'acide téréphtalique avec l'éthylène glycol.

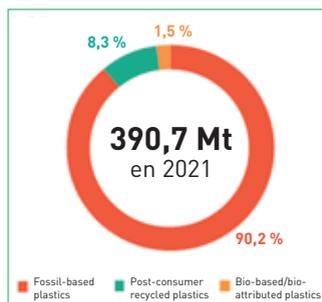


Figure 11

Origine des polymères utilisés par l'industrie mondiale en 2021.

Source : Plastics Europe, 2022

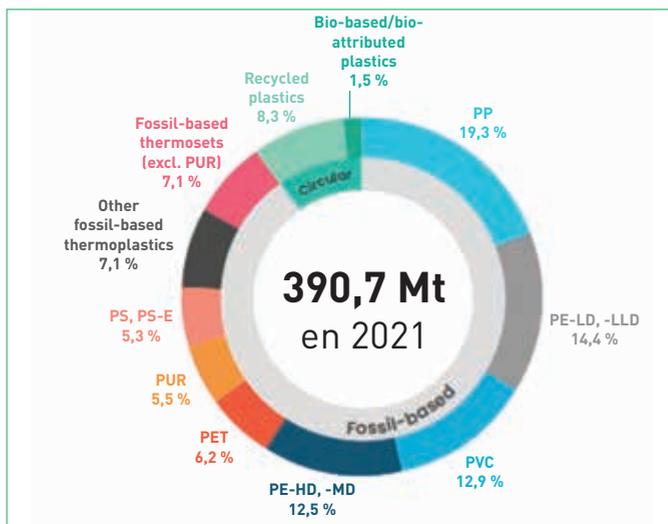


Figure 12

Types de polymères rencontrés par l'industrie mondiale en 2021.

Source : plastics Europe, 2022

les mêmes propriétés que les précédents avec des coûts compatibles avec les diverses utilisations.

Le recyclage vient alors remettre en cause la vision linéaire que l'on avait de l'économie des matières jusqu'alors pratiquée (Figure 13) depuis leur production jusqu'à leur fin de vie, étapes accompagnées d'émissions de CO₂. Contrairement à cette économie linéaire, une démarche d'économie circulaire se pense justement en développant une boucle fermée pour les matières, en réutilisant celles-ci avec un minimum de ressources entrantes et de sorties de cette circularité, comme une mise en décharge ou une incinération (Figure 14).

Selon la nature chimique des polymères, plusieurs procédés de recyclage sont possibles (Figure 15).

Le premier est le recyclage mécanique pouvant être pratiqué avec des polymères thermoplastiques. Par exemple, le polyéthylène ou le polypropylène qui sont des polymères de ce type, vont être capables à haute température de s'écouler puisque les chaînes ne sont pas liées chimiquement (réticulées). On a donc la capacité de les reformer par remise en forme en température : c'est ce qu'on appelle le recyclage mécanique. N'étant pas réticulés¹⁶, on peut aussi les dissoudre dans un solvant pour ensuite les purifier comme pour le polychlorure de vinyle ou le polystyrène. Cette dernière méthode est souvent classée comme un recyclage chimique mais le polymère

16. Existence de liaisons covalentes interchaînes (intermoléculaires) empêchant l'écoulement des chaînes individuellement.

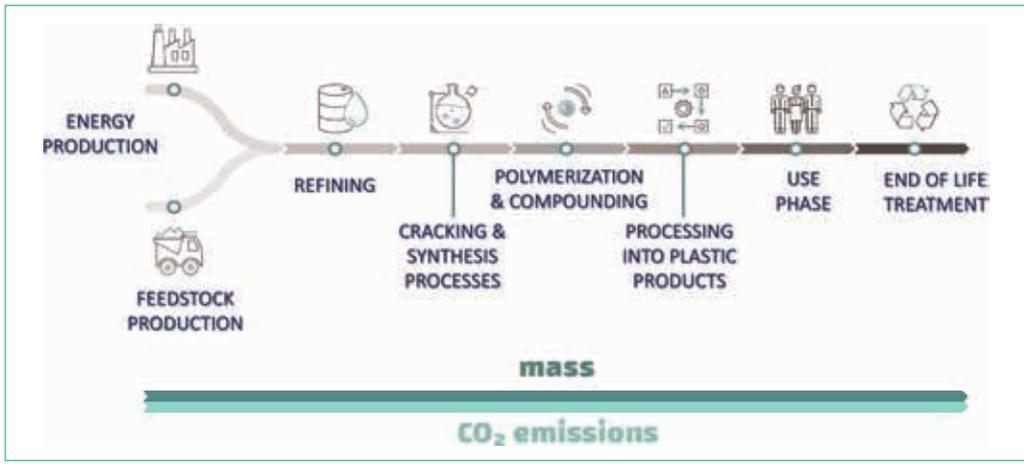


Figure 13

Économie linéaire pour les polymères.

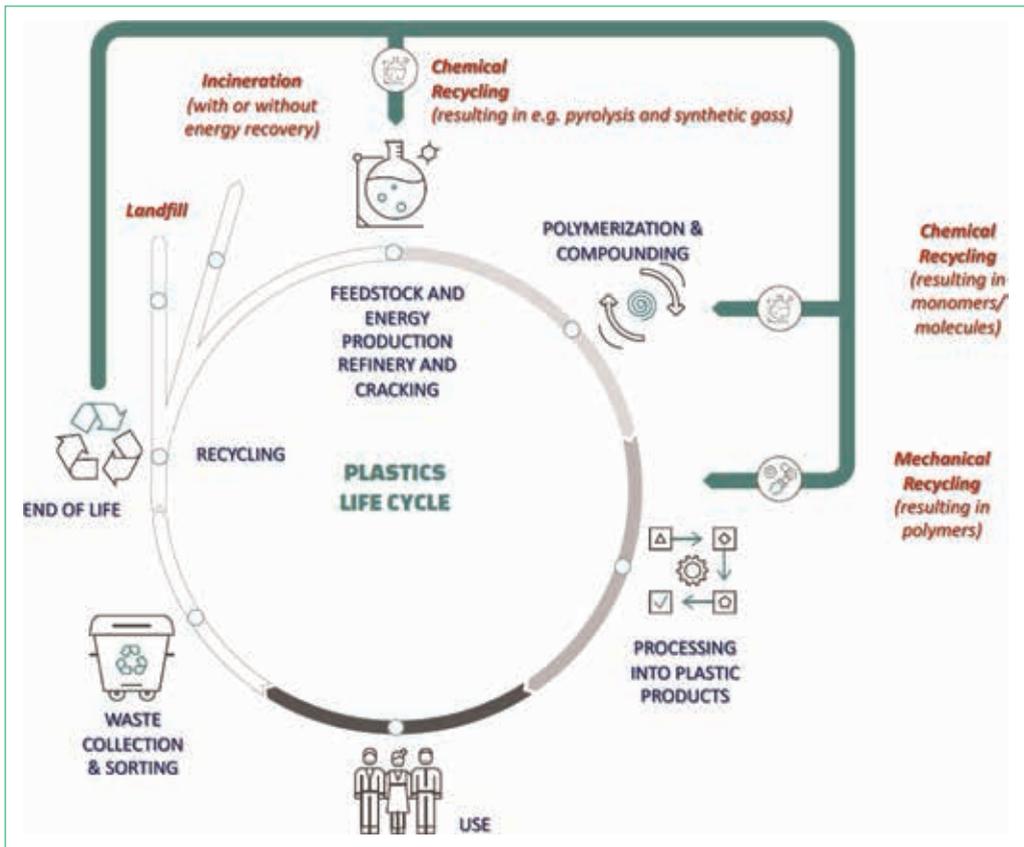


Figure 14

Économie circulaire pour les polymères.

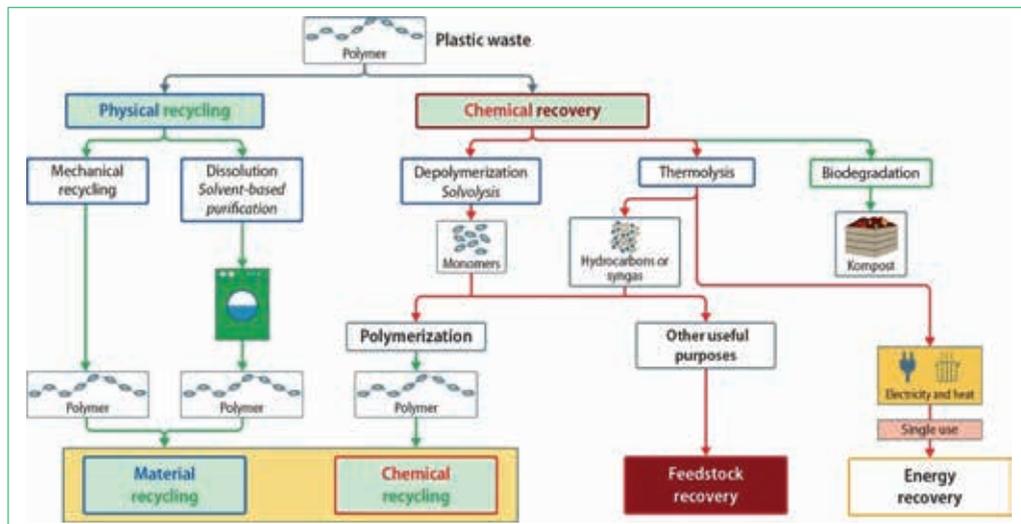


Figure 15

Matériaux polymères, circularité et méthodes de recyclage.

Source : G. Altnau, 2020

dans ce cas n'est pas dépolymérisé avant ré-utilisation.

Le recyclage chimique est une solution en développement industriel, bien que largement connue pour certains polymères, pour récupérer des polymères avec une pureté qui garantit leur réutilisation quand celle-ci est requise. Par exemple, dans l'emballage et le contact avec les aliments, on va être contraint de déconstruire le polymère (on parlera de dépolymérisation) pour obtenir des composants de base (monomères ou oligomères) qui vont permettre éventuellement de refaire le même polymère ou d'autres polymères (si on n'est pas capable de le faire, les produits obtenus pour re-entrer dans le circuit de l'énergie).

4.2. Les différentes voies de recyclage et de valorisation des polymères

Beaucoup de voies possibles sont ouvertes pour le recyclage et celles-ci sont souvent en compétition (Figure 16). Il faut

alors prendre en compte une approche plus systémique intégrant les contraintes économiques, techniques, la réalité des gisements et bien entendu la nature des polymères.

A. Recyclage par pyrolyse

Une des solutions de recyclage est également la pyrolyse. La pyrolyse permet de traiter en température les polymères de façon à décomposer la matière et, quand c'est possible, retrouver les monomères de départ afin de reconstruire un polymère similaire ou voisin. La pyrolyse peut aussi être utilisée pour obtenir des huiles ou des gaz qui peuvent servir à produire de l'énergie. C'est le plus souvent le cas avec des polymères comme le polyéthylène ou le polypropylène parce que le retour aux monomères est extrêmement difficile (Figure 17).

Prenons l'exemple du PMMA (polyméthylméthacrylate) que l'on trouve dans le Plexiglas™ (même si ce n'est pas seulement du PMMA). C'est un

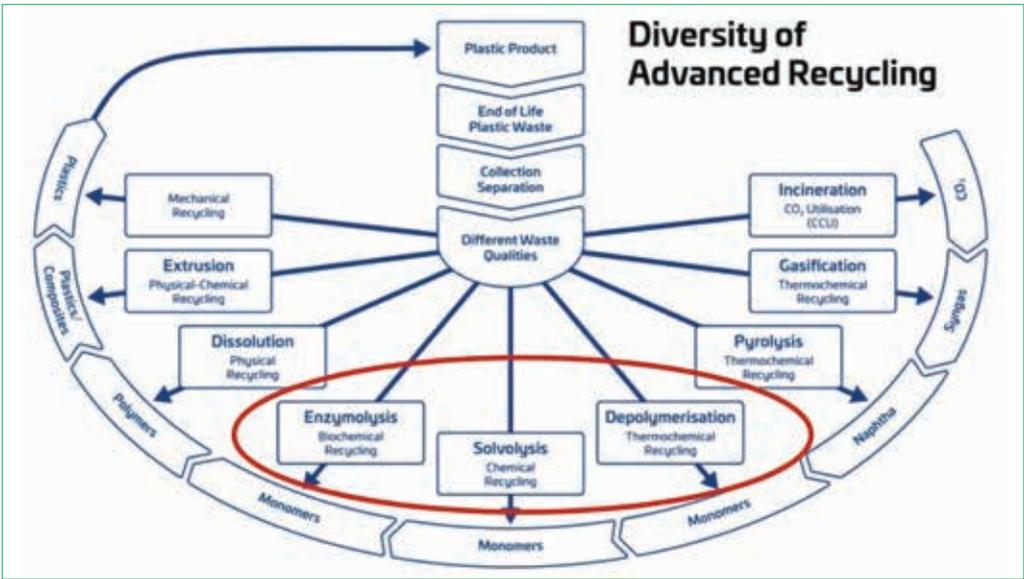


Figure 16

Les cadres encerclés de rouge illustrent la diversité des méthodes de recyclage des polymères.

Source : Nova-Institute's report, « Mapping of advanced plastic waste recycling technologies and their global capacities », 2024

Resin	Mode of thermal decomposition	Low temperature products	High temperature products
Polyethylene	Random chain rupture (involves random fragmentation of polymer along polymer length, results in both monomers and oligomers)	Waxes, paraffin oil, α -olefins	Gases and light oils
Polypropylene	Random chain rupture	Vaseline, olefins	Gases and light oils
Polyvinyl chloride	Chain-stripping (Side chain reactions involving substituents on the polymer chain i.e. elimination of reactive substituents or side groups (HCl) on the polymer chain, chain dehydrogenation and cyclization)	HCl (<300 °C), Benzene	Toluene (>300 °C)
Polystyrene	Combination of unzipping and chain rupture, forming oligomers	Styrene and its oligomers	Styrene and its oligomers
Polymethyl methacrylate	Unzipping (Cracking is targeted at chain ends first, and then successively proceeds down the polymeric length, results in monomer formation)	Monomer Methyl methacrylate	Less Methyl methacrylate, More decomposition 97% MMA
Polytetrafluoro ethylene	Unzipping	Monomer tetrafluoro ethylene	
Polyethylene terephthalate	β -Hydrogen transfer, rearrangement and decarboxylation	Benzoic acid and vinyl terephthalate	
Polyamide 6	Unzipping	Caprolactam	

Figure 17

Valorisation par décomposition thermique. Recyclage par pyrolyse en MMA.

Source : A.K. Panda et al., 2010

polymère qui se décompose assez facilement par pyrolyse en MMA (méthylméthacrylate), le monomère de départ avec des rendements très bons (Figure 17).

Aussi pour ce polymère, si on sait le trier et le séparer des autres polymères, il est possible

de considérer une complète circularité avec la possibilité de revenir au monomère.

Le polystyrène est un peu dans la même famille puisqu'on peut aller jusqu'à 65 % ou plus de rendement de récupération du monomère (Figure 18) en utilisant des solutions alternatives.

PS (pyrolyse sèche) et EPS (pyrolyse sèche expansée) → Styrène monomère	
Rendement faible pyrolyse sèche 470-600 °C (haut taux carbonisation)	
* par pré-dissolution dans huiles PS complètement décomposé à 400°C	Marsh <i>et al.</i> , Chem. Engng. Comm. (1994)
Monomère styrène	52 % (en pds) jusqu'à 65 %
Méthyl-styrène	19,5 %
Toluène	13,6 %
Ethyl-benzène	11,7 %
Cumène	3,3 %
* par utilisation catalyseurs acides ou basiques (350 °C)	Zhang <i>et al.</i> , Ind. Eng. Chem. Res. (1995)
base comme BaO : dépolymérisation 90 % monomères et dimères du styrène	
⇒ Dispersion BaO dans PS pour faciliter futur recyclage chimique	

Figure 18

Rendement de récupération monomères après dépolymérisation du polystyrène.

B. Recyclage chimique

Aujourd'hui, beaucoup de travaux sont faits pour développer le recyclage chimique. Voyons quelques exemples, notamment celui du polyéthylène téréphtalate largement utilisé dans les domaines de l'emballage, des fibres textiles, etc.

Cas du polyéthylène téréphtalate (PET)

Prenons donc le polyéthylène téréphtalate (PET). Ce polymère permet d'utiliser différentes voies de recyclage : (i) la voie mécanique par refonte pour remettre en forme un objet et (ii) la voie chimique où l'on dépolymérise le PET. Le recyclage de ce polymère a atteint une grande maturité, car des circuits de collecte des bouteilles ont été mis en place pour avoir un gisement suffisamment important pour être économiquement pertinent. Le PET est aujourd'hui le plus souvent recyclé par une voie mécanique même si son recyclage chimique, y compris enzymatique, fait l'objet de développements industriels importants.

Chimistes, vous serez sensibles au fait que cette voie de recyclage mécanique implique des processus chimiques essentiels pour recouvrer de bonnes propriétés au PET recyclé (Figure 19).

Plusieurs méthodes de recyclage chimique peuvent être déployées pour dépolymériser et revenir à des monomères qui permettent une repolymérisation pour retourner au PET ou d'autres types de polyesters (Figure 20). Ce recyclage chimique par solvolysse se développe avec des implantations industrielles qui existent déjà. Tous ces procédés font appel à des milieux solvants : méthanol, amines et autres ainsi que des catalyseurs spécifiques.

On peut aussi travailler sans solvant et pratiquer l'**hydrolyse du PET par extrusion réactive**, c'est-à-dire en milieu de haute viscosité à haute pression et haute température (vapeur d'eau, 300 °C) en extrudeuse. C'est un procédé continu alors vertueux qui est toutefois encore peu pratiqué industriellement.

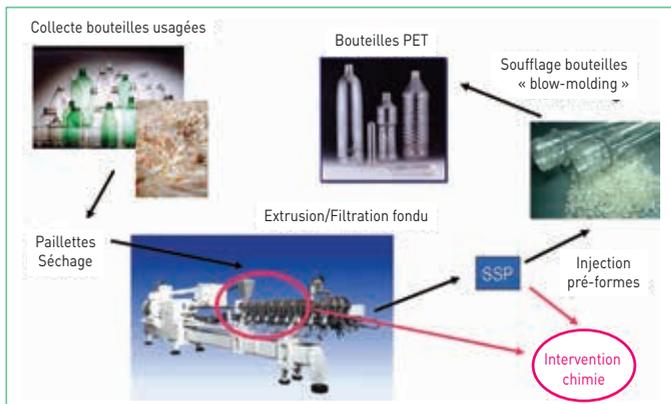


Figure 19

Diverses étapes du recyclage mécanique du PET incluant l'intervention de processus chimiques.

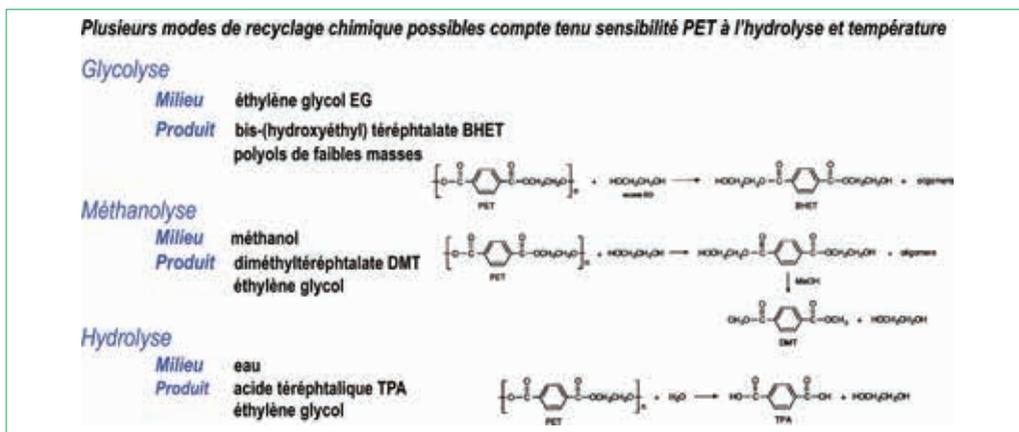


Figure 20

Méthodes de recyclage chimique possibles pour le PET.

C. Recyclage enzymatique

On peut utiliser les enzymes¹⁷ pour dépolymériser les polymères. Le PET est un bel exemple de réussite française puisque la technologie

de dépolymérisation enzymatique est issue de la recherche publique (laboratoire INRAE, CNRS et INSA de Toulouse) et a conduit à la création de la société Carbios. C'est une société qui, désormais à l'échelle industrielle, pratique la dépolymérisation du PET issu de textiles et de bouteilles en utilisant des

17. Substances organiques produites par des cellules vivantes dont le rôle est ici la catalyse des réactions.

souches enzymatiques spécifiques. Beaucoup de travaux aujourd'hui sont entrepris pour développer des souches enzymatiques capables de dépolymériser d'autres polymères que le PET, en particulier pour des polymères « difficiles » comme le polyéthylène ou le polypropylène.

D. Recyclage mécanique

Le recyclage mécanique du PET se fait assez aisément, ce qui explique son déploiement industriel depuis plus d'une dizaine d'années (Figure 19). Les bouteilles issues du tri entrent généralement dans un processus de recyclage mécanique avec un nettoyage à l'eau (qui est essentiel), puis une transformation en paillettes fondues en extrudeuse. Comme on l'a dit, on parle de recyclage mécanique mais comme pour tous les polymères retransformés en voie fondu, des réactions chimiques interviennent. Les polymères sont des macromolécules « sensibles » et, par exemple, pour le PET, la fonction ester¹⁸ constitue « un maillon faible » quand on élève la température. Au départ, le polymère par sa masse molaire importante (et sa capacité pour le PET de cristalliser) possède les propriétés physiques nécessaires à ses applications. Le recyclage en milieu fondu conduit à des coupures de chaînes et, en conséquence, des masses molaires beaucoup plus faibles qui ne permettent plus une utilisation directe. Il faut, par exemple pour le PET, refaire de la chimie : pour cela, le PET revenu à l'état solide

(sous forme de granulés) est chauffé dans un réacteur sous vide pendant un temps relativement long pour réaugmenter les masses molaires (on parlera de post-polymérisation à l'état solide). Le PET, à l'issue de cette étape, est alors utilisable pour mettre en œuvre des fibres textiles ou des préformes de futures bouteilles.

Il faut remarquer que ce traitement mécanique à chaud, puis le traitement thermique sous vide, permettent d'extraire des molécules de faibles masses molaires qui peuvent être considérées comme des polluants. En effet, on ne peut pas garantir que le déchet polymère de départ ne contient plus des polluants et qu'ils ont tous été éliminés. De plus, lors de ce type de recyclage, il peut se former ce qu'on appelle des NIAS (*Non-Intentionally Added Substances*), c'est-à-dire des substances non ajoutées intentionnellement dans le polymère au départ qui peuvent être potentiellement toxiques, substances formées pour la plupart de la décomposition en température d'additifs ou de polluants non désorbés.

C'est à ce niveau que les spectroscopies, et notamment la spectroscopie de masse¹⁹, sont extrêmement utiles pour analyser ces molécules résiduelles de faibles masses molaires pouvant être préoccupantes pour les toxicologues.

Cette problématique est extrêmement importante et,

19. Technique d'identification de produits chimiques consistant à les séparer selon leur masse et leur charge électrique.

18. La fonction chimique $-(C=O)-O-R$.

encore une fois, il faut insister sur l'aspect systémique. Par exemple, la loi AGEC (Anti-gaspillage pour une économie circulaire) va nécessiter de réutiliser les polymères de l'emballage pour l'emballage. Ainsi, il faut garantir, en tant qu'acteurs de la chaîne, que ces emballages seront innocents vis-à-vis de leur contenu. **Et ce n'est pas possible de garantir l'innocuité au contact des aliments d'un polymère recyclé**

par recyclage mécanique et cela amène à s'intéresser plus encore au recyclage chimique.

Si c'est une excellente idée que de promouvoir la réutilisation des polymères de l'emballage pour refaire des emballages à travers une telle réglementation, on voit que cette problématique technique génère des questions scientifiques très importantes à travers lesquelles on perçoit toute la complexité du recyclage.

Conclusion : économie circulaire et polymères : le recyclage, une des solutions

En conclusion, si nous regardons les solutions pouvant contribuer à une économie circulaire (voir paragraphe 2), le recyclage n'est qu'un

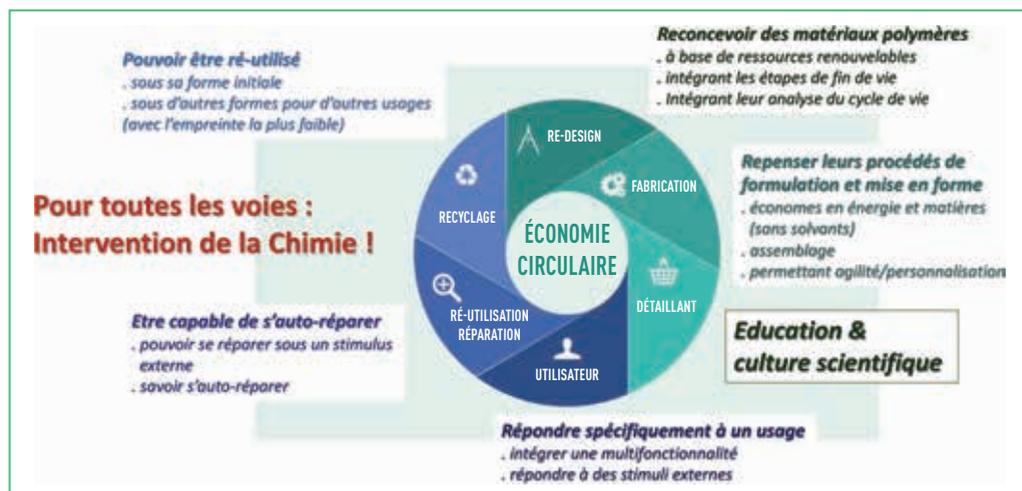


Figure 21

Les éléments de la circularité et les solutions pour y parvenir pour les matériaux (d'après GoLocal, 2018).

élément de la circularité et si ce chapitre a eu pour objectif de l'illustrer pour les polymères, cette problématique est similaire pour les autres types de matériaux.

Il faut aussi noter que dans toutes les solutions pouvant contribuer à la circularité, il faut faire appel à la chimie et que, pour élaborer et diffuser les solutions, l'éducation et la culture scientifique sont des facteurs fondamentaux.

Recyclage des plastiques vers une économie circulaire

Estelle Cheret, TotalEnergies VP OneTech R&D Downstream Process & Polymers
Katell Le Lannic, Responsable du service R&D Recyclage chimique des plastiques TotalEnergies OneTech Belgium

Introduction

L'objectif premier de TotalEnergies est d'être producteur et fournisseur de toutes les énergies accessibles à un plus grand nombre, aujourd'hui et dans le futur. C'est pourquoi la transition vers une offre d'énergies plus durables est importante pour la compagnie (*Figure 1*). Aujourd'hui, la demande en énergie est croissante, avec un double défi : fournir plus d'énergie, mais également diminuer nos émissions de CO₂. Dans les polymères, notre objectif est de produire et de

fournir 30 % de polymères circulaires en 2030 (*Figure 2*). Dans les polymères circulaires on inclut les polymères recyclés avec le recyclage mécanique et le recyclage chimique, mais également les biopolymères¹. Ce chapitre a pour but la présentation des différentes technologies sur lesquelles nous travaillons, des enjeux qui y sont associés pour trouver des solutions qui vont nous aider à être plus vertueux vis-à-vis de l'utilisation et de la nouvelle vie qu'on va donner à nos plastiques.

1. Polymères issus du vivant.

Notre ambition : Fournir les énergies dont le monde a besoin aujourd'hui et accélérer la transition vers une offre d'énergies bas carbone, de manière responsable et durable



Figure 1

Ambitions de TotalEnergies en termes de transition énergétique.



Figure 2

Les chiffres clés de TotalEnergies.

OneTech est une nouvelle branche dans TotalEnergies qui regroupe 3 400 technologies dont la R&D. La R&D est structurée suivant différentes lignes de recherche (Figure 3) dont celle nommée Downstream Processes &

Polymers², dans laquelle il y a tout un pan qui ne s'occupe que du recyclage des plastiques.

2. Downstream Processes & Polymers : Procédés en aval et Polymères.

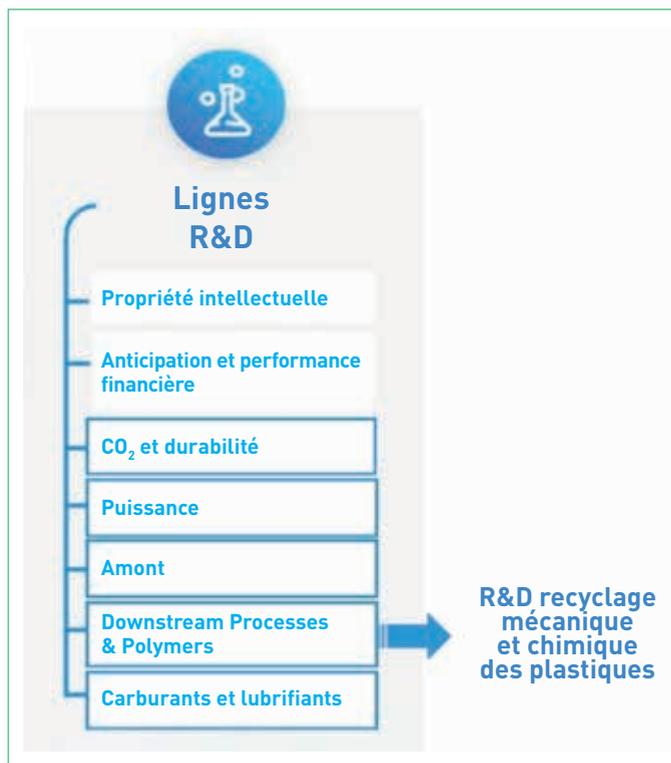


Figure 3

Organisation R&D de OneTech.

1 Le recyclage des déchets plastiques

1.1. Hiérarchisation des déchets (Figure 4)

Quand on parle des plastiques, on ne voit que les plastiques qui sont dans la nature et dans les océans, c'est-à-dire la plus mauvaise image des plastiques. Nous avons tous un rôle à jouer dans une utilisation responsable des plastiques. S'il y a des plastiques aujourd'hui dans la nature, c'est que quelqu'un les y a jetés. Le premier point où nous avons tous un rôle à jouer est l'utilisation responsable des

plastiques et il ne faut pas en utiliser si ce n'est pas nécessaire comme c'est le cas par exemple pour le *food packaging*³. Il faut donc prévenir et réduire.

Pour « réduire », nous avons un rôle à jouer en tant que producteurs de matières plastiques : aujourd'hui nous travaillons sur le développement de polymères plus performants qui vont permettre de réduire les épaisseurs des produits finaux, comme réduire l'épaisseur d'une bouteille qui

3. *Food packaging* : emballage des aliments.

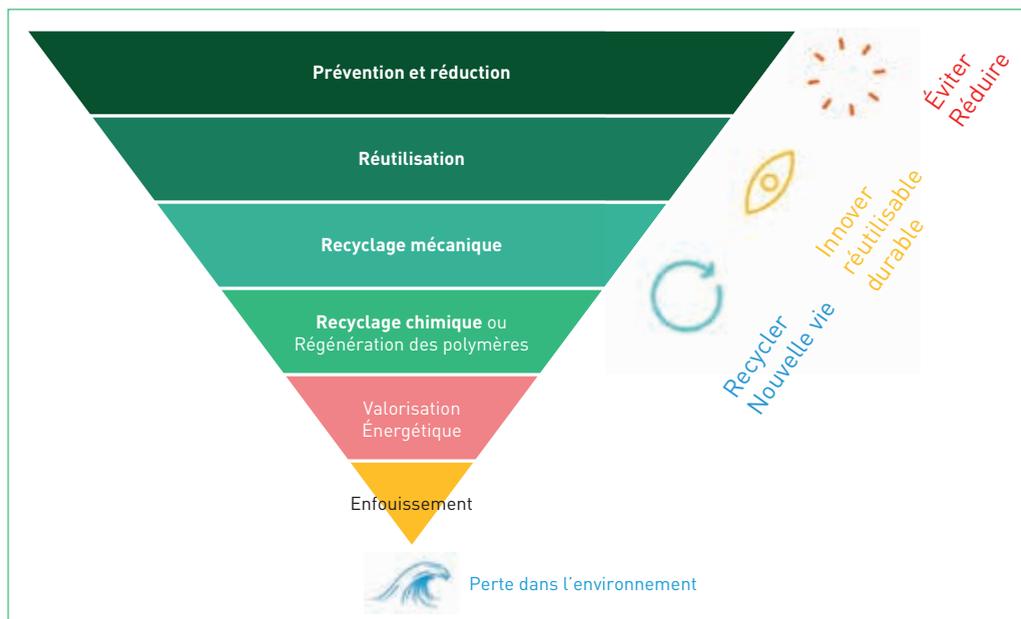


Figure 4

Le traitement hiérarchisé des déchets.

est de quelques centaines de microns à environ 25 microns. Nous travaillons sur le développement des polymères dont la durée de vie va être plus longue et qui pourront être utilisés 5-6 fois plutôt que jetés après 1-2 utilisation(s).

Quand la réutilisation n'est plus possible, intervient le recyclage. **Le recyclage mécanique** est le plus facile : il nécessite moins d'énergie. La partie la plus compliquée du recyclage mécanique est qu'il faut avoir une matière première qui soit déjà bien triée, bien propre, de manière à ne pas faire du *downgauging*⁴ ou du *downgrading*⁵ pour avoir les mêmes qualités de performances des produits finaux recyclés.

4. *Downgauging* : réduction d'échelle.

5. *Downgrading* : rétrogradation.

Quand cela n'est pas possible, on utilise le recyclage chimique qui, certes, est plus énergivore, mais qui permettra d'arriver à un produit recyclé qui aura les mêmes performances que le produit issu de l'énergie fossile.

Quand le recyclage n'est pas possible, on utilise la valorisation énergétique dans laquelle on n'a plus de rôle à jouer en tant que TotalEnergies.

Et si la valorisation n'est pas possible, il y a l'enfouissement (voir le chapitre sur les pales d'éoliennes).

1.2. Ambitions de TotalEnergies

Les ambitions de TotalEnergies dans le domaine du recyclage des plastiques sont résumées sur la **Figure 5**.



Figure 5

Ambitions de TotalEnergies en produits bas carbone, les produits circulaires.

2 Le recyclage des polymères chez TotalEnergies

La chaîne de valeur des polymères circulaires est représentée (Figure 6).

2.1. Le recyclage mécanique

La première voie qu'on va toujours chercher à appliquer est le recyclage mécanique qui passe d'abord par la collecte du déchet, son tri, sa décontamination (pour purifier, enlever le maximum de contaminants), et par ce qu'on appelle une extrusion (Figure 7). L'extrusion est réalisée avec une machine qui va fondre le plastique à environ 200-250 °C selon le polymère et générer des granulés qui eux seront vendus au client. C'est la voie que l'on cherche à valoriser puisque, pour faire une tonne de polymères recyclés, on utilise une tonne de déchets.

TotalEnergies a plusieurs usines en Europe qui produisent des composés recyclés mécaniquement. Comme c'est la voie qui a l'empreinte carbone et l'empreinte environnementale les plus réduites ainsi que le meilleur bilan déchet/polymère recyclé, des efforts R&D sont poursuivis pour maximiser les tonnes de polymères recyclés mécaniquement.

Cela passe par deux grands axes de recherche (Figure 8). Le premier sur le déchet : pour rendre le maximum de déchets et de volume de déchets éligibles au recyclage mécanique. Cela passe par l'amélioration des systèmes de tri : tri optique, intelligence artificielle, ou encore des décontaminations poussées pour nettoyer, pas uniquement en surface, mais plus au cœur grâce à des phases d'extrusion où le plastique est sous forme fondue. Le deuxième axe de travail est en aval, sur le produit, pour rendre le recyclage mécanique applicable

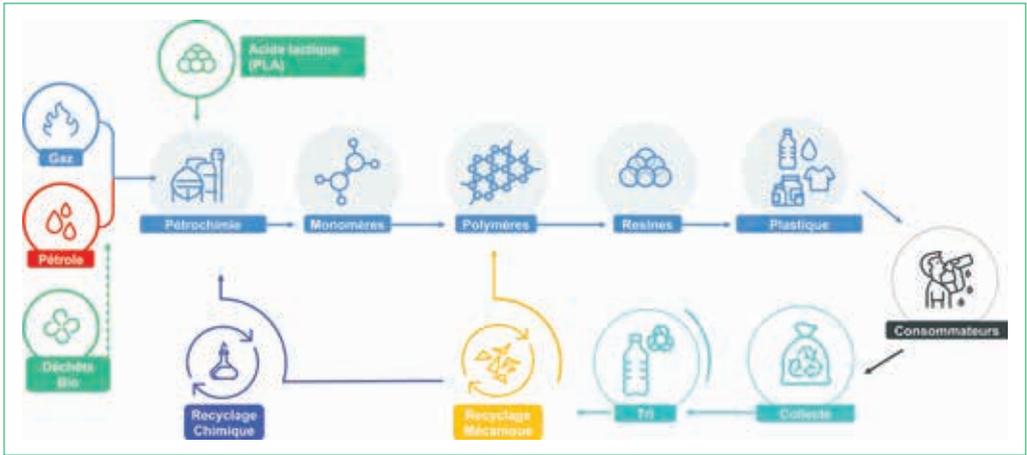


Figure 6

La chaîne de valeur des polymères circulaires.

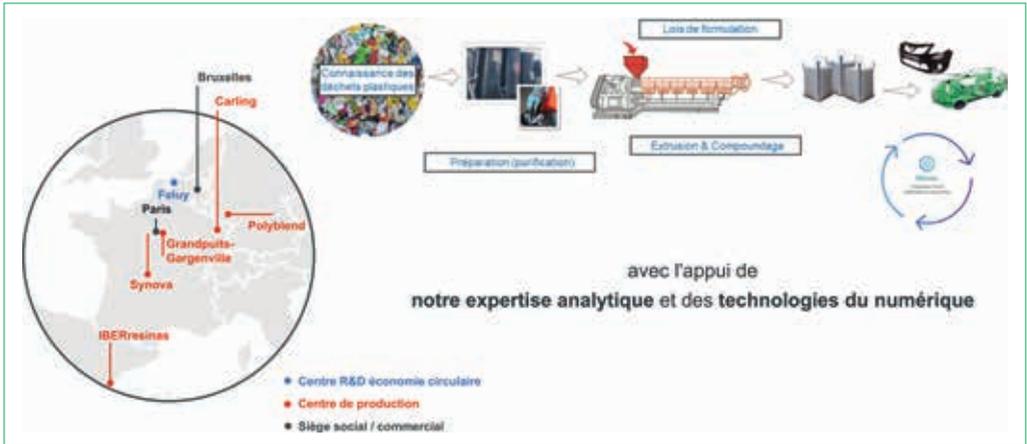


Figure 7

Les grandes étapes techniques et les sites d'action du recyclage mécanique.

au plus grand nombre d'applications possibles.

Malheureusement, il y a des limites au recyclage mécanique (Figure 9). Il faut améliorer les filières de recyclage pour maximiser la quantité de déchets à revaloriser. Il

faut améliorer la décontamination pour rendre plus pur le produit. Enfin, malheureusement à ce jour, le recyclage mécanique n'est pas éligible pour certaines applications : applications médicales, applications alimentaires,



Figure 8

Les objectifs R&D de TotalEnergies en recyclage mécanique.



Figure 9

Les limites du recyclage mécanique.

cosmétique et les jouets. Dans ces cas, on utilise le recyclage chimique.

2.2. Le recyclage chimique : la pyrolyse

Sur la **Figure 10** est représentée la vie d'un plastique : il est produit, utilisé, jeté, collecté,

trié. La qualité de son déchet définit la voie de recyclage. On favorise toujours le recyclage mécanique qui est une boucle courte avec une empreinte environnementale limitée et un bon bilan matière. Quand ce type de recyclage n'est pas possible, on utilise le **recyclage chimique**.

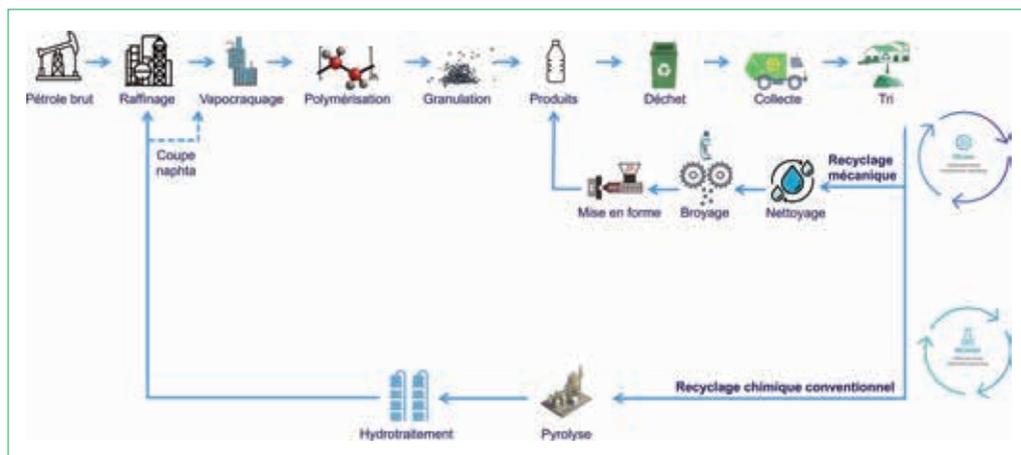


Figure 10

Le recyclage chimique, complément au recyclage mécanique.

À ce jour, le recyclage chimique qui existe industriellement est la voie **pyrolyse**. La pyrolyse est un traitement thermique à environ 400 °C en l'absence d'oxygène pendant plusieurs heures. On obtient une huile. Tous les additifs contenus dans le polymère initial pour lui donner ses propriétés (retard de feu, couleur, anti-mousse, etc.) deviennent des poisons, des contaminants pour les unités de production. Il faut donc décontaminer cette huile avant de pouvoir la réinjecter dans la boucle de production usuelle.

Pour illustrer les activités de TotalEnergies dans ce domaine, prenons l'exemple de la plateforme de Grandpuits-Gargenville (Figure 11) qui est une ancienne raffinerie à l'est de la région parisienne, en cours de reconversion en plateforme zéro pétrole. Il y a déjà une ferme solaire implantée, avec bientôt une

unité de biocarburants, une unité de biométhane et une unité de recyclage chimique. Un pyrolyseur (en partenariat avec Plastic Energy) est en construction pour démarrer en 2024. Et pour 2026, une nouvelle unité de recyclage mécanique est prévue.

On peut encore améliorer le rendement bilan matière-déchet vert-polymère recyclé (Figure 12) qui a une certaine empreinte environnementale. La R&D chez TotalEnergies, mais aussi celle de nos compétiteurs et des universitaires, travaille au développement de procédés plus efficaces, plus directs, qui vont directement, à partir du déchet, générer des molécules d'intérêt, en particulier des oléfines⁶, que l'on peut directement repolymériser.

6. Composés chimiques présentant de nombreuses doubles liaisons carbone-carbone.



Figure 11

Le complexe de Grandpuits-Gargenville.

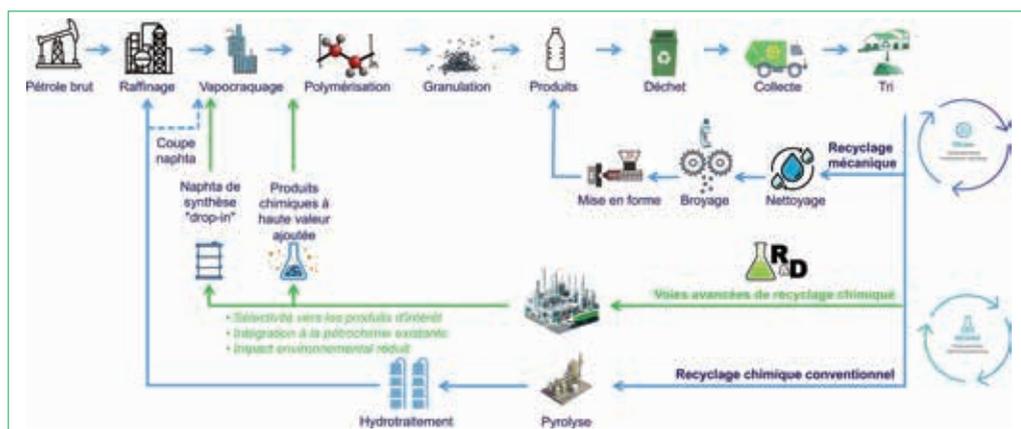


Figure 12

Les futures voies de recyclage chimique des plastiques.

Conclusion

Pour améliorer le recyclage des plastiques, il faut travailler avec les collecteurs de déchets, les traiteurs de déchets et les universitaires qui ont les compétences scientifiques, et monter des projets. On en voit deux exemples sur la **Figure 13**.



Figure 13

Deux projets en partenariat d'amélioration du recyclage des plastiques.

À gauche en **recyclage mécanique** : le projet OMNI. Le recyclage mécanique, qui n'est pas éligible pour les applications alimentaires, va pouvoir le devenir avec des systèmes de tri optique couplés à de l'intelligence artificielle. On peut apprendre aux machines que ce déchet a été utilisé pour une application alimentaire, construit pour une application alimentaire. Donc après décontamination, il va pouvoir être réutilisé pour une nouvelle application alimentaire. Ce projet est terminé et en cours d'homologation par le législateur.

Sur la partie droite de la **Figure 13**, est schématisé un projet européen en recyclage chimique, appelé PLASTICE, qui a démarré en 2022 avec plusieurs partenaires, et qui vise à démontrer des voies de recyclage chimique améliorées, plus efficaces que celles qui existent industriellement à ce jour.

L'émergence de l'économie circulaire¹ du pneu : un défi passionnant !

D'après la conférence de Jean-Michel DOUARRE

Jean-Michel Douarre, Responsable du programme de Recherche sur les Matériaux, Michelin

Introduction

Le sujet de cette communication est l'émergence de l'économie circulaire du pneu. Cela concerne la capacité de pouvoir recycler le pneu usé (appelé également pneu en fin de vie non réutilisable) dans le pneu neuf. Cette action s'inscrit dans celles que l'on peut activer pour améliorer l'impact environnemental du pneu tout au long du cycle de vie du pneu. C'est d'abord l'extraction et l'origine des matières premières, la conception (on peut

par exemple réduire la masse pour avoir un pneu qui soit aussi performant), la fabrication, la logistique, l'usage, la gestion des produits en fin de vie... Si on améliore la performance des pneus, par exemple la longévité kilométrique, la résistance au roulement directement reliée à la consommation du véhicule, on améliore aussi l'impact du produit sur l'environnement (*Figure 1*). Le thème de cette communication est ici celui du recyclage du pneu usé dans le pneu neuf, partie très importante du cycle de vie du pneu.

1. Modèle économique visant à minimiser le gaspillage et à maximiser la durabilité en réutilisant, recyclant et régénérant les ressources.

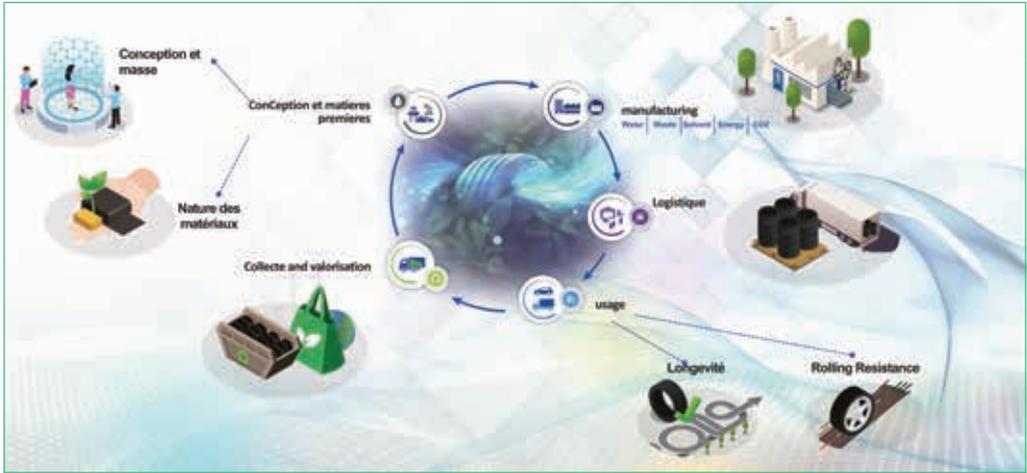


Figure 1

Cycle de vie du pneu chez Michelin.

1 Les difficultés de remplacement des matières premières fossiles du pneu

1.1. L'objectif ciblé par Michelin et les quantités impliquées

Michelin s'est engagé à remplacer totalement l'ensemble des matériaux d'origine fossile du pneu d'ici 2050, soit par des matériaux issus du bio-sourcé (renouvelable), soit du

recyclage. On est aujourd'hui à 30 %, on passera à 40 % en 2030 pour arriver à 100 % en 2050 (Figure 2). Il s'agit d'un objectif très ambitieux car il concerne le remplacement d'à peu près 3 millions de tonnes de matières premières. La quantité totale de matière utilisée dans les pneus Michelin dans le monde, c'est 300 fois le poids de la tour Eiffel ! La quantité de matières à remplacer en volume est donc déjà le premier défi.



Figure 2

Objectif de réduction de matières fossiles dans les pneus Michelin d'ici à 2050.

1.2. La diversité des matières premières du pneu

Une deuxième caractéristique du problème concerne la diversité de matières premières impliquées dans le pneu. Un pneu ça paraît rond, noir et monocomposant. Eh bien ce n'est pas du tout monocomposant puisque la partie noire est constituée de mélanges de caoutchouc. Ces mélanges sont des assemblages de matières premières – des élastomères² –, des charges renforçantes³ (silice, noir de carbone), des additifs, des plastifiants⁴, des agents de cuisson⁵, des agents

de mise en œuvre⁶, des agents de protection du pneu⁷. Cette seule partie « mélange » est déjà complexe mais on a en plus dans le pneu du métal et du textile. Il faut donc s'intéresser à toutes ces matières premières-là et trouver des solutions de remplacement qui sont durables et non issues de la matière fossile (Figure 3).

On a déjà vu deux défis : le volume et le nombre de matières premières importants avec des chimies très différentes à remplacer. Mais il y a en plus **quatre obstacles potentiels** à surmonter.

2. Polymères élastiques, souvent utilisés dans la fabrication de caoutchouc.

3. Substances ajoutées à un matériau pour améliorer sa résistance et ses propriétés mécaniques.

4. Substances ajoutées aux polymères pour les rendre plus souples et flexibles.

5. Additifs utilisés dans le processus de vulcanisation du caoutchouc pour améliorer ses propriétés physiques.

1.3. Quatre défis principaux à surmonter

A. Défi technologique

Le premier défi est technologique : il s'agit de trouver des

6. Substances facilitant le processus de fabrication d'un matériau.

7. Substances ajoutées pour améliorer la durabilité et la résistance du pneu.



Figure 3

Composition de l'économie circulaire classique d'un pneu. Elle indique aussi les consortiums* (groupe de partenaires) et projets identifiés en vue du développement de matières premières renouvelables ou recyclées.

*Groupes de partenaires collaborant pour atteindre des objectifs communs, souvent dans le contexte de projets de recherche ou d'innovation

matières premières aussi performantes que les matières premières qu'on remplace, en particulier en ce qui concerne la sécurité : rappelons quand même que dans les véhicules, les pneus sont le seul contact avec la route. Ce contact se fait par quatre petites surfaces (de la taille d'une carte postale) donc quand vous êtes à 130 km/h sur l'autoroute et que vous devez freiner, vous avez intérêt à avoir des bons pneus et des bons matériaux : il n'est pas possible de transiger sur cet impératif. Il y a aussi l'usure à maîtriser car on ne veut pas faire subir des dégradations de performances à l'utilisateur du fait du remplacement des matériaux.

B. Défi de la chaîne d'approvisionnement

Quand on a identifié des solutions techniques possibles, ce n'est pas pour autant que l'on a gagné car il faut faire des produits pour une masse de 3 millions de tonnes. Il va donc falloir, **deuxième défi, développer une chaîne d'approvisionnement et de transformation de matières premières appropriée** aux nouvelles contraintes technologiques. Cela se traduit par la mise en place des équipements industriels permettant de réaliser la série de transformations nécessaires. Bien entendu, pour les matières fossiles ou pour les matières durables, les transformations sont différentes : il faudra donc totalement **redéfinir les moyens de transformation et investir** pour disposer des capacités nécessaires à des produits de haute qualité et stables.

Une autre contrainte majeure vient de ce que Michelin produit sur toutes les zones géographiques, et ne veut pas avoir une fabrication de matières durables uniquement en Europe pour faire des pneus en Asie par exemple... Les chaînes d'approvisionnement doivent couvrir l'ensemble de **notre « activité Monde »** en « *local to local* » : **c'est notre deuxième défi.**

C. Défi de la viabilité économique

Défi technologique, défi de création de chaînes d'approvisionnement pour des larges volumes, stabilité de la qualité, couverture Monde. En surcroît de ces défis, il faut rajouter notre troisième défi : celui de **la viabilité économique**. Celle-ci est fondamentale : s'il n'y a pas de viabilité, il n'y a pas de développement. La chaîne de transformation, par définition, comporte une série d'acteurs différents. S'il y a un acteur dans la série qui ne gagne pas sa vie, la chaîne de transformation ne va pas se développer et le système va bloquer. Il va donc falloir prêter une attention particulière à cette partie-là.

L'optimisation économique d'une nouvelle chaîne d'approvisionnement est en concurrence avec les chaînes d'approvisionnement des matières premières fossiles existantes qui sont, par nature, super optimisées et pour lesquelles les investissements sont faits et amortis depuis longtemps. On part donc avec un handicap économique considérable. Mais qui va payer ? Est-ce que le client va l'accepter ? Est-ce

que des subventions pourront venir compenser les nouvelles dépenses d'investissements ? Rien n'est acquis, mais ce qui est sûr c'est qu'il va falloir mobiliser toutes les idées pour maîtriser l'impact économique. Un point de vigilance important sera par exemple d'être capable de valoriser tous les produits issus de la chaîne de transformation, même ceux que l'on appelle les sous-produits qui ne pourront pas être utilisés dans le pneu. Tout doit être utilisé et valorisé.

D. Défi de la viabilité environnementale

Le **quatrième défi** qu'il faut surmonter est celui de la **bonne viabilité environnementale**. Il faut être sûr que l'introduction de ces nouvelles matières premières n'impacte pas négativement l'analyse du cycle de vie (ACV). Par exemple, si vous introduisez une nouvelle matière première et que vous perdez en résistance à l'usure, cela veut dire que votre pneu va faire moins

de kilomètres, il va falloir le changer plus rapidement et, à la fin, l'efficacité de la matière n'est pas bonne : vous allez donc dégrader l'analyse du cycle de vie. Par ailleurs, comme chaque transformation demande de l'énergie, il va falloir faire attention au bilan énergétique des nouvelles technologies mises en œuvre : si vous avez besoin de deux fois plus d'énergie, vous dégagez aussi plus de CO₂ et cela va être compliqué. Là aussi, il va falloir travailler sur des moyens de transformation qui sont économes en énergie.

De surcroît, il faut veiller à ne pas générer d'effets environnementaux négatifs, hygiène, sécurité, environnement, et intégrer par exemple la question des impuretés dans tout le cycle de recyclage. Pour éviter des impacts environnementaux négatifs, il faut s'assurer que l'analyse de ces risques a été conduite de façon professionnelle et que toutes les mesures nécessaires ont été mises en place (*Figure 4*).



Figure 4

Quatre défis à résoudre pour permettre la recyclabilité optimale des pneus.

2 Le recyclage des pneus

2.1. Quantités en présence

Si l'on revient au recyclage, le premier constat, les chiffres sont quand même assez impressionnants, est qu'il y a 1,6 milliard de pneus qui deviennent déchets dans le monde par an. 1,6 milliard de pneus, cela fait 26 millions de tonnes de matériaux qui sont des déchets. En Europe, c'est 3,5 millions de tonnes. L'Europe est plutôt bien placée sur la collecte des pneus en fin de vie, puisqu'on en collecte en moyenne 90 à 95 %. Aujourd'hui, environ 50 % des pneus collectés sont valorisés énergétiquement : ils sont envoyés dans des cimenteries pour y être brûlés et obtenir de l'énergie. 50 % sont également utilisés pour la matière pour faire des tapis de sol, de l'asphalte, des murs antibruit, des terrains de sport...

Il apparaît depuis quelques années qu'une petite partie seulement de ces matières premières sont recyclées dans le pneu. La principale raison en est que la qualité des produits obtenus sans traitement supplémentaire, est largement insuffisante pour répondre aux défis de performance mentionnés précédemment.

Le deuxième constat qui s'impose est que 3,5 millions de tonnes sont disponibles en Europe mais que 50 % sont exportés. Pourquoi exporter ? C'est de la matière première, autant la garder chez nous et ne pas dépenser l'énergie pour l'envoyer ailleurs. Les pneus en fin de vie devraient être une grande source potentielle de

matières premières pour le pneu. Recycler le pneu, c'est donc une vraie opportunité, mais il faut bien sûr développer les technologies pour y arriver.

2.2. Le projet *BlackCycle*

Revenons sur le cycle des transformations pour présenter le projet *BlackCycle*⁸, un projet co-financé par l'Europe dont Michelin est leader. L'idée est, dans un premier temps, de recycler la partie caoutchouc du pneu uniquement. Cela consiste, après avoir récupéré les pneus, à les trier, les « déconstruire » parce que la bande de roulement est très différente du flanc en termes de composition : il est donc intéressant, par exemple, de traiter les bandes de roulement ensemble et les flancs séparément. Il faut également séparer le textile, le métal, mais on ne s'occupe pas de leur recyclabilité dans le pneu dans ce projet-là. Le projet *BlackCycle* s'occupe de la partie uniquement « mélange de caoutchouc » que l'on va pyrolyser après granulation.

La pyrolyse⁹ est une technologie intéressante pour un mélange complexe constitué de différents composants intimement liés impossibles à séparer (dans notre cas, il y a des élastomères, des charges, des produits chimiques). Elle traite l'ensemble du mélange

8. Le cycle du noir, en référence à la couleur de la partie « mélange » que l'on cherche à recycler.

9. Processus de décomposition chimique d'une substance par la chaleur en l'absence d'oxygène, générant des gaz et des résidus carbonés.

complexe en le décomposant thermiquement. Ainsi, la pyrolyse va produire du gaz qui sert à alimenter la pyrolyse en énergie, du noir de carbone appelé « *Recovered Carbon Black (R-CB)* » qui est un mélange de noirs de carbone, de cendres minérales (ZnO, silice) venant des matériaux de caoutchouc pyrolysés, et des huiles de pyrolyse. À noter que les « *recovered CB* » sont des noirs de carbone peu techniques pouvant être utilisés à des quantités limitées dans les pneus.

Les huiles de pyrolyse, séparées, sont distillées¹⁰ et fournissent différentes fractions qui seront épurées pour être valorisées. Un exemple sera d'en prendre une partie, la fraction lourde¹¹, et de l'envoyer vers un fabricant de noir de carbone. Celui-ci utilise généralement des résidus pétroliers pour alimenter ses fours. À partir de l'huile de pyrolyse, il pourra faire un noir de carbone identique à celui qu'il fabrique en utilisant des résidus pétroliers classiques. À noter que ce noir est alors très technique et peut être utilisé de façon massive dans les pneus.

En résumé, il y a donc une série de transformations que l'on est obligé de mettre en place pour pouvoir arriver à des matériaux de bonne qualité économiquement viables. Dans notre exemple, il faut

collecter les pneus, les trier, les déconstruire, granuler la partie caoutchoutique, pyrolyser, distiller l'huile de pyrolyse et fabriquer le noir de carbone technique. Encore une fois, quand on veut recycler un pneu usé, savoir le transformer en matières premières de haute qualité est la clé et nécessite donc une chaîne de transformations performante.

2.3. Le développement de consortiums

Chez Michelin, on ne sait pas faire la pyrolyse, ce n'est pas notre domaine, la granulation¹², la fabrication de noir de carbone non plus. Or comme on l'a vu précédemment, le pneu neuf sera le résultat de l'introduction de matières premières en partie du recyclage et d'une longue chaîne de transformations successives. On ne peut donc pas créer cette chaîne seul. Il faut collaborer avec des spécialistes de chaque domaine, de chaque transformation. Les consortiums sont des mécanismes parfaits pour mettre ces collaborations en œuvre. Au cours de ces dernières années, Michelin a donc créé des consortiums rassemblant les professionnels de chaque étape de transformation pour pouvoir penser d'une façon holistique la chaîne de transformation et pour obtenir rapidement des matières premières idoines pour le pneu. Le projet *BlackCycle* cofinancé par l'Europe dans le programme

10. Processus de séparation des composants d'un mélange liquide en les chauffant pour les vaporiser, puis en les refroidissant pour les condenser.

11. Partie d'une substance qui a une densité plus élevée, obtenue lors d'une distillation.

12. Processus de transformation de matières en particules granulaires, souvent utilisé dans le traitement de matériaux.

Horizon 2020 était le premier que l'on a lancé et a généré une dizaine d'innovations différentes sur cette chaîne de valeur pour arriver à sortir des matières premières de qualité (Figure 5).

Les consortiums sont vraiment importants dans notre fonctionnement. L'Europe est un facilitateur pour les mettre en place dans le cadre d'appels à projets qui sont organisés sur le recyclage, sur l'économie circulaire. En 2020, nous avons ainsi lancé le projet *BlackCycle*, pour le recyclage de la partie caoutchouc. Treize entités constituent ce consortium : Michelin en est leader, mais il comprend également tous les spécialistes de chaque chaînon de la série de transformations des pneus en fin de vie :

- Aliapur, collecteur de pneus usagés (France) ;
- ESTADO (Allemagne) et HERA (Espagne), transformateurs des pneus collectés ;

- Pyrum (Allemagne) et Sisener (Espagne) ; pyrolyseurs et distillateur (Sisener) ;
- Orion, fabricant de noir de carbone (Allemagne) ;
- Michelin, concepteur et fabricant de pneumatiques.

Il y a aussi des académiques travaillant sur des technologies pour améliorer la qualité et le rendement des huiles de pyrolyse :

- ICB (Espagne) ;
- CERTH (Grèce).

Il ne faut pas non plus oublier les autres partenaires :

- INERIS (France), sur l'ergonomie et la maîtrise des risques Hygiène/Sécurité/ Environnement des nouvelles technologies ;
- Quantis (Suisse), pour le calcul des analyses de cycle de vie, bilans carbone ;
- Axelera (France), pour la dissémination des résultats du projet ;

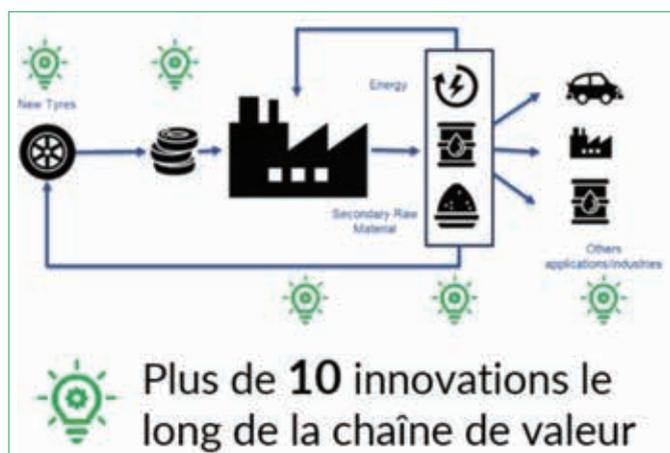


Figure 5

Innovations mises en place dans le projet *BlackCycle*.

- ICAMCYL, pour la collecte et l'organisation des données du projet pour l'Europe.

Nous citons la liste des acteurs de *BlackCycle*, pour bien démontrer que tous ces partenaires constituent un vrai écosystème autour de la transformation des pneus en fin de vie en matières premières de haute qualité. Cet écosystème est très important pour introduire de nouvelles technologies et mieux maîtriser le processus global de transformation.

Cerise sur le gâteau, au-delà de la diversité d'activité des différents partenaires (activité technique, industriels versus académiques versus instituts...), ce projet européen rassemble des intervenants de cinq pays différents, ce qui rajoute une diversité culturelle supplémentaire très intéressante et stimulante.

2.4. Perspectives de développement

En 2020, avec le projet *BlackCycle*, Michelin a initié les actions de recyclage de la partie « mélange » de caoutchouc noir (d'où le nom de « *BlackCycle* »). En 2022, nous nous sommes intéressés à la partie PET du pneu utilisé sous forme de fibre textile donnant une grande partie de la rigidité structurelle du pneu. C'est le même polymère qui est utilisé dans les bouteilles d'eau minérale par exemple. Cependant, contrairement aux bouteilles où il est « facile » de retraiter le PET car composé de près de 100 % de PET, pour le pneu c'est une autre histoire. En effet, quand on déconstruit le pneu, on récupère une pulpe de

PET¹³ très sale avec du caoutchouc à l'intérieur, que l'on ne sait pas utiliser. On a donc lancé un autre projet européen qui s'appelle *WhiteCycle*¹⁴, cofinancé par l'Europe dans le programme Horizon pour la partie fibre textile en PET. Comme pour *BlackCycle*, il faut déconstruire, trier, purifier. Mais contrairement à *BlackCycle*, on n'utilise pas la pyrolyse comme technologie cœur mais la dépolymérisation enzymatique¹⁵ de Carbios pour traiter le PET. L'enzyme très sélectif va être extrêmement efficace pour décomposer le PET (sans être perturbé par les résidus de gomme). Les monomères du PET récupérés ainsi seront purifiés et repolymérisés ensuite. Le nouveau PET sera alors transformé en fibres pour être réintroduit dans les pneus neufs. On voit là aussi toute une série de transformations différentes de celles de *BlackCycle* qu'il va falloir mettre au point. Le consortium dans un projet européen est ici encore une excellente solution pour progresser rapidement. Ce projet fait intervenir seize entités et cinq pays.

En bref, ce que l'on attend de ces consortiums, c'est la possibilité de créer une chaîne de valeur de l'économie circulaire du pneu d'une façon rapide, qui va conduire à des innovations et créer un nouvel écosystème qui n'existe pas aujourd'hui.

13. Mélange de fibres de polyester avec des résidus de gomme provenant du recyclage des pneus.

14. Le cycle du blanc, en référence à la couleur du PET.

15. Processus de dégradation de polymères par des enzymes, dans ce contexte, utilisé pour le recyclage du PET.

Conclusion

J'espère vous avoir convaincus que le recyclage est un défi passionnant, en particulier pour des produits complexes, composites, parce qu'il faut savoir trouver les technologies pour refaire des matières premières de haute qualité et conserver les performances des produits neufs. C'est un défi passionnant parce que cela passe forcément par une activité collaborative : on ne peut pas le faire tout seul, ce n'est pas possible. Il nous faut les universitaires, il nous faut les différents acteurs de l'industrie, les spécialistes de l'analyse du cycle de vie, de l'ergonomie et des risques environnementaux pour nous aider à réussir : c'est donc très collaboratif et passionnant parce que l'on travaille avec des sociétés que l'on ne connaissait pas trop, avec des cultures différentes, avec aussi des pays différents.

C'est également passionnant parce que cela réclame des innovations qui nous permettent d'avoir les bons produits au bon coût, au bon volume, à la bonne qualité. Cette activité doit aussi être résiliente, parce qu'il y a beaucoup de concurrence par rapport aux chaînes traditionnelles. La situation est parfois difficile en termes de coût. Le coût est généralement plus élevé au départ, et il faut se focaliser pour trouver la meilleure chaîne de valeur et être concurrentiel par rapport au fossile et relever les différents défis auxquels on fait face.

Ce chapitre vous a montré des exemples de défis techniques, économiques, environnementaux, de création de l'écosystème auxquels on a à faire face. « **Quand j'ai commencé à travailler sur le recyclage, j'en avais une très mauvaise image : je croyais que c'était du bidouillage, que quand on recyclait quelque chose, on avait un produit qui n'était pas de bonne qualité. Eh bien, ce n'est pas ça le recyclage.** C'est vraiment réussir à obtenir des matériaux de haute qualité mis au point grâce à beaucoup d'innovations et de travail collaboratif. »

Matériaux de spécialité pour une économie circulaire : illustration sur le recyclage des pales d'éoliennes

Armand Ajdari, vice-président R&D du groupe Arkema

Introduction

Nous commencerons par une promenade sur le recyclage dans le contexte des « matériaux de spécialité », des matériaux d'un niveau de performance¹ élevé et donc des matériaux de valeur. Ils se distinguent des matériaux de commodité², qui font le gros des volumes à recycler comme cela est présenté

dans le chapitre de Jean-François Gérard³. Ils ne sont pas non plus nécessairement des matériaux stratégiques⁴ où l'accès à la matière elle-même est un enjeu clé. Puis nous nous focaliserons sur la problématique du « recyclage des pales d'éoliennes ».

1. La performance d'un matériau correspond à sa capacité à remplir un cahier des charges donné.

2. Matériaux très courants comme l'acier, le béton, le bois, le PVC, souvent en raison de leurs très bas coûts de production et de leurs bonnes propriétés mécaniques.

3. Recycler les matériaux, une des réponses pour une économie circulaire. Illustration pour les polymères.

4. Matériaux au cœur du fonctionnement de la société auxquels il est nécessaire d'avoir accès afin de maintenir le bon fonctionnement de la société. Par exemple : les terres rares utilisées dans la fabrication de batteries ou d'appareils électroniques.

La société Arkema est un leader mondial des matériaux de spécialité avec plus de 20 000 personnes dans le monde, et à peu près un tiers de la production en Amérique, un tiers de la production en Europe et un tiers de la production en Asie. La signature « des matériaux innovants pour un monde durable » (Figure 1) illustre l'importance dans la stratégie du groupe des problématiques de développement durable. Arkema sert beaucoup de marchés : la mobilité, l'énergie, le bâtiment, l'électronique, la vie quotidienne (emballages alimentaires, articles de sport, etc.), et ce, à travers

une combinaison unique de compétences (Figure 2) : de l'expertise sur les matériaux eux-mêmes et les façons de les renforcer, de l'expertise sur les façons de les assembler, et enfin de l'expertise sur leur revêtement et protection. Arkema mobilise cette combinaison unique pour répondre aux problématiques de ses clients qui demandent à la fois beaucoup de performance et des solutions aux exigences du développement durable.

Cela conduit Arkema, d'une part, à orienter la plupart de ses efforts de recherche vers l'émergence de solutions plus vertes : il y a dans beaucoup de batteries 1 % ou 2 % de nos matériaux organiques. Nous servons le marché du photovoltaïque, le marché de l'hydrogène et le marché de l'éolienne. Ces marchés sont à la fois des opportunités de croissance et des défis en adéquation avec notre stratégie.

D'autre part, la deuxième partie de nos efforts concerne l'amélioration de la gestion



Figure 1

Logo et signature du groupe Arkema (Innovative materials for a sustainable world : Des matériaux innovants pour un monde durable).

Source : https://www.arkema.com/files/live/sites/shared_arkema/files/downloads/investorrelations/en/finance/ARKEMA_CMD%202023_version%20definitive%2026.09.2023.pdf

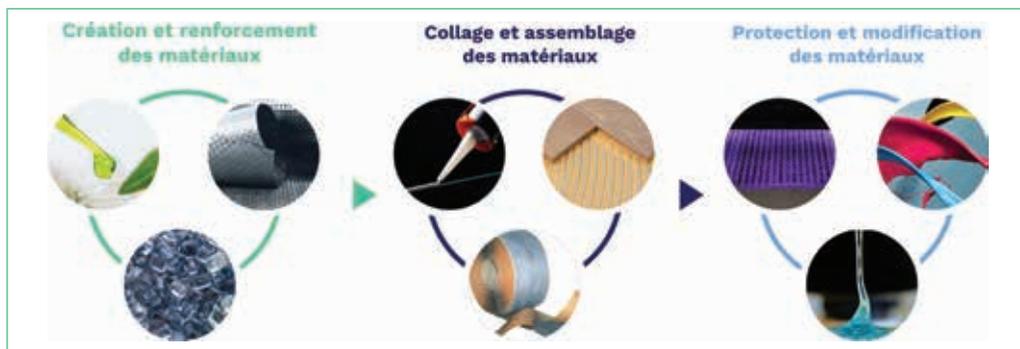


Figure 2

Les trois principaux secteurs de compétences du groupe Arkema.

Source : https://www.arkema.com/files/live/sites/shared_arkema/files/downloads/investorrelations/en/finance/ARKEMA_CMD%202023_version%20definitive%2026.09.2023.pdf

des ressources : ce sont les deux gros piliers des problématiques environnementales. L'économie circulaire est donc un enjeu majeur pour Arkema.

1 La recyclabilité

Rappelons que le recyclage n'est pas le but en soi. Le but, c'est d'utiliser le moins de matériaux pour avoir le plus d'usages, donc il faut toujours commencer par réfléchir à comment réduire la quantité de matériaux que l'on utilise, comment allonger la durée de vie ou réutiliser au maximum, et, quand on n'a pas d'autre choix, comment recycler. En effet, faire un tour de la boucle dans la **Figure 3**, coûte de l'énergie, du CO₂⁵, de l'argent et soulève de nombreuses problématiques technologiques qui sont mentionnées dans d'autres chapitres de cet ouvrage. Le but n'est donc absolument pas de faire le plus de tours ! C'est vrai en général, et en particulier dans le contexte des matériaux polymères⁶ (**Figure 3**), où l'on retrouve ces mêmes problématiques avec le recyclage mécanique et le recyclage chimique.

Comme acteur des matériaux de spécialité, Arkema développe et propose deux grands

5. CO₂ est la formule chimique du dioxyde de carbone, un des principaux gaz responsables du réchauffement climatique.

6. Les polymères sont de longues chaînes moléculaires qui ont la capacité de former un réseau tridimensionnel. Par extension, on appelle aussi polymères les matériaux formés principalement de ces molécules particulières.

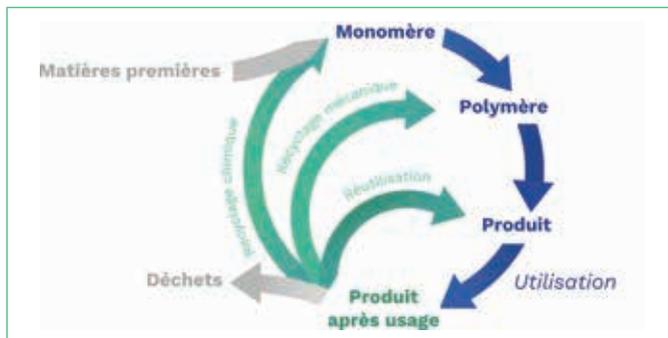


Figure 3

La règle des « 3R » appliquée aux polymères. Ce diagramme illustre la règle des 3R : Réduire, Réutiliser, Recycler. Chaque flèche représente un apport d'énergie nécessaire à la transition.

types de solutions pour l'économie circulaire :

- des solutions qui permettent ou facilitent le recyclage des polymères de grande diffusion ;
- des matériaux avancés de haute performance intrinsèquement recyclables.

1.1. L'exemple des emballages alimentaires

La **Figure 4** illustre le cas d'un adhésif pour emballage alimentaire flexible, une thématique de la vie quotidienne.



Figure 4

Emballage alimentaire en mono-matériau

Source : Arkema

*Il s'agit d'un adhésif placé entre plusieurs couches de matériaux pour les coller entre elles. Ici, l'adhésif « SF10M » permet de maintenir entre elles les différentes couches de polyéthylène.

Une des approches pour l'emballage alimentaire, contrairement à ce qui a été historiquement réalisé pour améliorer les propriétés, consiste à opter pour des emballages alimentaires mono-matériau⁷ car cela simplifie les étapes de tri et facilite le recyclage. La première fonction d'un bon emballage est de conserver les aliments longtemps pour éviter le gaspillage, ce qui nécessite en général plusieurs couches collées entre elles (auparavant de matériaux différents, dans le futur en utilisant une seule base chimique pour permettre le recyclage). De plus, l'emballage doit être scellé, ce qui nécessite l'utilisation d'un adhésif pour coller les bords ou le couvercle. Cependant les adhésifs, qui ne représentent qu'environ 1 % de la masse du produit final, ne doivent pas compromettre la recyclabilité de tout le reste qui est en mono-matériau. Il est donc nécessaire de développer des adhésifs qui soient aussi

performants que les adhésifs précédents en termes d'adhésion dans différentes conditions de température, qui restent adaptés aux procédés industriels, et qui en plus favorisent la recyclabilité de l'ensemble du produit.

La **Figure 5** présente une autre innovation qui remonte à plusieurs dizaines d'années, à savoir un emballage refermable grâce à un système d'adhésif adapté. Nous travaillons également à son évolution vers des solutions compatibles avec le recyclage de la barquette dans des environnements mono-matériau.

Ce type de travaux est réalisé dans le cadre de consortia⁸. Il est essentiel de collaborer avec les fabricants d'emballages, les grandes marques et tous les acteurs de la chaîne, pour que la solution proposée soit validée. Ainsi, un produit affirmé recyclable dans un environnement mono-polyéthylène⁹ par exemple doit être validé par un ensemble d'acteurs respectant des standards préalablement définis. L'une de ces initiatives européennes est « Recyclclass » qui gère ce type de sujets.

7. Composé d'un seul matériau.



Figure 5

Barquette refermable de la marque Bostik du groupe Arkema.

1.2. Des matériaux haute performance pensés pour la circularité : une chaussure de course éco conçue

Passons maintenant à une autre innovation pour laquelle

8. Pluriel de consortium. Cela désigne la réunion de différentes parties prenantes à des fins de coopération.

9. Le polyéthylène est un polymère formé à partir de la molécule d'éthylène de formule C_2H_4 .

Arkema a obtenu le ICIS Innovation Awards en 2023. Le matériau est un polyamide¹⁰, donc un plastique à longue chaîne, de haute performance, totalement biosourcé car issu de l'huile de ricin. Depuis plusieurs décennies, Arkema a développé des compétences pour transformer cette matière en l'adaptant afin qu'elle puisse être utilisée par des procédés de filage, d'injection ou de formage différents, et pour en faire potentiellement des mousses, des pièces très dures et des parties de fibres textiles.

Dans l'exemple présenté, nous avons travaillé en partenariat – partenariat étant un mot clé – avec la société suisse On Running pour concevoir et créer une chaussure de sport de haute performance et ultra-légère (<https://www.on.com/fr-fr/products/cloudneo-42cloudneo>) (Figure 6). Elle pèse environ 200 g par chaussure et est conçue dès le départ pour pouvoir être recyclée sans être désassemblée. Cette chaussure est 100 % recyclable mécaniquement : elle peut être mise dans une broyeuse, Arkema récupère le broyat et en fait un autre matériau haute performance utilisable.

Ce qui est très intéressant dans cet exemple, en dehors du fait que des années de recherche ont permis de créer ce matériau qui simplifie finalement une des étapes du désassemblage, c'est qu'elle permet à On Running d'évoluer dans son modèle économique. Cette chaussure n'est plus proposée

à la vente, mais en abonnement. Vous payez une certaine somme par mois, et quand cette chaussure est usée, vous la renvoyez à On Running, qui se charge du broyage et nous renvoie le broyat.

L'avantage est que ce système résout le problème de la collecte. C'est possible parce que cette chaussure a une certaine valeur, étant une chaussure de haute performance dont les coûts associés sont importants. Les clients sont intéressés par ce modèle économique, car ils s'approprient la démarche en même temps que la chaussure, et peuvent raconter à leurs proches comment ils sont acteurs de la circularité. Pour On Running, cela permet d'avoir des relations avec ses clients non seulement au moment de l'achat, mais aussi par une relation continue. C'est une situation où une transformation du modèle



Figure 6

Chaussure de la marque On Running conçue en partenariat avec Arkema.
Source : <https://www.on.com/fr-ch/collection/cyclon>

10. Le polyamide est un polymère contenant des fonctions amide de formule (CO)NH.

économique est permise par la technologie. Sans être (encore ?) de grande diffusion, c'est un exemple inspirant.

2 Le recyclage des éoliennes : un pilier de la transition énergétique

Les éoliennes sont un pilier essentiel et une nécessité indiscutable de la transition énergétique pour obtenir davantage d'électricité à faible émission de carbone. Elles connaissent une croissance sur tous les continents. Pour éviter un prisme trop européen, il est bon de rappeler que la Chine est de loin le leader en termes de volumes et de capacités industrielles dans le domaine éolien. Jusqu'à présent, elle a principalement servi son marché intérieur, mais on observe de plus en plus d'exportations vers l'Europe et les États-Unis (à bas prix). Malgré le caractère intermittent de l'électricité produite, les coûts de l'électricité fournie par les parcs éoliens modernes sont désormais relativement compétitifs par

rapport à d'autres offres. Nous avons une industrie qui, *stricto sensu*, n'a pas nécessairement besoin de subventions pour subsister. En revanche, c'est une économie fortement soumise à des pressions sur les marges. Et, sans ressources financières et profits, il est difficile d'innover et d'assumer les changements nécessaires pour tendre vers un modèle circulaire.

2.1. Défis actuels et futurs du recyclage des pales d'éoliennes

Lorsque l'on observe une éolienne, on constate la présence de trois pales. La fabrication de ces pales en composite représente une démarche d'allègement, utilisant ainsi le matériau de manière optimale. C'est le meilleur matériau, mais chaque pale pèse néanmoins approximativement plusieurs dizaines de tonnes, ce qui implique des quantités de matière absolument considérables, et qui engendrent des déchets. Le graphique de la **Figure 7** illustre

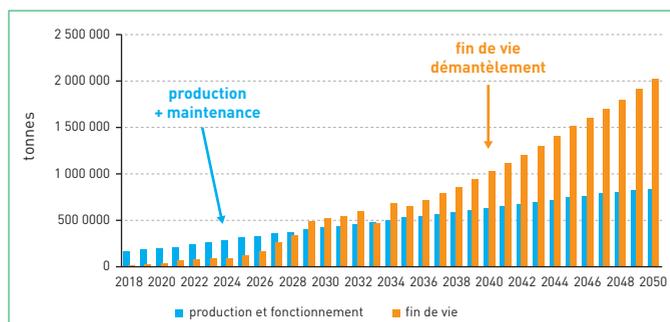


Figure 7

Prévisions d'évolution des masses de déchets générés lors de la production et utilisation des éoliennes (en bleu) et les déchets générés lors de la fin de vie des éoliennes (en orange).

en bleu les déchets générés lors de la fabrication des pales (les « chutes de production »). Pour l'industrie du composite, cela représente environ 8 à 10 % de pertes à chaque étape, ce qui n'est pas si mal. En comparaison, la production de bateaux entraîne généralement des pertes plus importantes. Les pertes surviennent aussi pendant la production et l'entretien du produit manufacturé. Les barres orange représentent, elles, le tsunami à venir des déchets à la fin de vie des éoliennes massivement installées depuis le début des années 2000. Typiquement conçues pour durer 20 ans, ces éoliennes vont arriver en fin de vie et générer une masse significative de déchets, même en tenant compte des reports et extension de leurs durées de service.

Pour donner un ordre de grandeur, diverses extrapolations estiment que l'on atteindra environ un million de tonnes de déchets générés par an d'ici une dizaine d'années et cette quantité continuera de croître de manière significative par la suite. Il est important de rappeler que les déchets des plastiques polymères en général s'élèvent à environ 400 millions de tonnes par an. Les déchets de pales d'éolienne n'en représenteront donc qu'une petite proportion (1 sur 400), mais à partir de matériaux de haute performance avec une forte valeur ajoutée.

2.2. Gestion actuelle des déchets de pales d'éoliennes

Le mode de gestion actuelle de ces déchets de fin de vie est l'enfouissement comme

représenté sur la **Figure 8**, sur laquelle on distingue clairement l'engin de chantier qui tente de pousser des tronçons d'éoliennes pour les enfouir sous terre. Tel est le destin actuel des éoliennes aujourd'hui, ce qui n'est pas enthousiasmant.

Parmi les mesures visant à lutter contre cela, avant d'aborder la question du recyclage toujours coûteux, il y a la règle des « 3R » : Réduire, Réutiliser, Recycler.

Allonger la durée de vie est la première étape pour repousser le problème, et pour cela il faut optimiser l'utilisation et surveiller l'état d'usure. Certains composants s'usent plus rapidement, par exemple les bords des éoliennes, ce qui constitue un enjeu technique majeur. L'autre aspect est d'examiner l'économie dans son ensemble et, sur ce point, il y a plutôt une convergence entre les considérations environnementales et les considérations économiques. L'idée est de produire des éoliennes plus grandes (**Figure 9**) qui



Figure 8

Photographie d'un site d'enfouissement de pales d'éoliennes. Casper Regional Landfill, Wyoming, États-Unis.

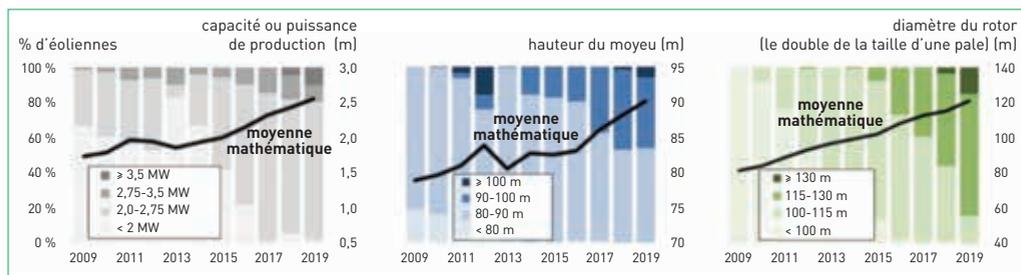


Figure 9

Graphes représentant l'évolution moyenne de la puissance de production (à gauche), de la hauteur du moyeu de l'éolienne (au centre), de la taille des pales (à droite).

Source : Berkeley Lab, Wind Energy Technology Data Update: 2020 Edition, Page 37. Note that rotor diameter (shown here in meters) is slightly more than twice the length of the blades



Figure 10

Photographie d'une éolienne dont les pales mesurent 110 mètres de long.

Source : d'après <https://www.bbc.com/news/business-51325101>

sont plus rentables financièrement et plus efficaces en termes d'utilisation des matériaux. Ainsi, au cours des 10 ou 15 dernières années, et cela va se poursuivre, les éoliennes sont devenues de plus en plus grandes comme sur l'exemple de la *Figure 10* d'une éolienne de 12 mégawatts¹¹ avec trois pales mesurant presque 110 mètres de long chacune. C'est la direction prise pour les 10 prochaines années : cette augmentation de la taille permettra de réduire la consommation de matériaux, même si cela ne résout pas le problème du recyclage des éoliennes précédentes et de celles que nous continuons d'installer.

2.3. Recyclage des pales d'éolienne

Une caractéristique très particulière du recyclage recherché est liée à la taille des éoliennes. Ce sont des objets gigantesques qu'il est nécessaire de déposer, tronçonner,

broyer, ramener. Ces étapes sont effectuées à différentes échelles, et, à la fin, on peut introduire le matériau final dans une broyeuse et obtenir cette sorte de poudre que l'on voit dans les deux mains de la *Figure 11*, mélange de résine plastique et de fibres de verre ou de carbone. Le problème est alors de valoriser ce mélange sous cette forme.

Peut-on les introduire dans une extrudeuse pour en créer quelque chose ? Pour l'instant, la réponse est « non », comme dans le cas des pneus, qui sont également des composites : on les incinère dans des cimenteries, considérant que c'est une meilleure option que l'enfouissement, si cela est fait dans de bonnes conditions.

En effet, les composites sont obtenus par imprégnation d'un réseau de fibres par une résine. Le recyclage de ces composites est très difficile en raison de l'abondance de fibres et surtout dépend de la nature de la résine. Actuellement, on utilise principalement des résines **thermodurcissables** (époxy et polyesters). L'injection des

11. Unité de puissance pour mesurer la quantité d'énergie produite.

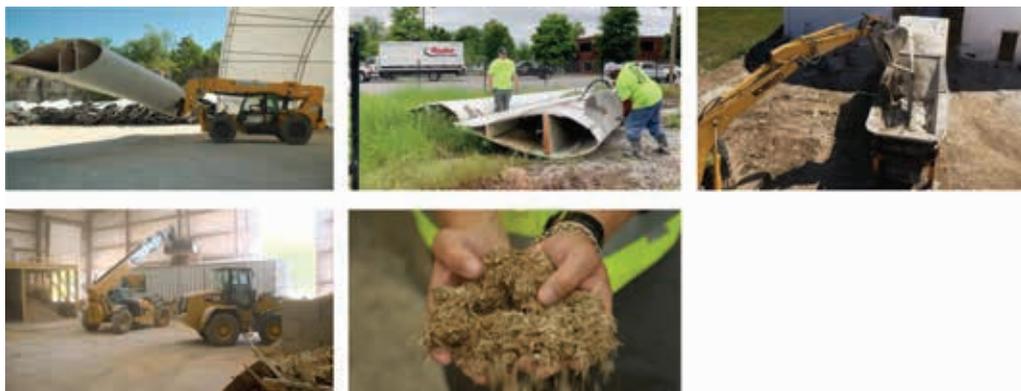


Figure 11

Les diverses étapes du démantèlement et broyage pilote mené par Véolia aux États-Unis.

Source : <https://www.businessinsider.com/recycle-wind-turbine-blades-veolia-north-america-waste-landfills-2023-2?r=US&IR=T>

fibres se fait avec une résine liquide qui est réticulée, créant ainsi de nombreuses liaisons chimiques dans toutes les directions, formant une sorte de réseau complexe de liaisons chimiques dans toute la matrice et qui enserré les fibres. Le problème est que ces liaisons chimiques sont omniprésentes, rendant l'objet figé et les fibres emprisonnées. Un peu comme un blanc d'œuf cuit, qui ne peut plus être modifié en termes de forme.

Une des approches explorées pour les composites consiste à remplacer ces résines entièrement réticulées par ce que l'on appelle des **résines thermoplastiques**, comme cela est présenté dans le chapitre de Jean-François Gérard. Dans ce cas, on a plutôt des chaînes longues ressemblant à des spaghettis qui s'entrelacent et qui, lorsqu'on les chauffe, peuvent glisser les unes par rapport aux autres, permettant ainsi de dénouer l'ensemble et

éventuellement de récupérer séparément les fibres et les chaînes.

Cependant, les procédés actuels de fabrication, notamment pour de grands objets, présentent un problème majeur : avec les résines thermoplastiques, quand le liquide est injecté, la viscosité est beaucoup trop élevée et la résine ne pénètre pas entre les fibres, ce qui entraîne des interfaces de mauvaise qualité et conduit à un matériau de mauvaise qualité, inacceptable.

Parmi les approches explorées pour permettre une recyclabilité efficace, Arkema a développé il y a plus d'une décennie une voie utilisant son expertise dans les matériaux de type acrylique pour proposer une nouvelle **résine « Elium »** : c'est une résine réactive (qui contient monomère, polymères, amorceurs, additifs) et permet une imprégnation facile. La résine à l'état liquide est coulée entre

les fibres, puis polymérisée *in situ*. Dans ces conditions, la chimie du mélange permet la formation de longues chaînes linéaires, non entrecroisées. Cela permet d'obtenir des matériaux composites possédant des propriétés mécaniques, de densité et de durabilité appréciables. Tout comme les autres thermoplastiques, l'avantage est que ce matériau peut être formé, réparé et soudé.

Cette approche permet surtout techniquement de valoriser les pales en fin de vie, que ce soit par recyclage mécanique ou chimique. Elle a été récompensée par le Prix Pierre Potier de l'innovation en chimie en faveur du développement durable.

Si on opte pour le recyclage mécanique, au broyage, la plasticité de la matrice autour des fibres permet de recomposer et potentiellement d'ajouter d'autres polymères, permettant ainsi de créer d'autres matériaux composites valorisables à un niveau assez élevé. Il est essentiel d'éviter le *downcycling*¹².

Le recyclage chimique est également possible, car il permet de récupérer séparément les fibres, qui représentent une partie importante de la valeur. Et si ce sont des fibres de carbone, elles ont une empreinte carbone notable. La résine récupérée

séparément peut, elle, être distillée¹³ pour refaire du monomère, dont nous avons démontré qu'il permet de recréer de la résine Elium¹⁴ de même performance (Figure 12), refermant ainsi la boucle du diagramme des 3R.

Les études à l'échelle laboratoire ont démontré que cela permettait effectivement de produire à nouveau des matériaux performants. C'est la même chimie que celle mentionnée pour le PMMA¹⁵, dans le chapitre de Jean-François Gérard, évoquant certaines chaînes polymères qui, lorsqu'elles sont chauffées, reviennent facilement au monomère¹⁶. Ces matrices, non seulement sont thermoplastiques, mais en plus possèdent une chimie¹⁷ qui permet leur décomposition facile à chaud pour récupérer le monomère avec une empreinte carbone relativement faible. En conséquence, il est possible de réaliser un recyclage chimique ou mécanique de haut niveau depuis quelques années.

13. Processus chimique permettant la séparation de différentes espèces chimiques, par différence de volatilité.

14. Résine développée par Arkema.

15. PMMA ou poly méthacrylate de méthyle est un polymère notamment connu comme étant le Plexiglas.

16. Le monomère est le motif moléculaire minimal qui se répète pour former la chaîne de polymère.

17. Bien que le terme chimie corresponde à la science des interactions, configurations et transformations des molécules, le terme est employé ici pour faire référence aux propriétés globales du matériau induites par le changement de température.

12. Littéralement : recyclage par le bas. Cela consiste à recycler un matériau de haute performance en un matériau à faible valeur ajoutée. Par exemple : broyer les pales d'éoliennes pour en faire un matériau de remblayage pour du ballast, comme évoqué dans la suite de la conférence.

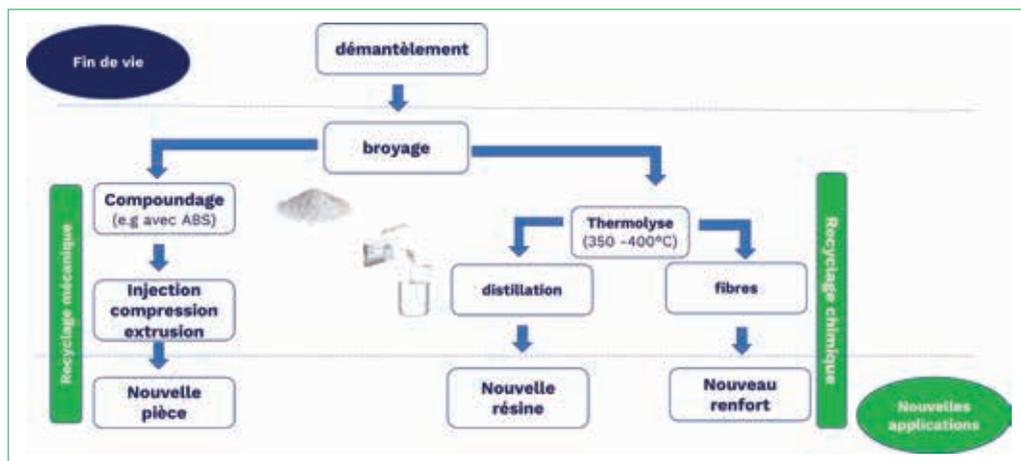


Figure 12

Les voies de recyclage possibles pour la résine Elium développée par Arkema.



Figure 13

Photographie aérienne d'une pale d'éolienne.

Source : https://www.governova.com/news/sites/default/files/2022-03/zebra_3.jpg

Grâce à des partenariats, nous avons démontré qu'il est possible de fabriquer de vraies pales avec ce type de solution. Un exemple datant du début de l'année 2022 (Figure 13) rappelle la taille impressionnante de ces objets.

Deux points méritent d'être mentionnés. Il y a environ une tonne d'adhésifs sur une pale. Nous produisons désormais

des adhésifs compatibles avec notre résine, ce qui évite d'avoir à les retirer au moment du recyclage, puisque l'adhésif est maintenant compatible avec le recyclage, un peu comme dans l'exemple des barquettes alimentaires.

Ensuite, la mention « 100 % recyclable » qui est présentée sur la Figure 13 indique la possibilité technique de recycler,

mais pas que la chaîne de recyclage soit en place. Elle ne dit pas non plus quel est le niveau du recyclage, ce qui est un élément clé pour faire progresser les réglementations sur le recyclage.

2.4. Autres utilisations de la résine Elium

La résine Elium n'a pas vocation à servir uniquement les éoliennes : on l'utilise aussi pour faire des réservoirs d'hydrogène haute pression (jusqu'à 700 bars) avec

des fibres de carbone. Dans ce cas de recyclage, l'objectif est d'abord de récupérer la fibre de carbone qui a une empreinte carbone élevée et beaucoup de valeur. De nouveau, Elium est un candidat qui peut se substituer dans les procédés existants aux solutions actuelles.

Nous avons aussi des collaborations dans le nautisme. Par exemple, le Groupe Beneteau a mis à sa gamme commerciale deux bateaux qui sont fabriqués avec la résine Elium (*Figure 14*).



Figure 14

Voilier de la marque Beneteau, réservoir à hydrogène fait en résine Elium.

Conclusion : éoliennes et circularité

Alors quelles perspectives pour le recyclage des éoliennes et de leurs pales ?

En matière de recyclage, les éoliennes ont comme spécificité leur taille, mais également leur durée de vie. On ne peut pas avoir le même raisonnement, peut-être même pas le même langage, quand on parle du recyclage d'objets comme un bateau qui a une durée de vie de 40 ans ou d'une éolienne avec 20 ou 30 ans, et quand on parle d'emballages qui seront à recycler au bout de quelques semaines. La durée

de vie impacte la mise en place de la chaîne de recyclage. Alors que pour de nouveaux emballages alimentaires on peut lancer « en même temps » les produits et les usines de recyclage, pour des objets de longue durée c'est impossible. Même si les fabricants de pales adoptaient aujourd'hui la solution Elium, on ne pourra pas installer maintenant une chaîne de recyclage d'Elium à l'échelle, parce que de toute façon, le marché ne viendra que dans 20 ans. Cette problématique peut conduire à de l'immobilisme, ce qu'il faut éviter.

L'autre problème est que les fabricants d'éoliennes sont actuellement très pressurisés sur les marges, et donc peu enclins à adopter des innovations qui pourraient entraîner des surcoûts, pour faire le changement de technologie ou de façon durable.

Parmi les actions ou les messages nécessaires pour sortir de cette impasse, il faudrait des réglementations pour guider et prescrire le bon niveau de circularité pour ce type d'industrie, dans la durée. En particulier, il faudra prescrire le niveau de recyclage demandé, expliciter ce que veut dire « recyclable ». N'importe qui peut mettre du broyat d'éolienne (**Figure 11**) et s'en servir pour en faire du ballast pour construire des autoroutes, mais ce n'est pas du recyclage à la hauteur de la valeur de ces matériaux. Ainsi la Commission européenne pourrait revoir les appels d'offres sur les éoliennes pour être plus précis dans la dénomination. Les critères environnementaux gagneraient aussi à être précisés pour que cela motive l'industrie dès aujourd'hui, afin que, dans 30 ans, les pales en fin de vie soient effectivement recyclables.

La deuxième chose, c'est que les acteurs doivent avancer et continuer d'explorer des solutions plus disruptives. Avancer sur le recyclage en utilisant une source de matière qui est

utilisable pour commencer à petite échelle, à savoir les chutes de production. Nous y travaillons sur différentes chaînes de valeur, dans le nautisme, dans l'hydrogène, dans l'éolien.

Mais c'est aussi regarder des solutions plus disruptives pour la fabrication des pales. Pour l'instant, les solutions proposées comme Elium sont adaptables aux procédés que les industriels qui fabriquent des pales d'éoliennes utilisent. Peut-être qu'il existe des solutions technologiques qui impliqueraient d'autres procédés de fabrication de ces composites qui mériteraient d'être revisités pour trouver de nouvelles idées.

Les problèmes sont si complexes et difficiles qu'il faut les aborder non seulement avec tous les acteurs, mais aussi avec des points de vue différents pour imaginer, créer des solutions qui apportent de la valeur quelque part, sinon, on ajoute simplement des surcoûts. Les partenariats sont essentiels, que ce soit entre les industriels, mais aussi avec le monde académique et avec les start-up pertinentes. C'est un chemin à parcourir collectivement.

Partie 2

Recyclage et transition
énergétique

Le recyclage des matériaux : Enjeux et stratégie – procédés chimiques et bioprocédés

Jacques Amouroux, professeur DC émérite, DHC – École nationale supérieure de Chimie de Paris/PSL – Université Pierre et Marie Curie/Sorbonne Université

Introduction

Cette présentation souligne quelques problèmes posés par le recyclage des matériaux et essaye de faire une distinction entre les procédés de recyclage par les voies de génie chimique et les bioprocédés¹ qui apparaissent comme un enjeu stratégique. Et pour ce faire, je rappelle le propos de Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. »

1. Mises en application de systèmes vivants (cellules ou leurs composants) pour provoquer des changements physiques ou chimiques.

À cette occasion, je voudrais rendre un hommage à Pierre Potier, qui fut Président de la Fondation de la Maison de la Chimie.

Ce grand scientifique, directeur de l'Institut des substances naturelles de Gif-sur-Yvette, Docteur en Pharmacie et Docteur ès Sciences, avait le sens des savoirs ancestraux et savait dire :

• « **Nos solutions sont dans la nature, il convient de savoir les voir.** » À ce titre, il a découvert l'anticancéreux, le taxotère, à partir de l'extraction de la substance des feuilles des ifs des jardins du laboratoire du CNRS de Gif-sur-Yvette dont il a modifié les propriétés par synthèse

organique pour développer un médicament extraordinaire commercialisé par la société Rhône-Poulenc et le CNRS.

• Ses conseils étaient :
« Émerveillez-vous et construisez votre passion. »

Je souhaite reprendre sa démarche dans cet article, en me limitant à deux types de recyclages liés à la transition énergétique : d'une part les procédés de recyclage technique dans les cas des batteries et du photovoltaïque², et d'autre part les bioprocédés appliqués au recyclage du gaz carbonique et des lanthanides.

1 De l'innovation à la déconstruction : les défis de la transition énergétique, les ressources et le recyclage

L'être humain, depuis sa naissance jusqu'au moment où il atteint sa pleine maturité,

2. Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

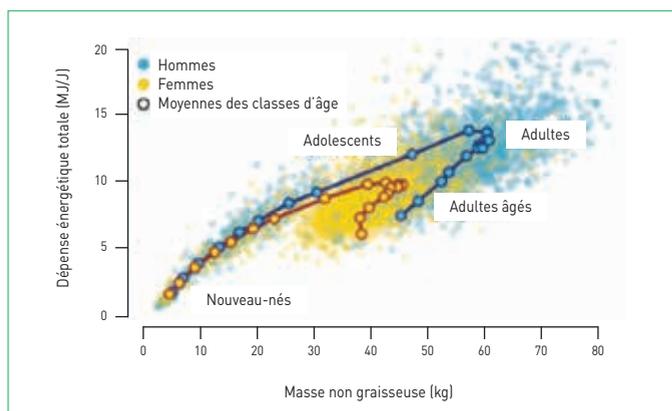


Figure 1

Consommation énergétique d'un humain en MJ/jour en fonction de son poids en kg (d'après Science mag.org 13 august 2021. Vol 373 issue 6556 p. 809).

consomme de quelques mégajoules à 15 mégajoules par jour (Figure 1).

Cette consommation est une obligation pour vivre, un peu différente en fonction de l'âge et du sexe. Lorsque l'on examine l'évolution de la courbe de la démographie mondiale (Figure 2, à gauche), on constate que nous sommes passés de moins d'un milliard d'êtres humains pour atteindre aujourd'hui 8 milliards, et nous nous dirigeons vers les 10 milliards.

Il est impératif de nourrir ces 8 milliards d'êtres humains, et de leur fournir l'énergie nécessaire comme on peut le voir sur la courbe de l'évolution de la consommation énergétique mondiale (Figure 2).

La révolution industrielle du charbon en Angleterre en 1850 a été la première étape, puis, en 1900, le pétrole du Texas est arrivé, puis le gaz.

Les énergies renouvelables décarbonées³ sont encore aujourd'hui tout à fait minoritaires (Figure 3). Vis-à-vis de la consommation mondiale globale de 200 000 TWh par an. Pour mieux comprendre ce que représente le térawatt-heure (TWh), il faut savoir qu'un pétrolier de 350 000 tonnes représente 4 TWh, et qu'une centrale nucléaire de 900 mégawatts génère 8 TWh/an. On comprend le défi auquel nous sommes confrontés lorsqu'il s'agit de remplacer les 82 % d'énergies fossiles par des énergies dites décarbonées, que ce soit le nucléaire, l'hydraulique, l'éolien ou le solaire, qui ne

3. Une énergie dite décarbonée ne produit pas de dioxyde de carbone lors de son utilisation.

représentent aujourd’hui que 17 % au total (**Figure 3**). **Malgré le développement du solaire et de l’éolien, ces deux énergies décarbonées, dont on parle beaucoup, n’ont pas un impact majeur (4 %) sur la consommation mondiale.**

Mais il ne faut pas oublier que le talon d’Achille de notre société est l’eau. La consommation mondiale est de 4 milliards de tonnes par an. Cette eau, pour 70 %, est la clé d’entrée pour pouvoir assurer une agriculture qui nous fournit la nourriture,

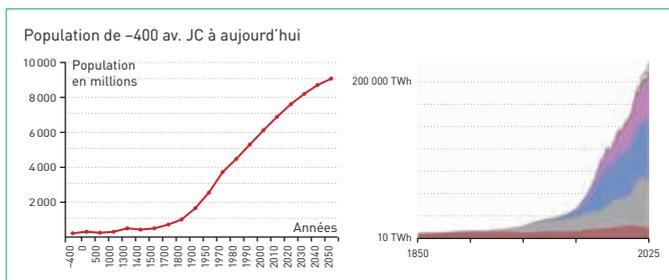


Figure 2

Mise en perspective de l’évolution de la consommation énergétique mondiale et celle de la démographie mondiale. À gauche : démographie mondiale de -400 à aujourd’hui. À droite : évolution de la consommation énergétique de 1850 à 2025.

Source : Nations unies, L’Internaute

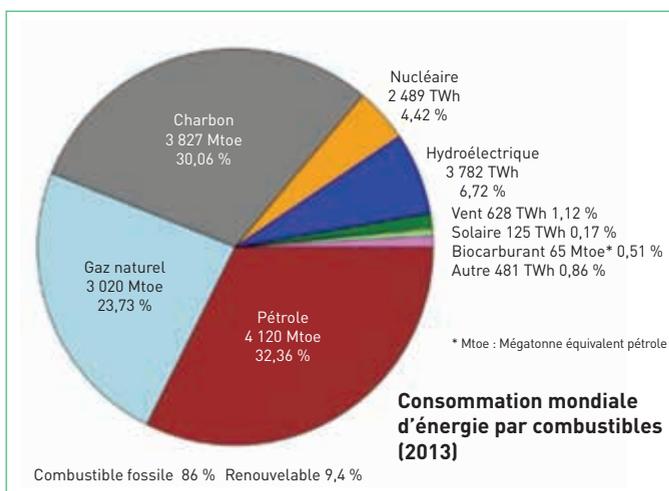


Figure 3

Répartition de la consommation mondiale d’énergie par type de combustibles en 2019. À noter que, en 2022, il y a eu 82 % de « combustibles fossiles » et 17,3 % d’« énergies renouvelables ».

22 % sont consommés pour l'industrie et 8 % pour les besoins domestiques. Nous sommes donc confrontés à une véritable problématique, à savoir **le recyclage de l'eau**, bien que cela ne soit pas l'objet de cet article, cela sera implicite dans un bon nombre de cas.

1.1. La transition énergétique et les consommations de matériaux

Si nous regardons les innovations développées par notre société au cours des dernières années, nous constatons que le matériau le plus utilisé est le fer (**Figure 4**) avec 3 milliards de tonnes par an. Ensuite, viennent les métaux

industriels avec l'aluminium, le manganèse, le chrome, le cuivre, le nickel... La consommation de ces matériaux, qui sont indispensables à la voiture électrique, sera multipliée par un facteur de 2, 3 ou 4, voire dix (lithium), dans les prochaines années.

Les métaux dits stratégiques qui sont indispensables, à la fois pour les téléphones portables, la microélectronique, les big data, etc. sont représentés **Figure 5** : 1,3 milliard de tonnes ont été extraits en 2019 comprenant l'étain, le molybdène, le cobalt, le tungstène, l'indium, le vanadium, le niobium, le tantale, l'or, le platine, le gadolinium et le fameux lithium.



Figure 4

Ensemble des métaux extraits en 2019 dans le monde (d'après British Geological Survey, 2019 ; USGS Mineral Commodity Summaries, 2021).

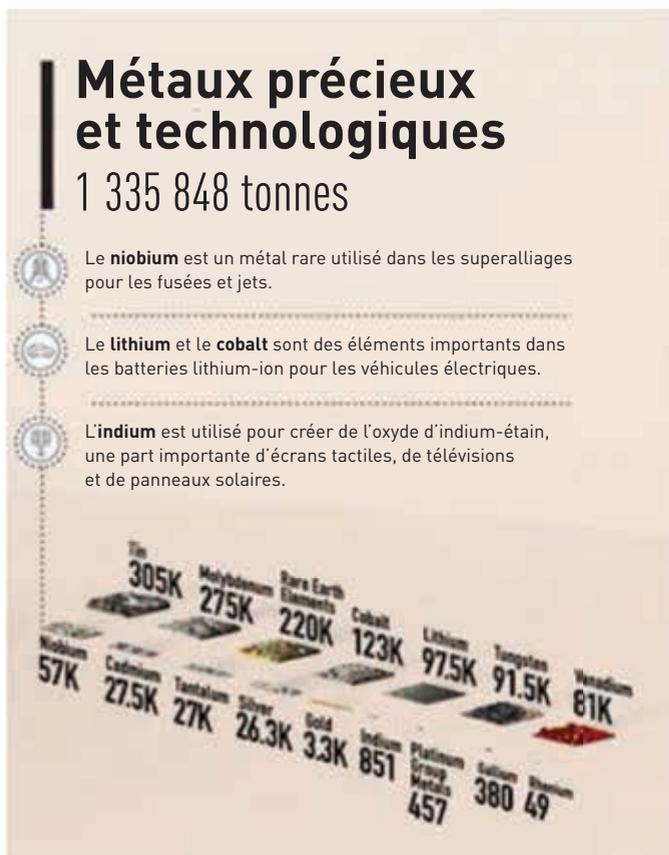


Figure 5

Matériaux stratégiques extraits en tonnes en 2019 dans le monde (d'après British Geological Survey, 2019 ; USGS Mineral Commodity Summaries, 2021).

Cette extraction minière requiert 6 % de l'énergie mondiale pour être réalisée.

1.2. Les procédés classiques de recyclage

Recycler les matériaux apparaît donc comme une obligation, d'une part pour des raisons environnementales, d'autre part pour des raisons stratégiques et logistiques, ainsi que pour l'énergie nécessaire pour les produire. Et enfin, rappelons encore qu'il

faut prendre en compte l'eau, qui est indispensable à toute activité humaine.

Si nous regardons le cas du **recyclage de l'acier** : on en fabrique actuellement 1,7 milliard de tonnes par an à la sortie des hauts-fourneaux. Pourtant les ferrailles recyclées ne représentent que 600 millions de tonnes, soit seulement 36 % de recyclage, alors même que c'est le matériau le plus facile à recycler. Nous sommes donc loin du compte pour parvenir à recycler l'ensemble de l'acier.

Pourtant, la nature sait recycler et nous aide, comme le montre l'exemple de l'épave du *Titanic*, située à 3 500 mètres de profondeur, en train d'être recyclée par une bactérie nommée *Holomonas Titanicae* (Figure 6), qui dévore 500 tonnes d'acier par an. Nous aborderons plus loin cette partie des bioprocédés qui semble être une stratégie future déterminante pour l'ensemble des activités industrielles et humaines.

1.3. Le recyclage des batteries : le défi des années futures pour l'Europe

A. Les batteries Li-ion

Analysons maintenant le problème des batteries. La batterie d'un véhicule électrique



Figure 6

Recyclage du *Titanic* par la bactérie *Holomonas Titanicae*.

Sources : à gauche, d'après une vidéo diffusée par Atlantic Productions (Atlantic Productions via The Associated Press) ; à droite, d'après Wikipedia (Mann, Kaur, Sánchez-Porro & Ventosa 2010)



Figure 7

Piles élémentaires de batterie de véhicule électrique.

n'a rien à voir avec celle d'un véhicule thermique. Il s'agit d'une série de piles (Figure 7), regroupées pour former ce que l'on appelle une batterie électrique. Dans une voiture comme la Tesla, on compte 7 000 de ces petites batteries, gérées et coordonnées par une électronique que l'on voit sur la partie inférieure (Figure 8). Intéressons-nous uniquement au recyclage de ces batteries, et pas à l'électronique, pourtant essentielle pour les charger et les décharger de manière simultanée, faute de quoi il y aurait un risque d'incendie.

Au niveau mondial, ces batteries représenteront 250 000 tonnes à recycler d'ici 2030. Les techniques qui seront utilisées sont quelque peu brutales, mais classiques. Après avoir déchargé ces batteries, on les broiera. Cela donnera un mélange appelé la « *black mass*⁴ », et ce mélange, ainsi que l'ensemble de ses ingrédients, sera traité par l'hydrométallurgie⁵ classique du génie chimique, avec des solutions acide-base, l'extraction liquide-liquide, les phénomènes de précipitation et l'électrolyse⁶, pour récupérer le nickel, le lithium et le manganèse, qui sont les trois éléments les plus valorisés et les plus coûteux dans ces matériaux. Si l'on examine la composition d'une batterie Li-ion (Figure 9), 22 % de son poids correspond à

4. Masse noire.

5. Ensemble des procédés et des techniques d'extraction des métaux contenus dans un matériau brut ou concentré, par dissolution dans une phase liquide.

6. Décomposition par le passage d'un courant électrique.

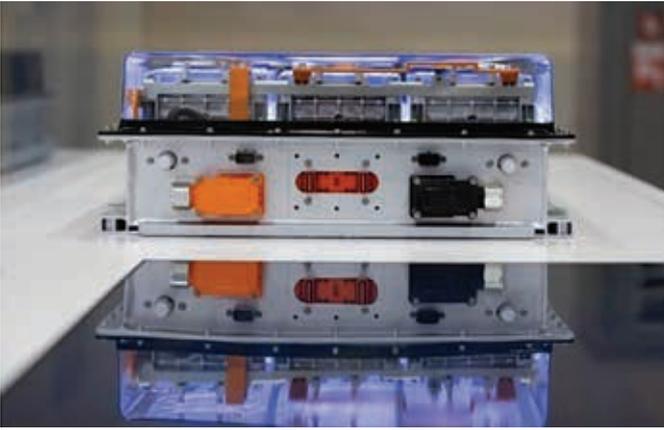


Figure 8

Batterie électrique de la marque CATL (Technologie Amperex contemporaine)

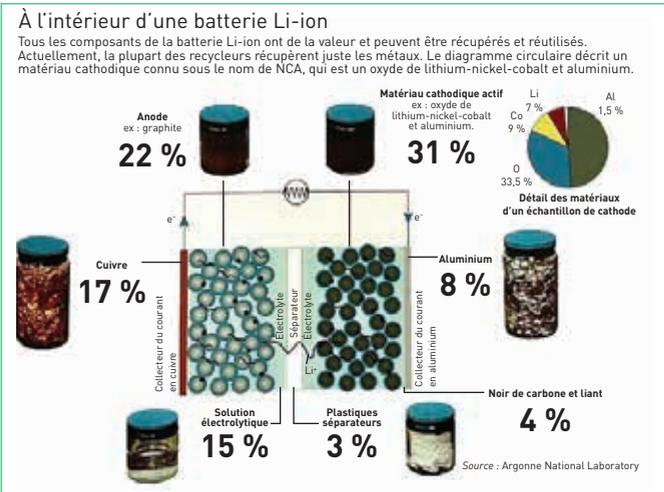


Figure 9

Composition d'une batterie lithium-ion (d'après Argonne National Laboratory).

l'anode⁷, 31 % à la cathode⁸. L'électrode⁹ proprement dite de la cathode est en l'aluminium

7. L'anode constitue l'électrode où la réaction d'oxydation a lieu. L'oxydation est une perte d'électrons.

8. La cathode constitue l'électrode où la réaction de réduction a lieu. La réduction est un gain d'électrons.

9. Conducteur libérant ou captant le courant électrique.

et représente 8 % du poids ; l'anode est en cuivre et pour 17 % du poids ; l'électrolyte¹⁰, qui est un lithium-fer-phosphate, représente 15 % en masse. On rajoute sur le compartiment cathodique les granules de graphite pour éviter

10. Capable de transporter le courant électrique.

les formations dendritiques au moment du rechargement et, entre les 2 compartiments, il y a une barrière polymérique pour éviter le mélange des gels. On pourrait imaginer que ces batteries étant connues, on puisse les recycler simplement. Mais tous ces produits sont en cours d'amélioration : vitesse de chargement, capacité de chargement, durabilité, etc., c'est-à-dire qu'en permanence, qui dit amélioration, dit modification des compositions, donc modification des stratégies de recyclage, ce qui explique donc la complexité à laquelle nous sommes parvenus (Figure 10).

La gestion du lithium

Concentrons-nous sur le cas du lithium qui est un matériau stratégique dans le cas des batteries.

En effet, pour produire une tonne de lithium, il faut 250 tonnes de minerai ou 750 tonnes de saumure. Pour traiter 750 tonnes de saumure, il faut 2 000 tonnes d'eau dans les salars du Chili.

À cela il faut ajouter que, pour 1 kWh de batterie, on émet 42 kilos de CO₂, ce qui signifie que nous ne sommes jamais neutres en carbone, quel que soit le type d'activités.

La Figure 11 montre un salar du Chili : c'est un gigantesque marais salin où l'évaporation va faire apparaître le carbonate de lithium.

Regardons maintenant l'évolution des masses de matériaux à recycler (Figure 12) et la masse des matériaux à recycler en 2028 pour 2 000 GWh (Figure 13).

LiB cathode chemistries	Idéal Faible				
Types de cathode	LCO	LFP	LMO	NCA	NMC
Formule chimique	LiCoO ₂	LiFePO ₄	LiMn ₂ O ₄	Li(Ni,CoAl)O ₂	LiNi _{0,33} Mn _{0,33} Co _{0,33} O ₂ (NMC111) LiNi _{0,8} Mn _{0,15} Co _{0,05} O ₂ (NMC532) LiNi _{0,8} Mn _{0,15} Co _{0,05} O ₂ (NMC622) LiNi _{0,8} Mn _{0,1} Co _{0,1} O ₂ (NMC811)
Structure	Layered 	Olivine 	Spined 	Layered 	Layered 
Année d'introduction	1991	1990	1996	1999	2008
Sûreté	..	.....	....	...	...
Densité d'énergie	....	...	...	.....	.....
Densité de puissance	...	....	....	....	...
Durée de vie du calendrier	...	....	....	....	....
Durée de vie du cycle	....	....	...	....	...
Performance	....	....	...	....	....
Coût	.	....	....	...	...
Part de marché	Obsolète	Vélos électriques, bus et véhicules lourds	Petit	Stable	En croissance

Figure 10

Évolution des cathodes de plus en plus complexes. Désassemblage à modifier à chaque génération.



Figure 11

Salar du Chili au désert d'Acatama [Image extraite d'un reportage vidéo sur le lithium : L'or blanc du Chili, du Journal de TF1 du 25 janvier 2022].

En 2017

Un million de véhicules électriques soit 154 MWh de batteries

En 2028

Environ 28 millions soit 2 000 GWh de batteries

Dans dix ans on aura **250 000 tonnes** de déchets

(Nature 2019, DOI: 10.1038/s41586-019-1682-5)

Figure 12

Évolution des masses de batteries à recycler dans les dix ans à venir.

Cas des batteries de 435 kg ou 87 KWh

Li : $1,4 \times 10^5$ T ou 140 000 tonnes

Co : 4×10^5 T

Cu : $5,7 \times 10^5$ T

Mn : $8,8 \times 10^5$ T

Al : $4,3 \times 10^5$ T

Ni : $2,4 \times 10^5$ T

Steel : $22,4 \times 10^5$ T

Graphite : $24,5 \times 10^5$ T

Émission de CO₂ : (42 kg/kwh) × 2 000 GWh = **84 millions tonnes de CO₂**

(dec 9/16 2019 CEN.ACS.ORG.- C8EN p 21)

Figure 13

Masse de matériaux à recycler en 2028 pour 2 000 GWh de batteries.

De nombreux problèmes vont être à résoudre.

En 2028, dans le cas des batteries classiques de 435 kg et de 87 kWh, le recyclage de 2 000 GWh de batteries générera des masses de matériaux à recycler considérables : 140 000 tonnes de lithium, 400 000 tonnes de cobalt, 570 000 tonnes de cuivre, 880 000 tonnes de manganèse, 400 000 tonnes d'aluminium, 200 000 tonnes de nickel, 2 milliards de tonnes d'acier et 2 milliards de tonnes de graphite.

De plus, lors de leur utilisation, on ne peut pas décharger ce type de batterie à moins de 20 % ni les charger à plus de 80 % de manière classique. Ainsi, nous ne disposons que d'environ 60 % de 87 kWh, soit environ 50 kWh utiles pour faire fonctionner chaque véhicule électrique.

Si nous examinons l'aspect financier et industriel de l'origine de ce lithium (*Figure 14*),

géopolitiquement, l'Australie et le Chili produisent actuellement 80 % du lithium brut. La Chine en produit très peu, mais domine le traitement de ce matériau pour produire l'électrolyte lithium-fer-phosphate qui provient à 58 % de Chine et à 31 % du Chili. Donc, 90 % du matériau de base qui permet de créer une batterie provient encore de l'extérieur de notre continent européen, qui tarde toujours à trouver des solutions pour l'avenir.

Il faut aujourd'hui 33 kg de lithium par véhicule électrique, mais d'ici à 2030, il faut prévoir une augmentation de 400 % de la demande globale de batteries. Or, en 2012, le lithium valait 5 000 dollars la tonne alors que maintenant, en 2023, il atteint 50 000 dollars la tonne.

B. Le stockage d'une grande quantité d'électricité est un véritable enjeu géopolitique

La plus grande batterie, fabriquée par BASF, est une batterie sodium-soufre de 5,8 MWh, qui a un volume de 125 m³ (*Figure 15*), à comparer avec 125 m³ de fioul qui permettent de stocker 1 375 MWh. On voit ainsi que la compétition du stockage de l'énergie entre carbone et batterie reste un défi pour nos sociétés.

Cependant, en développant le photovoltaïque et l'éolien, nous produisons des électrons. Il est nécessaire de stocker ces électrons pour les rendre disponibles aux heures de pointe. Nous allons assister à des développements comme celui de la *Figure 15* où des batteries de grande capacité seront utilisées pour stocker l'énergie pendant les heures creuses et

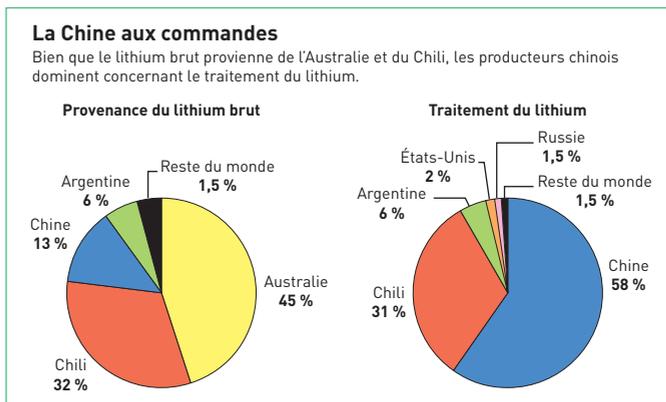


Figure 14

Le lithium, aspect financier et industriel : diagramme circulaire de la provenance du lithium brut et de la localisation du traitement du lithium (d'après Benchmark Mineral Intelligence).



Figure 15

Batterie BASF sodium-soufre.



Figure 16

Allée de batteries de grande capacité.

la restituer pendant les heures de pointe afin de stabiliser le réseau.

Le recyclage de ces batteries dans les 10 ans à venir est un véritable défi pour l'Europe.

En France, l'objectif est de 200 000 batteries par an et les filières de recyclage sont représentées sur la **Figure 17**.

L'Europe a engagé la bataille du recyclage avec des acteurs importants comme :

- BASF qui prévoit une usine de 15 000 tonnes par an et le recyclage de la *black mass* ;
- Northvolt en Norvège qui a un projet de 12 000 tonnes par an.

Les prévisions à l'horizon de 2030 sont de 350 000 tonnes

Projet Veckor, Prologium et Orano et du Chinois XTC pour la production et le recyclage des cathodes à Domielle (Hauts-de-France).

Eramet et Suez ont développé une installation pilote à Trappes et ont mis en chantier pour 2025, dans les Hauts-de-France, une unité de production de *black mass* qui contient les métaux des batteries et en 2027 une unité de retraitement par hydrométallurgie de la *black mass* pour récupérer le nickel, le lithium, et le manganèse.

Objectif affiché : 200 000 batteries par an pour 65 % de recyclage

Figure 17

Filières de recyclage en France et en Europe.

par an de matériaux issus de batteries Li-ion à recycler.

1.4. Le recyclage des panneaux photovoltaïques

Examinons maintenant le problème des panneaux photovoltaïques. Le photovoltaïque est une énergie produite à 95 % grâce au silicium ultra-pur capable de transformer l'énergie photonique¹¹ en électrons, permettant ainsi d'obtenir un flux d'électrons en sortie des photopiles¹² et des panneaux. **Cependant, la production de silicium photovoltaïque nécessite 300 kWh par kilo.**

Un panneau photovoltaïque standard pèse 20 kg, pour une capacité de 300 watt-crêtes (Wc)¹³. Il a un facteur de charge de 15 %, c'est-à-dire qu'il produit 45 W en valeur moyenne sur l'année, sa production électrique annuelle variant selon que vous êtes dans le Nord ou dans le Sud, entre 270 et 420 kWh/an, ou en production journalière entre 740 et 1 150 Wh. **Pour charger quotidiennement une voiture électrique, il faudra au moins une vingtaine de panneaux.**

Actuellement, on installe quelque 60 millions de tonnes de panneaux photovoltaïques dans le monde (Figure 18).

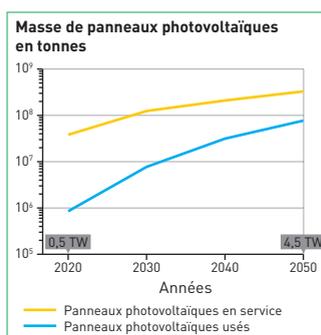


Figure 18

Prévision de développement de la production de panneaux photovoltaïques et de la masse de panneaux à recycler (d'après Nat. Energy 2020, DOI: 10.1038/s41560-020-0645-2).

On prévoit d'atteindre les 500 millions de tonnes. La courbe en bleu qui est en bas de la Figure 18 concerne les prévisions de recyclage, la durée de vie des panneaux étant de l'ordre de 25 ans. Actuellement, nous sommes aux environs de quelques millions de tonnes à recycler.

Stratégie de la déconstruction et du recyclage des panneaux photovoltaïques

Le stockage des panneaux usés est un problème. Quand on ne sait pas quoi en faire, on les empile (Figure 19).

Pour analyser le problème de la déconstruction, rappelons les bases de la construction. Le silicium métallurgique est l'élément de base, produit par électroréduction en four à arc¹⁴. Il coûte à peu près 4 dollars le kilo. Le silicium photovoltaïque a une pureté de 6N ou 8N, ce qui signifie que c'est un matériau qui a un atome étranger pour 1 milliard d'atomes de silicium, ce qui traduit sa pureté tout à fait exceptionnelle, mais il coûte 32 dollars au kilo. Le silicium photovoltaïque s'est développé au niveau européen, en Allemagne en particulier qui a été leader du domaine dans les années 2000. Actuellement, le marché est dominé par la Chine (Figure 20) qui fabrique 98 % des pavés de silicium.

La Figure 21 présente une unité de distillation du trichlorosilane qui montre l'unité de distillation qui est derrière l'élaboration de ce produit ultra pur par un procédé développé par la société Wacker,

11. Énergie qui provient des photons *i.e.* de la lumière, en particulier celle du soleil.

12. Dispositif utilisant l'effet photovoltaïque pour convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

13. Unité de mesure utilisée pour mesurer la puissance maximale qu'un panneau photovoltaïque peut fournir dans des conditions idéales. En outre, 1 watt-crête correspond à 1 Wh dans les conditions idéales.

14. Qui est produit par l'énergie électrique.



Figure 19

Stockage des panneaux photovoltaïques usés (d'après ACS, mai 2022).

leader dans les années 2000, avant qu'elle ne disparaisse en 2010, complètement dévorée par la démarche chinoise.

Les différentes étapes du procédé sont résumées sur la **Figure 22**. Le silicium à 99 % est dissous dans l'acide chlorhydrique à 300 °C, puis est distillé sous forme de trichlorosilane à 250 °C, il est ensuite craqué à 1 200 °C (sur la partie droite), sur des épingles thermiques, pour donner un silicium microcristallin ultrapur.

Si nous reprenons la chaîne logistique de fabrication (**Figure 23**), puisque c'est



Figure 20

Proportion du marché des photovoltaïques dominé par la Chine (d'après BNEF).



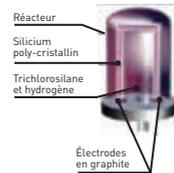
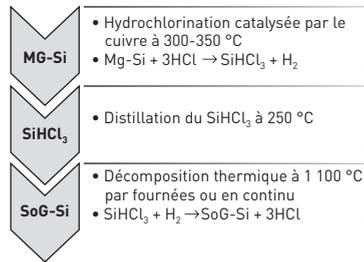
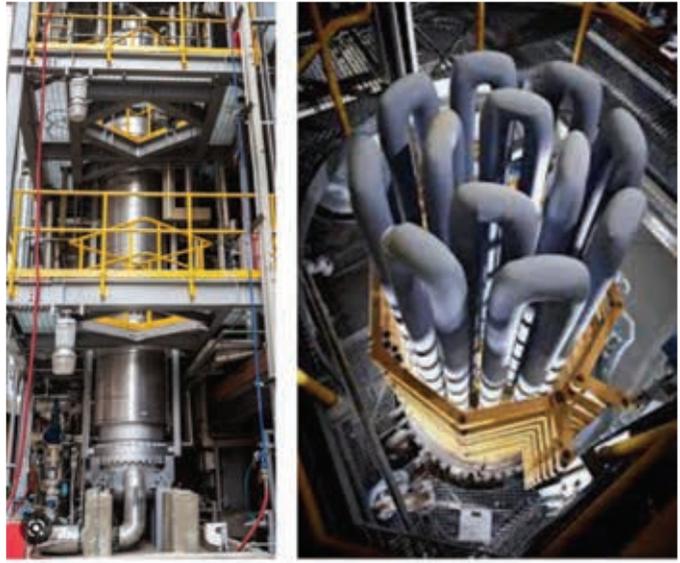
Wacker Chemie utilise des tours de distillation pour enlever les impuretés du trichlorosilane, qui est utilisé pour produire du polysilicone.

Figure 21

Unités de distillation du trichlorosilane par le procédé Wacker (d'après CEN.ACS.org september19.2022 p. 22).

celle que nous allons devoir déconstruire, on part donc d'abord du silicium ultrapur, on en fait un lingot (étape 2). Ce lingot est découpé pour faire des « wafers » qui vont avoir une épaisseur de l'ordre de 100 microns¹⁵. Ces tranches de silicium sont dopées au phosphore (étape 3) pour faire la diode. Sur cette diode, on va apporter des électrodes en argent. Ces électrodes vont être assemblées pour faire des guirlandes, et ces guirlandes vont être ensuite encapsulées

15. 1 micron = 1 micromètre.



Dans le cas d'un réacteur de type Siemens, le dépôt a lieu sous cloche chauffée à 1 100-1 200 °C via des électrodes en graphite.

Figure 22

Procédé Wacker de distillation du SiHCl₃ (d'après CEN.ACS.org september19.2022 p 22).

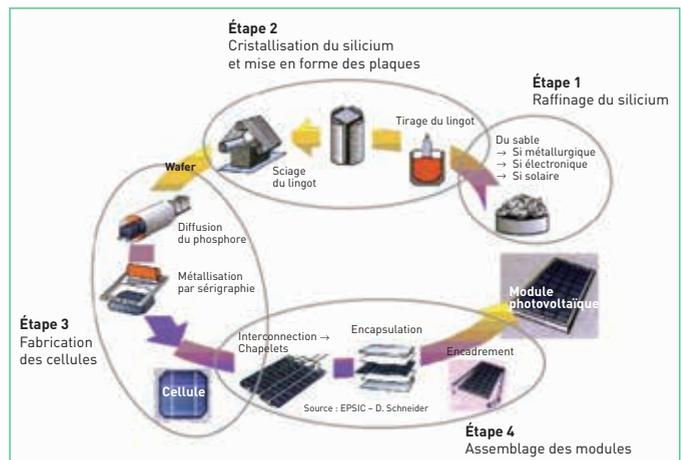


Figure 23

Étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin.

pour faire apparaître le panneau (étape 4).

Le problème du recyclage est celui posé par la séparation des couches d'encapsulation de la photocellule parce qu'il y a 2 feuilles de polymère (Figure 24), l'EVA d'un côté et le tedlar de l'autre, qui sont d'une robustesse extraordinaire. Il n'y a pas la moindre fuite d'air, ce qui permet la durée de vie du panneau de l'ordre de 20 à 25 ans, faute de quoi on aurait des phénomènes de corrosion.

Pour dé-laminer cet ensemble, on utilise soit des solvants, avec tous les problèmes posés par leur utilisation, soit la proposition du CEA avec l'utilisation du CO₂ supercritique¹⁶ qui attaque les 2 feuilles de polymère (Figure 25), comme le montre la boursoufflure, puis on récupère les photopiles.

Cela serait simple s'il n'y avait pas 80 millions de tonnes de panneaux à traiter. On comprend le défi auquel on est confronté, en sachant que le recyclage coûte entre 15 et 45 dollars le panneau selon les pays et selon les temps de transport pour les amener à l'usine correspondante. Dans l'hypothèse du simple stockage, cela ne coûte que 5 dollars le kilo.

Le problème posé par ce recyclage est donc aussi un problème financier, et la question est de savoir qui le paye ? Il faut faire un bilan financier de toutes les opérations pour aboutir à une industrie qui

paie l'ensemble de ceux qui agissent.

Du point de vue de la logistique, si l'on regarde la composition en masse des panneaux (Figure 26), 75 % du panneau est en verre, le polyéthylène



Figure 24

Principe d'encapsulation de la matrice ; au-dessus, la feuille d'EVA, au milieu la photopile et en dessous le tedlar.

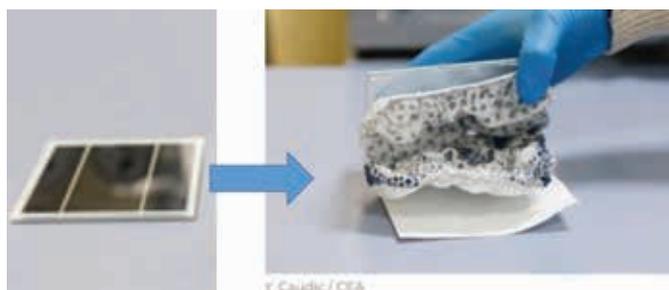


Figure 25

Recyclage des panneaux photovoltaïques grâce au CO₂ supercritique.

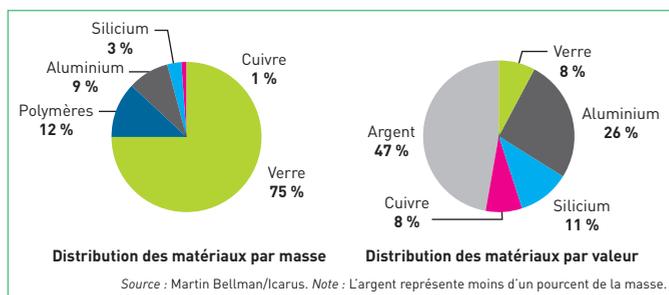


Figure 26

Matériaux dans une cellule photovoltaïque.

16. Un état supercritique est intermédiaire entre celui d'un gaz et d'un liquide : en outre, cela intervient à une température et une pression élevées.

représente 12 %, l'aluminium 9 %, le silicium 3 %, le cuivre 1 %. Mais si l'on considère la valeur financière des composants sur laquelle on va fonder un business model du recyclage, on constate que la connectique en argent représente 47 % de la valeur que l'on peut espérer récupérer, le cuivre 8 %, le silicium 11 %, l'aluminium du cadre du panneau 26 %, et le verre, qui a peu de valeur, 8 %. Donc voilà la contradiction dans la chaîne logistique que l'on va devoir construire entre la chaîne de manipulation et la chaîne financière.

Quand on fait le bilan du recyclage à prévoir en 2050, les tonnages sont monstrueux : 75 millions de tonnes de verre, mais les problèmes concernent surtout le cuivre, avec 1 million de tonnes, qui est un matériau en tension au niveau international, l'aluminium 9 millions de tonnes, 3 millions de tonnes pour le silicium. Donc ce sont de grands volumes et de grandes masses qu'il va falloir gérer pour pouvoir développer une unité industrielle.

Au niveau européen, un certain nombre de consortiums ont été montés, avec l'aide de la communauté européenne, pour déconstruire l'ensemble des panneaux. Mais on en est au balbutiement, et encore loin d'avoir atteint les points correspondant aux tonnages dont on a besoin.

2 Le rôle des procédés bactériens pour le recyclage

Rappelons-nous que l'eau et le carbone sont les deux molécules clés qui donnent la vie.

Ainsi, face au futur de notre société, la biodiversité dépend entièrement de ces deux molécules. Malgré son importance, le recyclage de l'eau ne sera pas traité : nous examinerons le cas du carbone. L'avantage des bioprocédés utilisant des bactéries réside dans le fait que ces procédés se déroulent à basse température, utilisent peu de réactifs toxiques, et peuvent employer différentes sources d'eau (douce, de mer, usée). L'énergie peut aussi provenir de diverses sources. Cependant, la source bactérienne est la clé d'entrée des bioprocédés, et elle doit être sélectionnée avec rigueur. Nous savons modifier les bactéries grâce aux organismes de modification génétique, tels que CRISPR-Cas9, sur lesquels la lauréate du prix Nobel Isabelle Charpentier a effectué sa thèse à l'université Pierre et Marie Curie. Ainsi, la modification bactérienne constitue la clé du futur de cette technologie du « bio-engineering » qui est, à mes yeux, l'avenir de nos sociétés industrielles.

2.1. Stratégies innovantes pour le recyclage du carbone et le contrôle de CO₂

A. Dans la nature, le carbone est recyclé en méthane

Le problème du recyclage du carbone est devenu, au sens figuré, la bête noire de notre société.

Dans la nature, le charbon est un macro-polymère¹⁷, qui

17. Polymères : longues chaînes de molécules possédant une masse molaire élevée, se répétant avec un motif précis.

peut être découpé par des bactéries de type méthanogène¹⁸ pour produire ce que l'on appelait autrefois le grisou, c'est-à-dire le méthane. **Nous disposons d'une réserve de 50 000 milliards de mètres cubes de méthane.** L'idée selon laquelle nous n'utilisons pas ce méthane me semble surprenante. Même si nous ne l'utilisons pas, les bactéries ne suivent ni les injonctions de la communauté européenne ni nos propres directives et elles continuent de travailler. Dans la mer de Barents (**Figure 27**), des lacs de méthane se forment, tout comme dans le lac Baïkal en Russie, provoquant des explosions régulières. Cela traduit le fait que, faute de l'avoir capté, le méthane s'échappe dans l'atmosphère, contribuant alors à l'effet de serre bien connu. C'est un point dans notre société, difficile à comprendre sur le plan scientifique.

Il y a aussi des explosions massives d'hydrates de méthane déposés sur les fonds marins arctiques qui sont visibles de l'espace, c'est dire leur importance.

La structure cristalline d'un hydrate de méthane est représentée sur la **Figure 28**. Le couplage entre 5 molécules d'eau et 1 molécule de méthane forme un solide. Ce solide peut être exploité pour nous donner du méthane. **Là aussi, on dispose de réserves de quelques milliards de mètres cubes de méthane.**

18. Bactéries qui produisent du méthane au cours de leur métabolisme anaérobie *i.e.* sans oxygène.

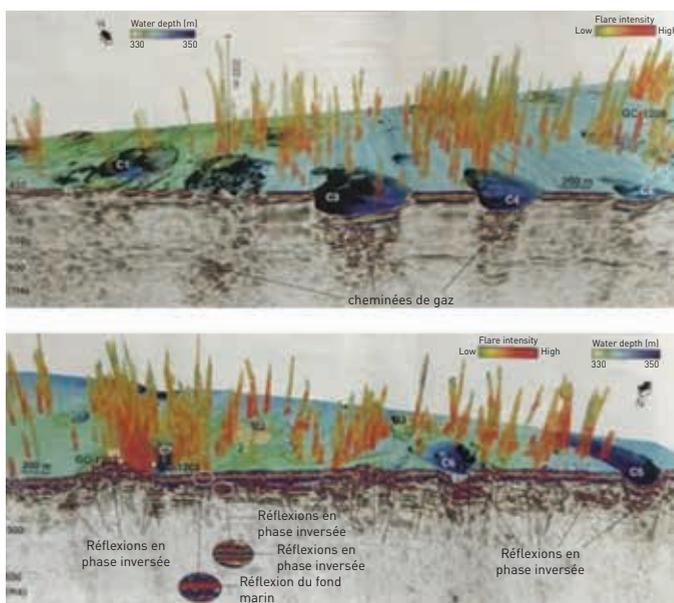


Figure 27

Accumulation de méthane dans le lac de Barents (d'après Science, 2 juin 2017, p. 949, vol 356, issue 6341).

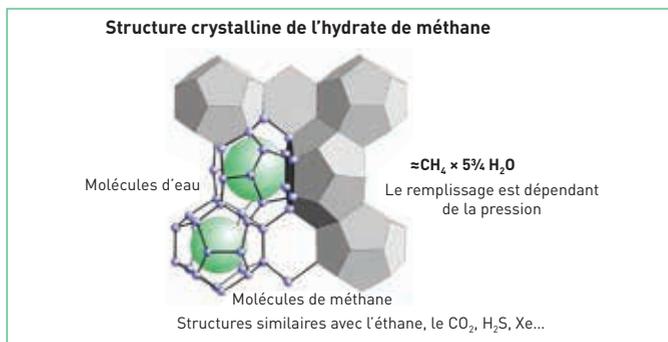


Figure 28

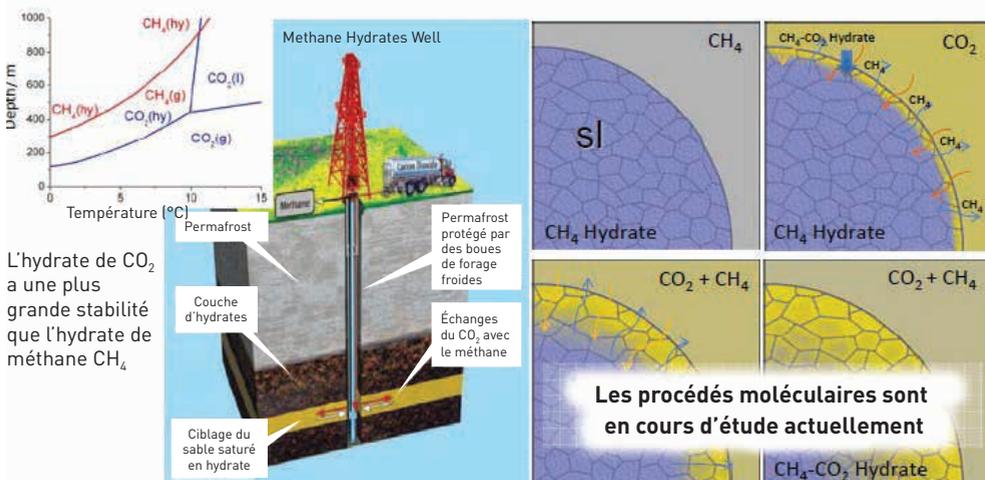
Structure cristalline solide du méthane hydraté.

La société japonaise Mitsui avait débuté l'exploitation de ces hydrates de méthane pour récupérer le méthane et faire tourner ses turbines à gaz (**Figure 29**).

Bien que la France ait fermé toute la filière charbon en

Stockage alternatif : l'échange $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ dans les hydrates gazeux

Échange $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ dans les sédiments poreux, c'est-à-dire dépendant de la taille des grains



Observation : le CO_2 est déjà utilisé pour améliorer la récupération de sources hydrocarbonées conventionnelles. Le remplacement du CH_4 dans les hydrates gazeux est en cours d'étude.

Figure 29

Extraction des hydrates de méthane par la société Mitsui.

1983, les bactéries présentes dans les galeries de charbon continuent de travailler. *Methermicoccus*¹⁹ continue de décomposer les nappes de charbon, et à Béthune, la société des houillères du Nord a développé un système étanche pour coiffer l'ensemble de ces puits, permettant de récupérer le méthane et de fournir une autonomie énergétique à la commune de Béthune depuis 2021 (Figure 30).

Ce secteur de l'exploitation du méthane est en pleine effervescence, explorant la possibilité de produire directement du méthane par le couplage $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ et l'électrolyse, comme le suggèrent les équipes de Stanford. On trouve également des approches avec les cyanobactéries, qui sont génétiquement modifiées pour produire

des alcools, entre autres. C'est un secteur de recherche en évolution extraordinaire qui ferait du CO_2 une matière première plutôt qu'un déchet. Cela modifie complètement les stratégies que nous pouvons envisager à court terme.

B. Rôle des cyanobactéries pour la dépollution des hydrocarbures

Les cyanobactéries ont la capacité de dégrader les hydrocarbures à la surface des océans, y compris ceux que nous utilisons pour nous protéger du soleil sous forme de crème. Les bactéries sont donc des outils pour dépolluer les océans (Figure 31).

Selon le MIT, les cyanobactéries produisent aussi 800 millions de tonnes d'hydrocarbures par an. Ainsi, le cycle du carbone, qui est le cycle de la vie, doit être révisité, étudié et encouragé du point de vue scientifique et

19. Micro-organisme de la famille des Méthanosarcinales.

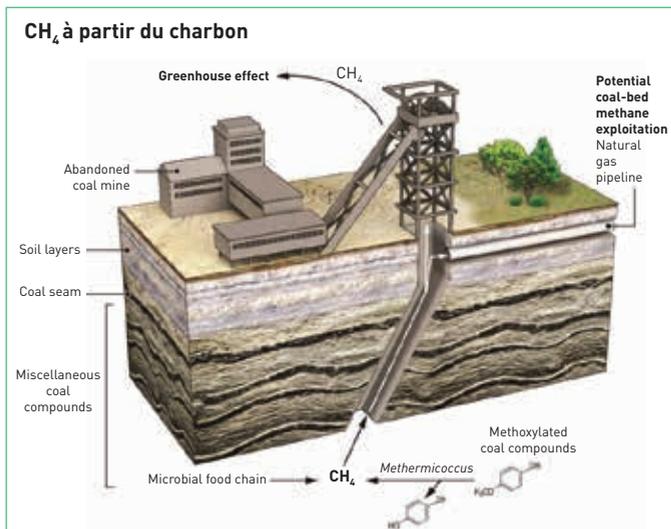


Figure 30

Production de méthane CH_4 à partir du charbon.

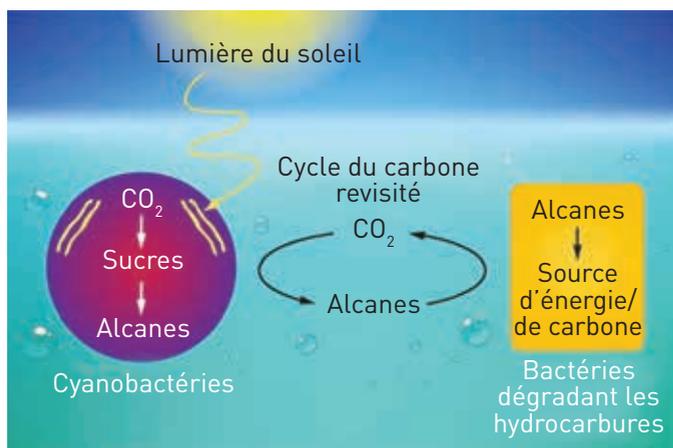


Figure 31

Les cyanobactéries peuvent dégrader les hydrocarbures : le cycle du CO_2 revisité.

politique, pour une compréhension autre que « le CO_2 est un toxique ».

C. Recyclage du CO_2 par les microalgues

La deuxième espèce intéressante à considérer est les microalgues. Rappelons que nous devons nourrir

l'ensemble des poissons, car la pisciculture représente les deux tiers de la consommation mondiale de poissons que nous pouvons nourrir avec des microalgues.

Par ailleurs, les microalgues, grâce à leurs caractéristiques modifiables par

traitement OGM²⁰, peuvent produire à partir du CO₂ des protéines ou des huiles. Cela peut se faire, soit dans des réacteurs « raceways²¹ »,

soit dans des photo-bioréacteurs (Figure 32). Ainsi, il est possible de fabriquer des protéines (Figure 33) pour les utiliser dans l'alimentation des poissons, de manière similaire à l'utilisation du maïs pour les poulets. Il existe donc plusieurs stratégies et idées à explorer.

20. Organisme génétiquement modifié.

21. Réacteurs type « bassins ouverts ».



Figure 32

À gauche, un « raceway » ; à droite, un photobioréacteur à microalgues.

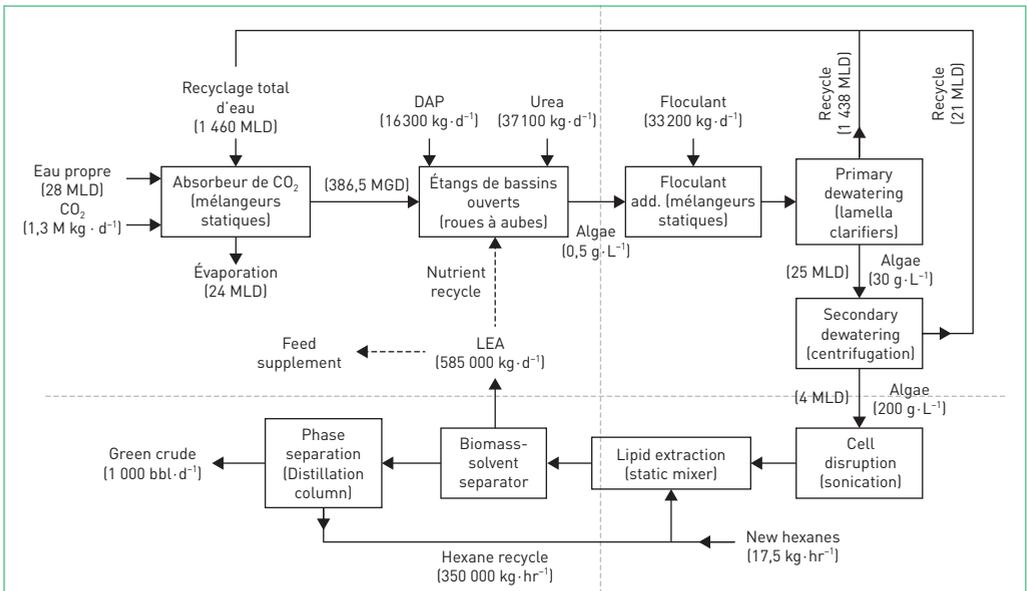


Figure 33

Procédé chimique d'extraction de protéines et d'huiles à partir des microalgues.



Figure 34

Bassins de microalgues du programme VASCO.

Un programme européen, développé à Fos-sur-Mer dans le cadre du programme VASCO, recycle les fumées de l'unité de pétrochimie de la région, associant 12 industriels. Ces fumées sont dirigées vers des bassins où des microalgues sont cultivées (Figure 34). La culture de ces microalgues démontre la possibilité d'obtenir 1 kilo de biohuile à partir de concentré, suggérant le début d'une commercialisation.

Condition essentielle : il faudra attribuer une valeur ajoutée aux émissions évitées, tout comme le font les agences de bassin pour l'eau en pénalisant tous ceux qui émettent de l'eau polluée. Actuellement, le cycle financier de la gestion des fumées n'est pas bouclé, ce qui explique les difficultés industrielles rencontrées pour établir un modèle économique.

Conclusion : le recyclage des terres rares du type lanthanides

En guise de conclusion, mettons en avant la créativité humaine avec l'exemple du recyclage des lanthanides. Un biologiste volcanologue, Arjan Pol, a eu la curiosité d'aller récupérer avec une louche de cuisine un peu de boue évoluant à la surface d'un bassin volcanique (Figure 35). Il y a mis en évidence la présence d'une bactérie, *Methylococcus*, produisant une protéine, la lanmoduline (Figure 36), qui piège les terres rares néodyme et dysprosium sur trois sites de sa structure



Figure 35

Arjan Pol récupérant la boue d'un bassin volcanique.

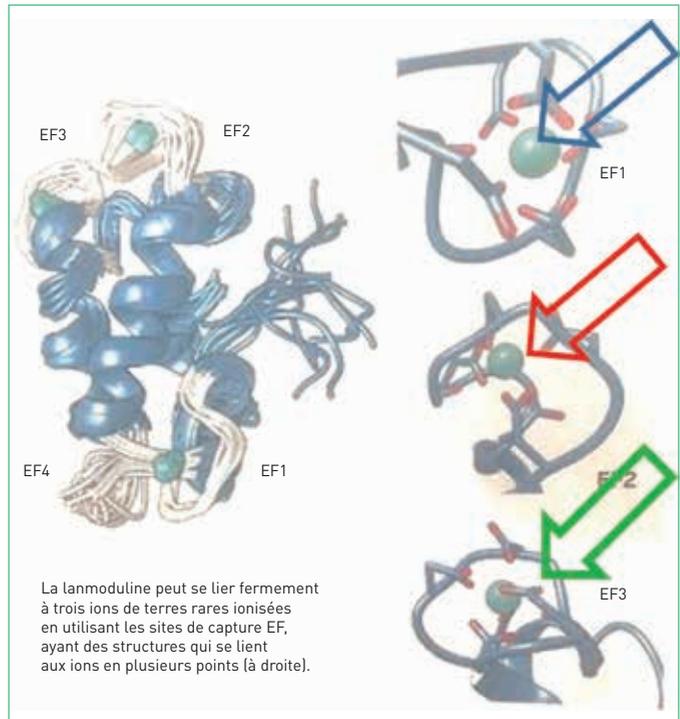


Figure 36

Structure de la lanmoduline et ses trois sites de capture.

moléculaire. Dans l'hypothèse où ces terres rares n'existent pas, la bactérie disparaît.

À partir de là, il a imaginé un système d'extraction liquide-liquide (Figure 37), qui n'est pas

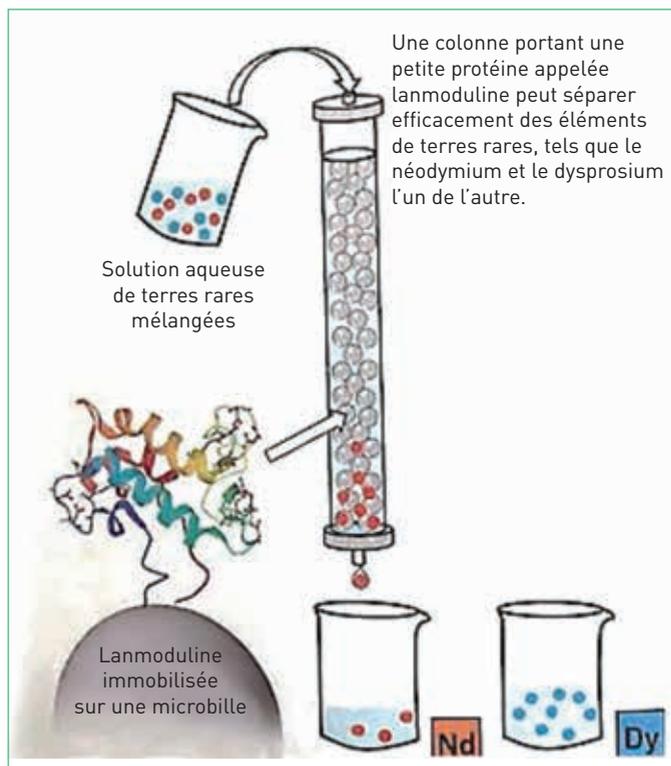


Figure 37

Extraction liquide-liquide par une colonne séparative grâce à la lanmoduline.

réalisable par des voies chimiques traditionnelles, pour récupérer quelques ppm de ces deux terres rares à partir d'un mélange issu d'un procédé de recyclage.

La conclusion est que l'avenir de la société repose entre les mains de ceux qui acceptent les défis. La science est notre bouclier, nous permettant d'imaginer le futur de notre civilisation. Comme le disait Einstein,

« *Imagination is more important than knowledge*²² », le futur est entre vos mains.

Merci de le créer.

22. L'imagination est plus importante que la connaissance.

Le recyclage des terres rares : une stratégie d'approvisionnement à la taille de leurs enjeux

Lama ITANI, Olivier LARCHER et Renaud ROHE

Lama Itani, Solvay, Rhodia Opérations, Terres Rares Business Line

Olivier Larcher, Solvay, Rhodia Opérations, Terres Rares Business Line

Renaud Rohe, Solvay, Rhodia Opérations, Terres Rares Business Line

1 Généralités sur les terres rares

Les terres rares (TR) sont les éléments chimiques du tableau périodique compris entre le lanthane et le lutétium (**Figure 1**). Elles se divisent en TR légères (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm) et TR lourdes (Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu). Par ailleurs, on considère le plus souvent l'yttrium comme faisant partie de la famille des terres rares. Ces éléments sont nommés « rares » en dépit d'une abondance naturelle proche de celle du nickel ou du cuivre. Cette appellation pourrait résulter du fait que les terres rares existent à

des concentrations très faibles dans les minerais et du fait qu'elles sont assez difficiles à extraire, séparer et purifier. Dans les minerais de terres rares, le rapport des teneurs entre les TR légères et les TR lourdes est en moyenne d'environ 98/2.

Les TR présentent une configuration électronique très particulière. La couche externe est bien souvent identique, ce qui explique leurs propriétés chimiques très similaires. En revanche, grâce à des orbitales « f » partiellement ou totalement remplies, les TR possèdent de nombreuses propriétés (magnétiques, redox, optiques et physiques)



Figure 1

Les terres rares ou lanthanides dans le tableau périodique.

Source : extrait de OD6 Metals Limited (<https://www.od6metals.com.au/rare-earths/rare-earths-rees.>)

qui les rendent uniques. Elles sont de ce fait irremplaçables dans différentes applications (Figure 2) telles que :

- La catalyse hétérogène :
 - Certaines terres rares, grâce à leurs propriétés redox, sont utilisées comme support pour optimiser l'activité du

catalyseur trois voies dans le contrôle des émissions automobiles.

- D'autres terres rares sont utilisées pour stabiliser les zéolithes, catalyseurs du craquage pétrolier.

- Le polissage :
 - L'oxyde de cérium est le matériau privilégié pour le polissage des couches minces de silicium des semi-conducteurs présents dans la majorité des équipements électroniques.

- L'oxyde de cérium est également utilisé comme poudre de polissage de certains verres de spécialités (verres optiques, électroniques, etc.)

- La luminescence :

Grâce à leurs propriétés optiques et leurs émissions, certaines terres rares sont indispensables comme luminophores (ou pigments luminescents) dans les écrans

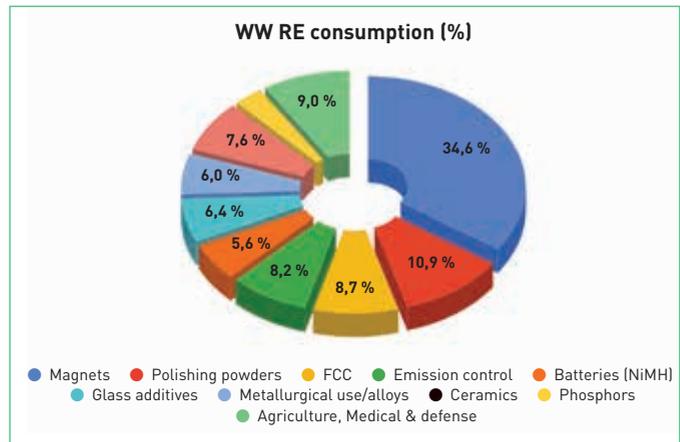


Figure 2

Les principales applications des terres rares¹.

1. 2019-08- IHS CEH Rare Earth Minerals & products.

plats, les appareils à rayons X ou certaines lampes.

- L'industrie du verre :

Les terres rares sont utilisées comme constituants du verre pour augmenter la brillance, l'indice de réfraction ou comme agents de coloration ou de décoloration.

- Les aimants permanents :

L'utilisation des terres rares dans les aimants permanents est détaillée dans le paragraphe 2.

2 Les aimants permanents

Un aimant est un matériau qui comprend une forte concentration d'atomes paramagnétiques. Un atome paramagnétique est un atome présentant des électrons non appariés. Un aimant permanent est un aimant qui conserve sa magnétisation une fois le champ magnétique externe supprimé.

Il existe actuellement quatre principales familles d'aimants permanents :

- Les aimants ferrites comme les ferrites de baryum ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ou de strontium ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$).
- Les aimants AlNiCo comprenant principalement les éléments aluminium, nickel et cobalt (ex. : $\text{Al}_7\text{Ni}_{14}\text{Co}_{24}\text{Cu}_3\text{Fe}_{51}$ et $\text{Al}_7\text{Ni}_{15}\text{Co}_{36}\text{Cu}_4\text{Ti}_6\text{Fe}_{32}$).
- Les aimants SmCo à base de terres rares notamment de samarium (ex. : SmCo_5 ou $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$).
- Les aimants NdFeB à base de terres rares notamment de néodyme (ex. : $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Il est important de noter que, pour des raisons de limitation de

coût, très souvent, dans ces aimants, le néodyme (Nd) est remplacé par du didyme qui est un mélange de Nd et de praséodyme (Pr) dans un ratio tel que naturellement extrait des minerais (Nd/Pr = 75/25 à 80/20 en fraction massique relative exprimées en oxyde). Il est également important de noter que pour les applications qui nécessitent une bonne stabilité thermique (conservation du pouvoir magnétique à haute température), les aimants NdFeB sont dopés avec du terbium (Tb) et du dysprosium (Dy).

La performance d'un aimant permanent est principalement mesurée par¹ :

- 1) Sa rémanence (Br) : la rémanence est le champ magnétique généré par l'aimant. Plus la rémanence est élevée, plus l'aimant est puissant.
- 2) Sa densité énergétique (BHmax) : la densité énergétique est le pouvoir d'aimantation par unité de volume ou par unité de masse. Elle est proportionnelle à la rémanence.
- 3) Sa coercivité (Hc) : la coercivité est la force magnétique nécessaire pour annuler l'aimantation d'un aimant. Plus la coercivité est élevée, plus l'aimantation est stable.
- 4) Sa température maximale d'utilisation (Tmax) : l'exposition d'un aimant permanent à des températures élevées dans son application entraîne une baisse de sa rémanence et de sa coercivité avec le temps. La température maximale d'utilisation est la température

1. *Techniques de l'ingénieur, Aimants Permanents – Matériaux et Propriétés. Ref: D2100V2.*

à laquelle l'aimant peut être utilisé sans que la perte de coercivité et de rémanence impacte sa performance dans une application donnée.

Grâce aux propriétés magnétiques des terres rares préablement citées (Nd, Pr, Tb, Dy et Sm), les aimants permanents à base de TR sont les plus performants en termes de rémanence, coercivité et densité énergétique (*Figure 3*). Ainsi, pour obtenir la même densité énergétique, il est nécessaire d'utiliser approximativement dix fois plus de volume ou de masse d'aimant ferrite que d'aimant NdFeB.

Leur densité énergétique sans équivalent rend l'utilisation des aimants permanents à base

de terres rares indispensable lorsqu'une forte puissance magnétique doit être couplée à une minimisation du poids ou du volume d'aimants.

C'est pourquoi les aimants permanents à base de terres rares sont essentiels pour de nombreuses applications comme les moteurs électriques (véhicules électriques ou éoliennes), les pompes, les compresseurs, les climatiseurs et les équipements électroniques et robotiques. Actuellement, 70 à 80 % des véhicules électriques et 100 % des éoliennes « off-shore » fonctionnent grâce aux aimants à TR.

3 Approvisionnement des terres rares et rôle de Solvay

Comme expliqué ci-dessus, plusieurs développements technologiques stratégiques, tels que les véhicules électriques ou les éoliennes, nécessitent l'utilisation d'aimants permanents de plus en plus puissants, en quantités de plus en plus importantes. Plusieurs études^{2,3,4} projettent un besoin mondial et en Europe en terres rares (notamment Nd et Pr) multiplié par quatre entre 2020 et 2030 (*Figure 4*).

À ce jour, l'Europe n'extrait pas de terres rares en dépit des gisements identifiés en Europe du Nord (Norvège, Suède...). La Chine concentre à elle seule

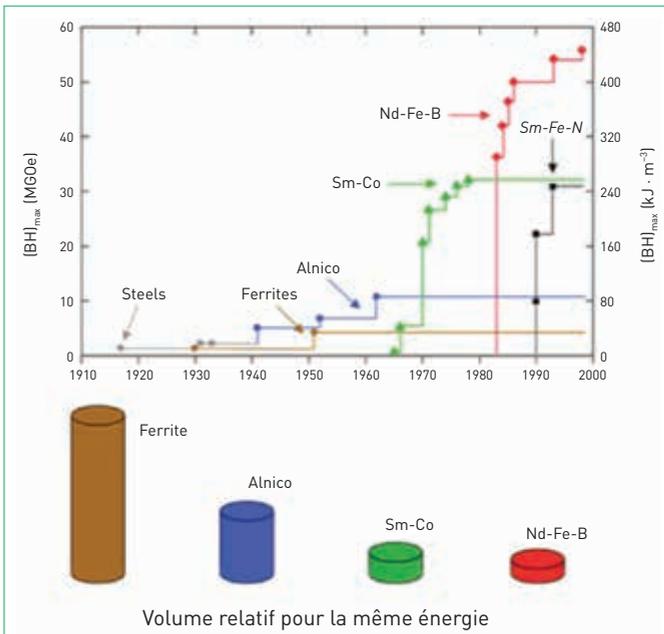


Figure 3

Propriétés des quatre principales familles d'aimants permanents (BH_{max} = pouvoir d'aimantation par unité de volume. $1 \text{ MGOe} = 7,958 \text{ kJ/m}^3$).

<https://www.sdmmagnetic.com/2020/11/27/grain-boundary-diffusion-process/>

2. Global rare earths strategic planning outlook to 2050, Wood Mackenzie.

3. Rare Earths analytics, Argus 2023.

4. RE permanent magnets supply chain Deep Dive Assessment - US DOE.

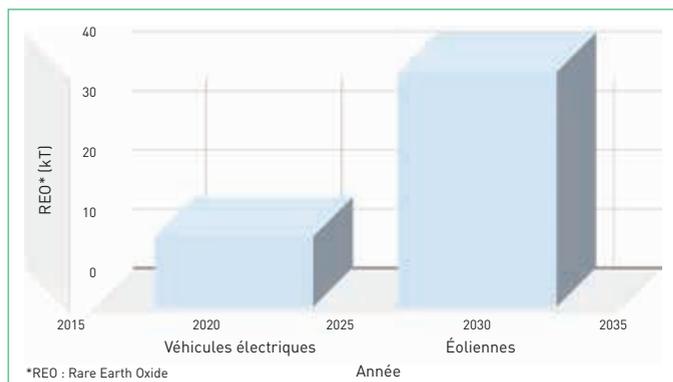


Figure 4

Demande globale en terres rares pour les véhicules électriques et éoliennes.

60 % de l'extraction minière des terres rares, 85 % de leur séparation/purification et 98 % de la fabrication d'aimants en contenant (Figure 5).

Comme bien expliqué dans l'article de Y. Shen *et al.*⁵, la Chine a instauré des quotas d'exportation dès 1999 pour lutter contre la production et l'exportation illégale des

terres rares. La diminution de ces quotas en 2010 a provoqué une très forte augmentation des prix, communément appelée « crise des terres rares ». Suite à une plainte à l'OMC, la Chine a été contrainte de les suspendre en 2015. Cependant, la persistance des quotas de séparation a provoqué la concentration forcée des entreprises autorisées à séparer les terres rares en Chine. De ce fait, le marché intérieur chinois continue à

5. *Mineral Economics* (2020) 33:127-151. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00214-2>.

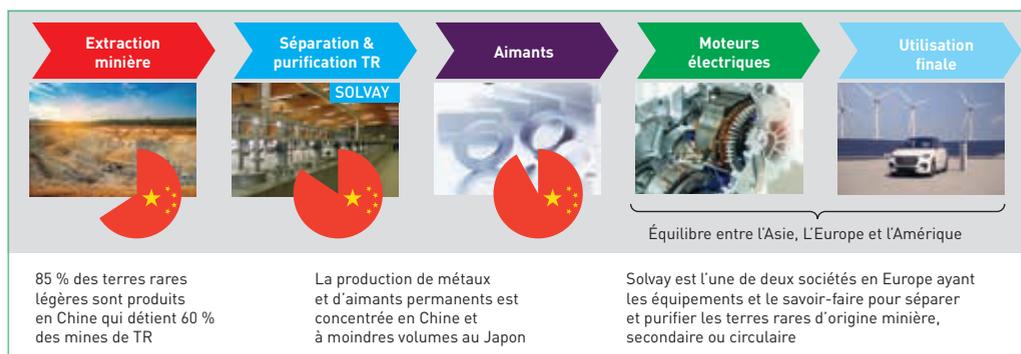


Figure 5

Chaîne de valeur et d'approvisionnement des aimants permanents. La Chine contrôle 60 % des mines de terres rares mondiales (illustration créée par Solvay).

dicter les prix internationaux. Ainsi, courant 2021, les prix des éléments Nd, Pr, Tb et Dy ont connu une forte augmentation qui s'explique par la reprise de la demande mondiale post-Covid début 2021, puis par l'introduction par la Chine de plusieurs mesures réglementaires.

En conséquence, la Commission européenne a classé les terres rares lourdes et légères à la deuxième place dans la liste des matières premières critiques pour les technologies clés européennes⁶.

Solvay a au cœur de sa vision et de sa stratégie le développement de solutions durables pour accompagner la transition énergétique, la mobilité verte et lutter contre le réchauffement climatique.

L'usine de La Rochelle a une expertise reconnue dans la séparation et la purification des terres rares et la fabrication de produits de haute technologie. Créée en 1948, elle emploie plus de 300 collaborateurs et produit des milliers de tonnes de produits à base de terres rares pour les marchés de la catalyse automobile, du polissage et de l'électronique. C'est la seule usine hors de Chine ayant, à ce jour⁷, l'expertise pour réaliser industriellement toutes les séparations. Ses capacités ont notamment été utilisées dans les années quatre-vingt, puis entre 2012 et 2016 pour

l'activité de séparations des TR lourdes issues du recyclage des luminophores. Elles servent aujourd'hui majoritairement à séparer et purifier les TR avant leur transformation en produits complexes. Fort de ses décennies d'expertise, Solvay a lancé en 2022 un projet d'investissement à La Rochelle afin d'entrer dans la chaîne de valeur des aimants permanents à base de terres rares en Europe visant à produire, en France, les terres rares purifiées, nécessaires aux marchés des aimants permanents, de l'hydrogène, de l'électronique et du médical (Figures 6 et 7).

Un des objectifs de ce projet est de sécuriser l'accès à ces TR.

Pour cela, la stratégie de Solvay est basée sur deux principes complémentaires :

- Le développement de partenariats avec des mines hors Chine pour s'approvisionner en TR d'une façon durable et responsable. Cet approvisionnement hors Chine contribue à la politique européenne de regain de la souveraineté de l'Europe vis-à-vis de l'accès aux matériaux critiques et stratégiques. Dans ce cadre, nos partenaires sont sélectionnés selon des critères exigeants de durabilité économique, environnementale et sociétale incluant un niveau de maturité conforme aux standards du développement durable de l'industrie, l'adhésion au Code d'intégrité des affaires des fournisseurs du Groupe Solvay, une fourniture responsable exempte des « minerais de conflits », la mesure de l'impact carbone de la matière première dans le

6. CRM web page: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en.

7. Rapport n° 617 (2015-2016) du Sénat.



Figure 6

Solvay dans le domaine des terres rares (Illustration créée par Solvay).

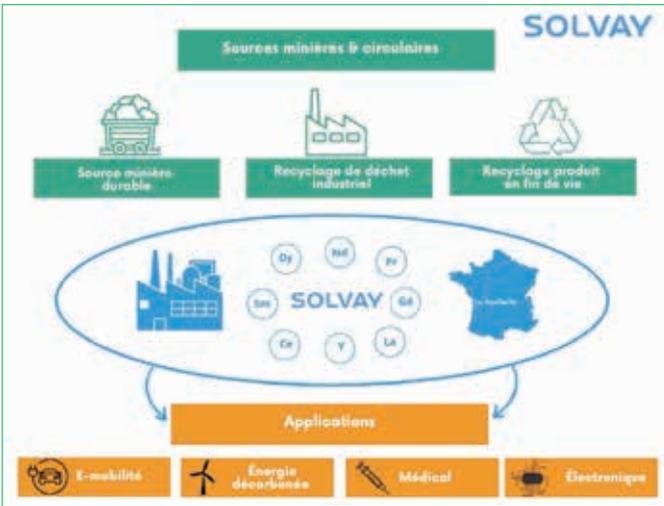


Figure 7

Mobilisation de l'expérience de Solvay La Rochelle dans le domaine des terres rares pour servir les marchés stratégiques de la mobilité électrique, l'énergie verte et la digitalisation, les applications en imagerie médicale par résonance magnétique (IRM) (Illustration créée par Solvay).

cycle de vie du produit final et le cas échéant l'engagement d'actions d'amélioration de l'empreinte environnementale des matières premières et réactifs.

- Le recyclage des aimants issus des équipements en fin de vie ou des déchets de production ; les mines urbaines

dont l'exploitation contribuera à la préservation des ressources naturelles et le développement d'une économie circulaire.

La suite de ce rapport se focalise sur le recyclage des TR et en particulier des TR issues des aimants permanents.

4 Le recyclage des terres rares

4.1. Les sources de recyclage des terres rares

Les flux pour le recyclage des terres rares se trouvent majoritairement dans deux catégories de déchets (*Figure 8*) :

- **Les déchets industriels** : ces déchets comprennent les déchets miniers contenant des terres rares, les déchets de fabrication des aimants permanents et les déchets de fabrication des équipements qui contiennent des terres rares.
- **Les équipements en fin de vie** : il s'agit en particulier des aimants permanents en fin de vie.

D'après une étude réalisée par le CEPS pour la Commission européenne à l'origine du *Critical Raw Materials Act*⁸ (*Figure 9*), les aimants à base de terres rares sont actuellement présents principalement

8. CRM web page : https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en.

dans les déchets électroniques mais aussi dans les véhicules thermiques en fin de vie (hauts-parleurs et accessoires électroniques). Dans quelques dizaines d'années, seront disponibles les aimants permanents des moteurs des véhicules électriques en fin de vie. Et plus tard, pourra être envisagé le recyclage des aimants des moteurs d'éoliennes. Ceci est en complément du recyclage des déchets de production.

Selon cette même étude, en termes de volumes, le flux de recyclage ne représente, à ce jour, que 10 % du besoin européen. Il est ainsi important, comme mentionné précédemment, de développer plusieurs stratégies :

- l'extraction minière responsable et indépendante ;
- le recyclage des aimants permanents qui devrait constituer une solution évidente lorsque les volumes du flux de recyclage deviennent importants ;
- l'innovation et le développement de technologies avec moins de terres rares ou exemptes de terres rares.

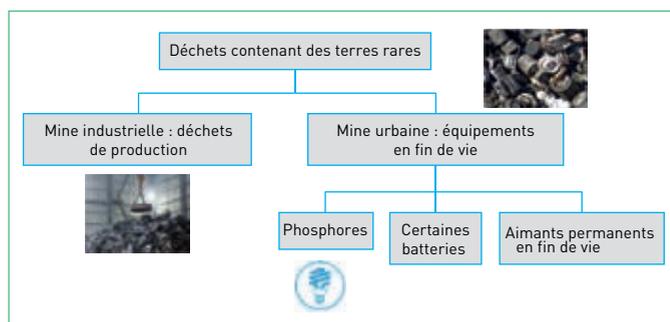


Figure 8

Sources de terres rares pour le recyclage (Illustration créée par Solvay).

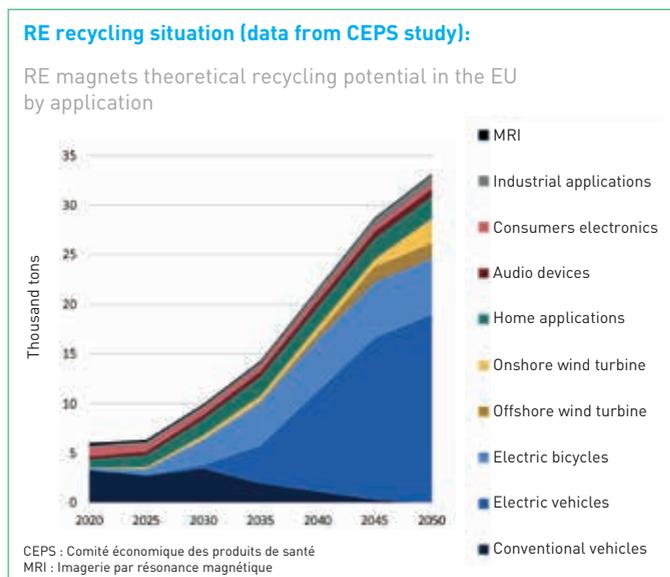


Figure 9

Répartition par application et par année du potentiel flux de recyclage des aimants permanents en Europe*.

* CEPS In Depth Analysis - Developing A Supply Chain for Recycled Rare Earth Permanent Magnets in the EU: Challenges and Opportunities. Vasileios Rizos, Edoardo Righetti, Amin Kassab December, 2022 - 07.

4.2. Les procédés de recyclage des aimants permanents à base de terres rares^{9,10,11}

Il existe deux procédés pour recycler les aimants permanents en fin de vie ou les déchets de production des aimants (Figure 10).

- Le procédé dit « **recyclage direct ou boucle courte** » qui consiste à broyer l'aimant et à réinjecter la poudre d'aimant au niveau des étapes de fabrication des aimants (soit au

niveau de la préparation d'un nouvel alliage par *strip-casting*, soit au niveau du façonnage d'un nouvel aimant).

D'une part, le principal avantage du recyclage direct serait un impact environnemental moindre étant donné que ce dernier présente moins d'étapes de procédés et consomme moins de réactifs chimiques. D'autre part, les principaux inconvénients seraient :

(i) peu de tolérance et de versatilité envers le contenu des déchets ou des aimants à recycler en termes de teneur en impuretés ou de nature de terres rares ;

(ii) le recyclage direct ne permet pas systématiquement d'atteindre les mêmes performances d'aimants qu'avec des sources primaires surtout si les déchets ou aimants à recycler sont dans un état d'oxydation avancé.

9. Saito et al. The extraction of Nd from waste Nd-Fe-B alloys by the glass slag method. *J Alloy Compd* 353:189-193 (2003).

10. Saito et al. Extraction of Sm from Sm-Fe alloys by the glass slag method. *J Alloy Compd* 387:274-278 (2005).

11. Takeda et al. Recovery of neodymium from a mixture of magnet scrap and other scrap. *J Alloy Compd* 408-412:387-390 (2006).

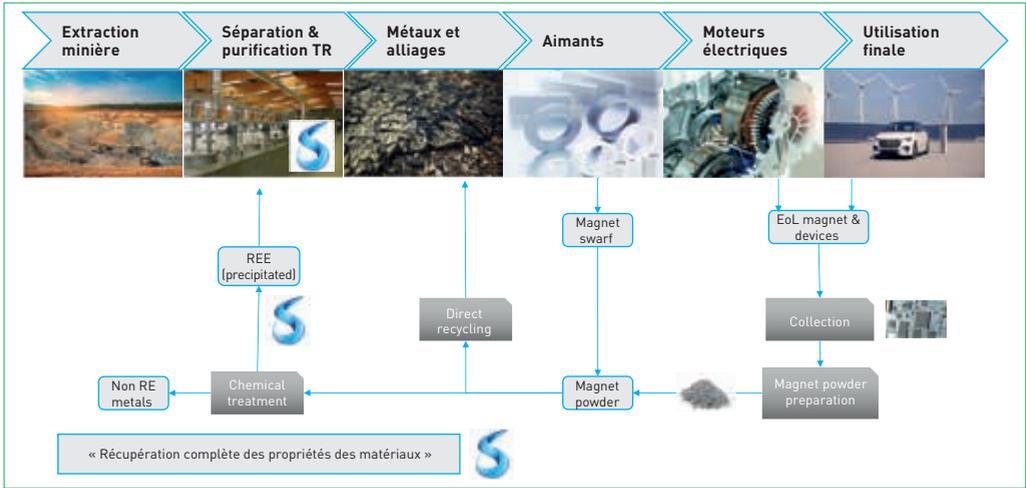


Figure 10

Les déchets contenant des terres rares à recycler sont d'abord convertis en « poudre d'aimant » (flèches bleues du haut vers le bas de la figure). Cette poudre d'aimant peut être récupérée directement (direct recycling schématisé par une flèche allant du bas vers le haut) ; c'est le schéma de la boucle courte. Elle peut aussi être conduite vers une opération chimique (chemical recycling) préalable dans le schéma de boucle longue (Illustration créée par Solvay).

- Le deuxième procédé dit « boucle longue » (Figure 11) consiste à extraire sélectivement de la poudre d'aimant les terres rares présentes sous forme d'un mélange d'oxydes, d'oxalates, de sulfates doubles

ou autres. Cette extraction pourrait se réaliser :

- soit par pyrométallurgie où la poudre d'aimants est chauffée à des températures très élevées (jusqu'à 800-2 000 °C) en présence d'agents d'alliage (Mg) ou d'agents de scorification (B, Ca) pour extraire les terres rares sous forme d'alliage (Mg-Nd) ou de scories. Les alliages ou les scories sont par la suite dissous, souvent en milieu acide, pour extraire les terres rares ;
- soit par hydrométallurgie qui consiste à dissoudre la poudre d'aimants dans un milieu très acide ou très basique.

Dans les deux cas, les terres rares sont ensuite sélectivement précipitées sous forme d'un mélange d'oxydes, d'oxalates, de sulfates doubles ou autres. Le mélange de terres rares ainsi obtenu est ensuite séparé et purifié par extraction

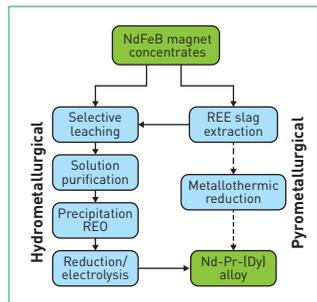


Figure 11

Étapes de recyclage des aimants permanents selon une boucle longue.

Source : J. Sustain. Metall., 2017, 3:122–149

liquide-liquide afin d'obtenir des terres rares individuelles et pures, rendues à l'état initial des matières premières primaires pour être utilisées dans la fabrication de nouveaux aimants permanents. Ainsi l'avantage premier de ce procédé réside dans le fait que tout type d'aimant en fin de vie peut être recyclé quels que soient son état d'oxydation, sa teneur en impuretés ou sa composition en terres rares. De plus, ce procédé permet de garantir que l'aimant produit à partir de ces terres rares recyclées sera aussi

performant que celui produit à partir de terres rares primaires. En revanche, comparé au recyclage direct, le procédé de recyclage par boucle longue comporte plus d'étapes et consomme plus de réactifs.

Le principe et les étapes d'attaque et de séparation du procédé de recyclage par la boucle longue sont proches de ceux de l'extraction des minerais de terres rares. Se focalisant sur son expertise et son savoir-faire, Solvay intègre le recyclage des aimants par la boucle longue dans son projet.

Conclusion

Les terres rares sont des éléments utilisés dans la fabrication de certains aimants permanents. Ces derniers sont des composants essentiels des moteurs électriques, ce qui les rend indispensables dans certaines applications telles que les véhicules électriques, les éoliennes, les moteurs industriels, la robotique et l'électronique.

L'accès aux terres rares pour l'Europe est contrôlé par la Chine qui concentre la majorité des minerais exploités ainsi que les étapes de séparation, purification et fabrication des aimants. Tenant compte de l'importance de ces éléments pour les objectifs européens de transition énergétique, d'électrification et de digitalisation, l'Europe soutient une stratégie d'approvisionnement diversifiée, indépendante de la Chine et intégrant l'économie circulaire via le recyclage des aimants permanents. Solvay, leader mondial dans la fabrication de produits de spécialité à base des terres rares pour les marchés automobile, électronique et autres, contribuera à cette stratégie.

En effet, Solvay exécute depuis un an et demi un projet qui met à disposition l'expertise et l'histoire de Solvay dans la séparation et la purification des concentrés de terres rares pour produire les matières premières (oxydes) nécessaires à la fabrication des aimants permanents. Pour accéder aux sources des terres rares qui seront séparées, purifiées et formulées dans son usine située à La Rochelle en France, Solvay :

- développe des partenariats avec des mines hors Chine pour s'approvisionner en TR d'une façon durable et responsable ;
- intègre le recyclage des aimants issus des déchets de production ou des équipements en fin de vie via un procédé appelé boucle longue de recyclage.

Ce dernier procédé de recyclage consiste à extraire sélectivement les terres rares de la poudre d'aimant. Cette extraction pourrait se réaliser, soit par un traitement thermique à haute température (pyrométallurgie), soit par un traitement chimique (hydrométallurgie). Dans les deux cas, les terres rares sont ensuite sélectivement précipitées sous forme d'un mélange d'oxydes, d'oxalates, de sulfates doubles ou autres. Le mélange de terres rares ainsi obtenu est ensuite séparé et purifié par extraction liquide-liquide afin d'obtenir des terres rares individuelles et pures, rendues à l'état initial des matières premières primaires pour être utilisées dans la fabrication de nouveaux aimants permanents.

Solvay démarrera la production des oxydes de terres rares pour les marchés des aimants permanents en 2025. À maturité, plusieurs milliers de tonnes d'oxydes de NdPr, Dy et Tb seront produites, contribuant à une part significative du besoin européen futur.

L'hydrométallurgie au service du recyclage des batteries de véhicules électriques

Pascal Muller, Directeur, Pôle Hauts de France et Grand Est, Sarpis Veolia (*Figure 1*).

1 Les métaux, une nouvelle ressource stratégique dans notre société

1.1. Une explosion de la demande en métaux

A. Les batteries, une petite partie des déchets métalliques mais en forte croissance

Les batteries de véhicules électriques et les déchets qu'ils induisent contiennent des métaux ainsi que d'autres matériaux minéraux : plastiques, solvants, carbone. D'autres typologies de déchets contiennent également des éléments métalliques et font

l'objet de travaux et de procédés de récupération. Dans cette partie, nous allons nous focaliser sur le traitement, le recyclage et la récupération des métaux contenus dans les batteries en fin de vie (*Figure 2*).

Une grande partie des activités industrielles utilisent des métaux et sont donc productrices de déchets métalliques (voir par exemple le chapitre « Tri et valorisation de mâchefer¹ d'incinération d'or-

1. Mâchefer : matériaux incombustibles résiduels après l'incinération du charbon ou des ordures ménagères.

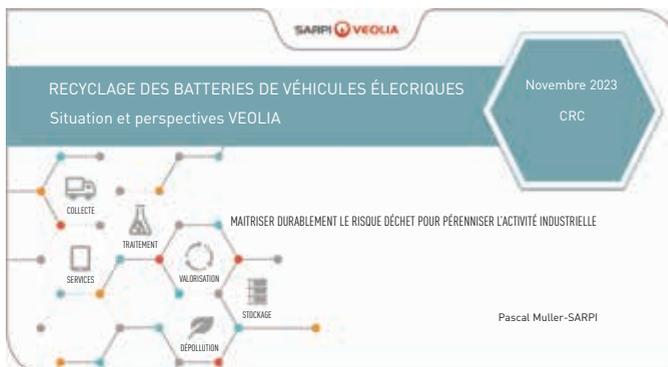


Figure 1

Le cycle de vie des batteries électriques et l'action de Veolia sur le recyclage.



Figure 2

Les métaux issus de divers déchets, une ressource précieuse à valoriser.

dures ménagères », d'Hervé Antonsanti). Ces métaux proviennent souvent des objets du quotidien. On en a cité ici quelques-uns pour souligner que dans ces déchets se trouvent des terres rares², des métaux stratégiques et divers

2. Terres rares : 17 éléments chimiques font partie des « terres rares », ainsi désignées à cause de leur faible concentration dans la croûte terrestre qui rend donc leur extraction difficile.

autres éléments qu'il convient de récupérer et de recycler.

B. Au cœur des évolutions technologiques, l'emploi des métaux

Lorsqu'on parle de « dématérialisation de l'économie », ou de « mobilité électrique », il est important de réaliser que derrière ces termes se cachent des équipements qui contiennent des métaux (Figure 3).

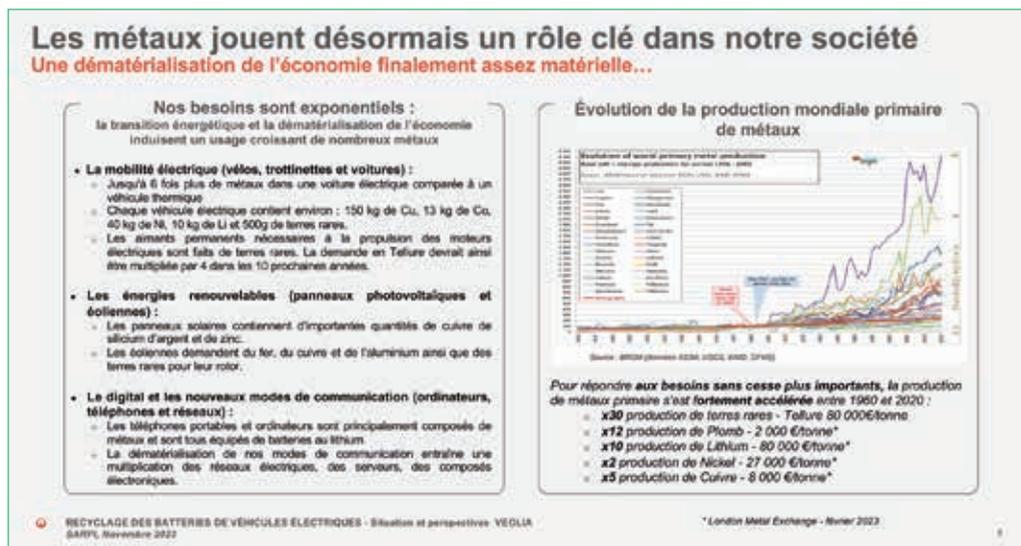


Figure 3

Explosion de la demande en métaux accompagnant la transition énergétique et numérique.

Sans regarder le détail de chacune des courbes de la **Figure 3**, on perçoit les enjeux auxquels il faut faire face aujourd'hui en termes de besoins en métaux. De la mobilité électrique : voitures électriques, vélos électriques, trottinettes, jusqu'aux téléphones portables et ordinateurs, les nouveaux équipements regorgent de métaux, en particulier des métaux dits stratégiques.

Quand on parle d'énergie renouvelable, on parle de panneaux photovoltaïques ou d'éolien et donc de métaux. Lorsque l'on parle de dématérialisation ou de digital, on sous-entend des serveurs, des câbles pour transporter l'énergie ou pour transporter les données, des ordinateurs ou des téléphones portables. Et là encore, on parle de métaux. L'évolution sur les 60 dernières années (depuis 1960),

fait ressortir une véritable « explosion » de la production de métaux dans le monde (**Figure 3**, à droite). Les terres rares donnent la courbe la plus parlante [la courbe violette de la figure 3], avec une production multipliée par 30 ! D'autres éléments ont connu une croissance significative. Ainsi, la production de lithium ou de nickel, éléments présents dans les batteries, a été multipliée par 10 pour le lithium, et par 2 pour le nickel et 5 fois plus pour le cuivre, qui est abondamment utilisé dans toutes les applications qui concernent l'électronique, l'électricité, la mobilité.

1.2. Répartition de la production

La **Figure 4** donne des informations sur l'origine géographique de la production

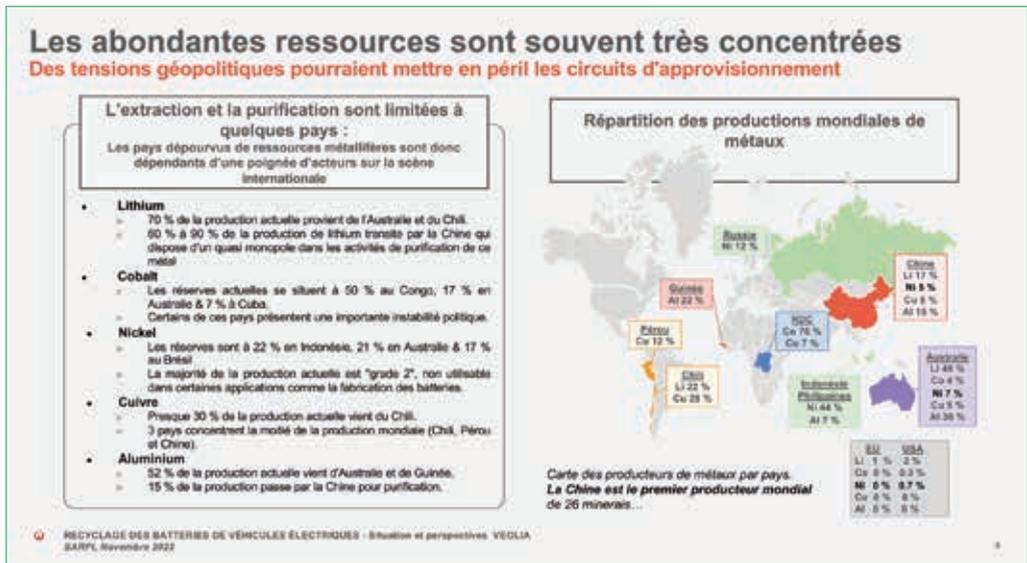


Figure 4

Les enjeux de l'approvisionnement en métaux stratégiques pour l'Europe.

des métaux. On savait qu'en France, on n'avait pas de pétrole. La question c'est : avons-nous des métaux ? La réponse est plutôt négative. En réalité, quand on regarde la répartition de la production (Figure 4) qui concerne non pas les gisements, mais la production mondiale de métaux, on constate que ces métaux sont majoritairement dans les régions non européennes, assez peu en Europe du Nord. La Chine apparaît comme l'un des producteurs importants de métaux, non pas parce que ces métaux en proviennent mais parce qu'ils y sont transformés. Ainsi, l'essentiel du lithium transformé pour obtenir le lithium utilisable dans les batteries l'est en Chine.

Pour les métaux, comme le cobalt, qui sont très présents dans les téléphones ou les ordinateurs portables, l'essentiel de la production et des gisements sont localisés au Congo. En termes de production des matériaux bruts,

donc de minerais ou de sels de lithium, c'est l'Amérique du Sud (le Chili, l'Argentine) qui domine, vient ensuite l'Australie. La Russie possède quant à elle des gisements significatifs de nickel. Une grande partie de ces pays ou de ces zones ne sont pas particulièrement de grandes démocraties et présentent des stabilités politiques discutables. Les enjeux géostratégiques liés à l'approvisionnement de tous ces métaux seront extrêmement prégnants dans les années à venir.

2 Les batteries de véhicules électriques

2.1. Composition d'une batterie

Une batterie pour automobile, c'est un objet de 300 kg (Figure 5). Plus exactement, c'était la base il y a quelques années lorsque l'objectif des producteurs de véhicules électriques était de faire un petit véhicule avec une autonomie de

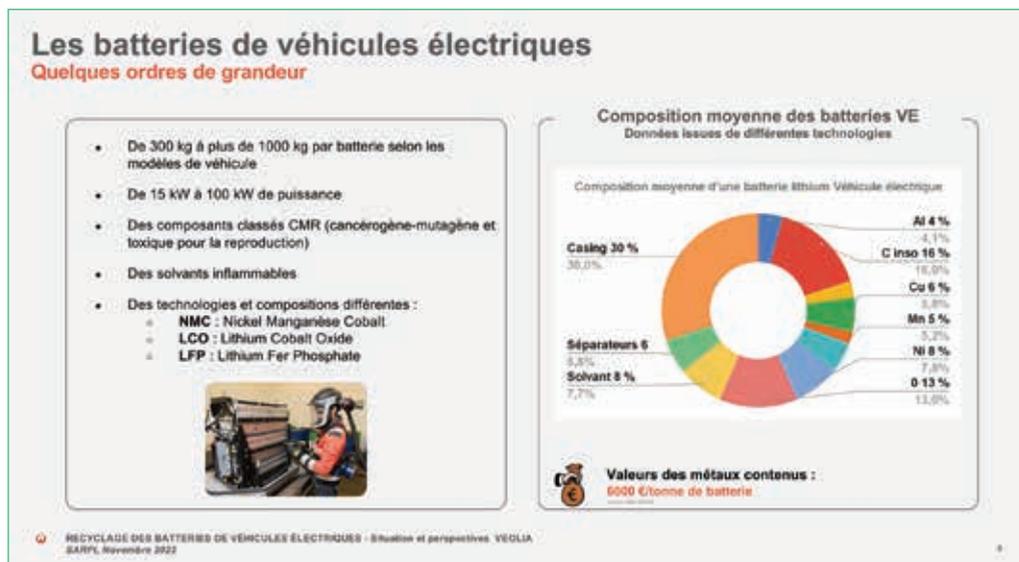


Figure 5

Composition d'une batterie de voiture électrique.

250 km voire 150 km, capable de répondre aux besoins du commun des mortels, c'est-à-dire entre 25 à 30 km par jour en excluant les grandes migrations de l'été.

En réalité, les évolutions réglementaires et les changements des besoins des utilisateurs ont poussé les constructeurs à produire des véhicules avec une autonomie de plus de 400 à 500 km et donc des batteries avec des puissances de 70 à plus de 100 kW qui pèsent entre 500 et 600 kg. Pour les bus électriques, on atteint des poids de 1 tonne à 1,5 tonne.

2.2. Une valeur extrêmement fluctuante

A. Des technologies s'appuyant sur des compositions différentes

Les batteries de véhicules électriques possèdent de fait de très bonnes performances et des capacités énergétiques significatives. Comme souvent

on obtient ces hauts niveaux technologiques, en faisant appel à des mélanges d'une grande complexité chimique. Sur la **Figure 5**, à gauche, sont indiquées quelques technologies par sigles (NMC, LCO, LFP), mais ils ne résument que des métaux majoritaires concernés. Dans les véhicules électriques, nous trouvons majoritairement des technologies NMC (nickel-manganèse-cobalt). Dans les téléphones portables, majoritairement des technologies LCO (lithium-cobalt-oxyde).

D'autres technologies sont également présentes sur le marché, comme la technologie lithium-fer-phosphate qui a l'avantage d'être beaucoup moins chère puisqu'elle ne contient pas de métaux coûteux comme le cobalt ou le nickel. Le cobalt, avec des variabilités très importantes sur un marché très fluctuant, vaut aujourd'hui entre 25 000 à 30 000 euros la tonne, il en valait 80 000 il y a 1 an. Le lithium vaut à peu

près 80 000 euros la tonne, il en valait 250 000 il y a 6 mois.

B. Composition moyenne pour un véhicule électrique

La **Figure 5**, à droite, donne une composition (pourcentages en masses) moyenne en métaux pour les batteries de véhicules électriques : 2 % de lithium, 3 % de cobalt (non indiqués sur la figure), 8 % de nickel, 5 % de manganèse. On trouve également des terres rares qui sont présentes dans l'électronique de la batterie. Par ailleurs, les batteries contiennent des solvants, donc des chaînes carbonées, et du graphite.

La valeur des métaux contenus dans une tonne de batterie sur la période de novembre 2023 est de 6 000 euros la tonne. Avec les variabilités indiquées

précédemment, on était plutôt de 10 000 à 12 000 six mois auparavant.

2.3. La demande et la production en Europe

A. Une demande plus forte que prévue pour les véhicules électriques

Il demeure très difficile de faire des projections de vente de véhicules électriques mais les tendances sont là ! Il y a une quinzaine d'années, Carlos Ghosn prédisait que 10 % du volume total de la production automobile à l'horizon 2020 serait électrique. Aujourd'hui, en Europe (2023), il s'agit plutôt de 15 %. La **Figure 6** représente (en vert clair) la courbe de mise sur le marché

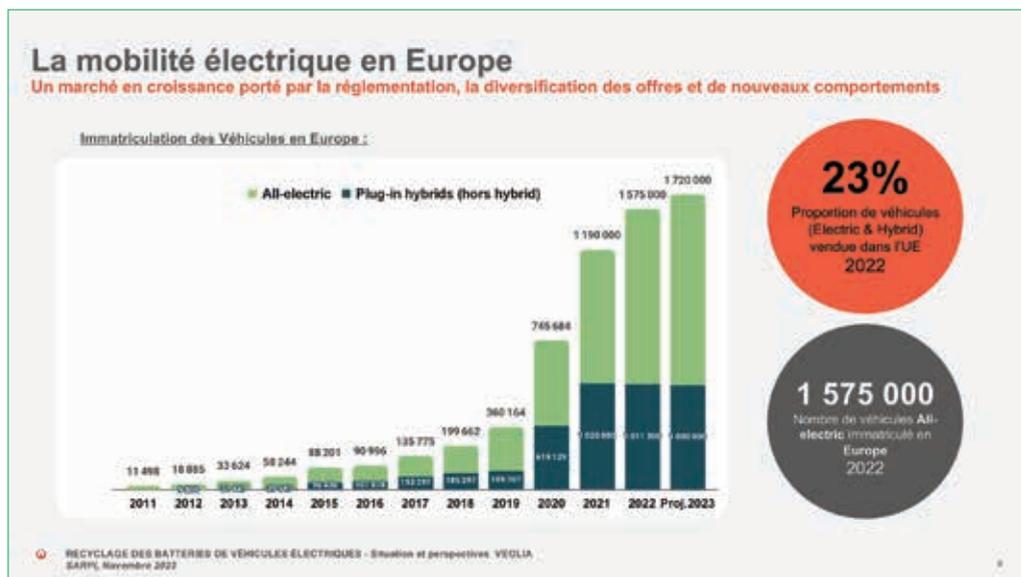


Figure 6

Déploiement de la mobilité électrique en Europe depuis l'année 2011. On note une forte accélération à partir de 2020 pour l'ensemble des véhicules électriques, portée en particulier par la technologie des véhicules hybrides (mixtes électriques/thermiques). Le taux de pénétration de l'électrique atteint 23 %, plus élevé qu'on ne le prévoyait il y a dix ans.

en Europe des véhicules tout électriques, et des véhicules hybrides (c'est-à-dire des véhicules qui ont une batterie à l'intérieur qui en général fait entre 50 et 70 kg), à la différence d'un véhicule tout électrique qui ne fonctionne qu'à l'électricité et a plutôt une batterie de 300 à 600 kg. Le taux de pénétration du véhicule électrique total (hybride et électrique) est d'environ 23 %. **C'est très significatif et beaucoup plus rapide que ce qui avait été envisagé.**

Globalement en Europe, c'est 1,5 million de véhicules tout électriques qui ont été vendus en 2022, et la tendance 2023 sera à peu près supérieure de 200 000. C'est plus de 600 000 tonnes de batteries mises sur le marché en 2023 qu'il faudra recycler dans les années à venir.

B. Vers une production européenne de batteries

Pour évaluer la quantité de déchets liés aux voitures électriques à traiter (Figure 7), il faut tenir compte des usines qui sont en train de s'implanter aujourd'hui en Europe : en Allemagne, dans le nord de la France, c'est le cas par exemple avec ACC, Verkor ou encore Envision, dans le nord de l'Europe en Suède et celles déjà présentes en Hongrie ou en Pologne pour ne citer que ces pays. Toutes ces usines sont ce que l'on appelle des gigafactories³.

Ces usines de production génèrent des déchets. Ces déchets sont des rebuts générés durant le processus de production des batteries qui se révèlent non conformes au

3. Usines géantes.

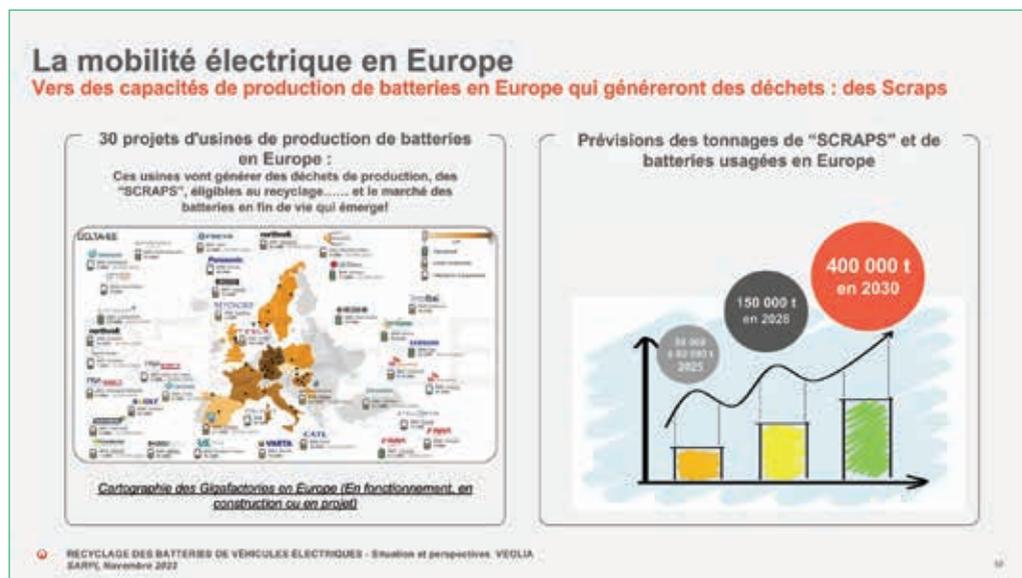


Figure 7

Le marché de la production et du recyclage de batteries en Europe. Prévision de l'accroissement de la production de batteries et de la génération de déchets associés en Europe.

standard qualité requis et ne peuvent donc être mis sur le marché. Cela peut représenter jusqu'à 10 % de la production. Les simulations de prévision présentées sur la **Figure 7**, à droite, sont basées sur ces estimations. Ainsi, en 2025, ces projections indiquent qu'il faudra recycler entre 50 000 et 80 000 tonnes de batteries en fin de vie et de résidus de production et jusqu'à 400 000 tonnes en 2030.

2.4. Une contrainte légale sur le recyclage

A. Des directives européennes de recyclage des déchets...

Pour répondre aux enjeux environnementaux et à la raréfaction de certaines ressources naturelles, L'Europe s'est dotée d'un cadre

réglementaire ambitieux. Une directive européenne a été mise en place et impose une obligation de recyclage stimulant le développement de filières de recyclage. Pour les batteries de véhicules électriques en fin de vie, il sera obligatoire de recycler 65 % de la masse globale de la batterie. À cela s'ajoute la nécessité d'inventorier en détail les métaux stratégiques contenus dans les déchets et de garantir des taux de recyclage par type de métal extrêmement ambitieux pour le nickel, le cobalt, le lithium, le cuivre (**Figure 8**).

B. Et sur les produits neufs

Un sujet extrêmement important lorsque l'on déploie des solutions de recyclage, est d'identifier des partenaires prêts à accepter un produit issu de recyclage. Il convient pour

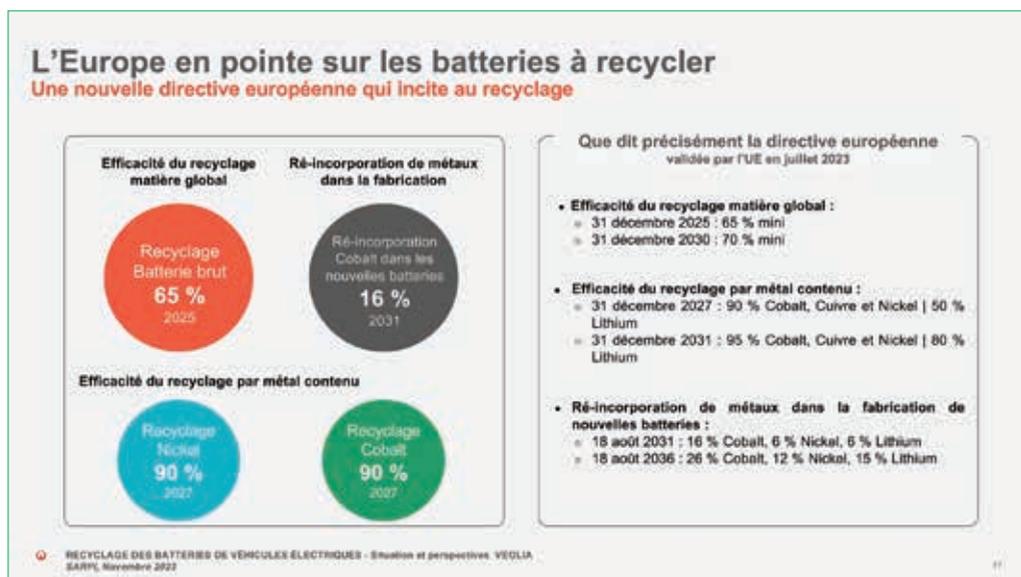


Figure 8

Objectifs européens sur le recyclage des métaux des batteries.

se faire de lutter contre les aprioris qui supposent que ce coproduit est de moins bonne qualité qu'un produit noble.

Afin d'inciter le marché à évoluer, le législateur a stipulé qu'à partir de 2031, les batteries mises sur le marché européen devront contenir un pourcentage minimum de métaux issus du recyclage. Ainsi, en 2031, il faudra démontrer que 16 % du cobalt global contenu dans une batterie provient du recyclage. Cette mesure doit permettre à l'ensemble de la filière (constructeurs automobiles, fabricants de batteries, fabricants de précurseurs et transformateurs de métaux stratégiques, recycleurs...) de trouver les meilleures solutions pour aboutir à des schémas de recyclage en boucle fermée.

3 Le recyclage des batteries en France chez Sarpi-Veolia

3.1. Des choix de positionnement pour les acteurs du recyclage

A. Insertion du recyclage dans le cycle de vie d'une batterie

Considérons le cycle de vie d'une batterie et la place du recyclage dans sa valorisation (**Figure 9**).

Lorsque la batterie ou le véhicule arrive en fin de vie, la batterie est extraite et diagnostiquée. Si aucune solution de réemploi n'est possible, elle devient un déchet.

B. Vers une matière première ou un produit plus élaboré, le choix des entreprises

La question du positionnement du recyclage dans la chaîne

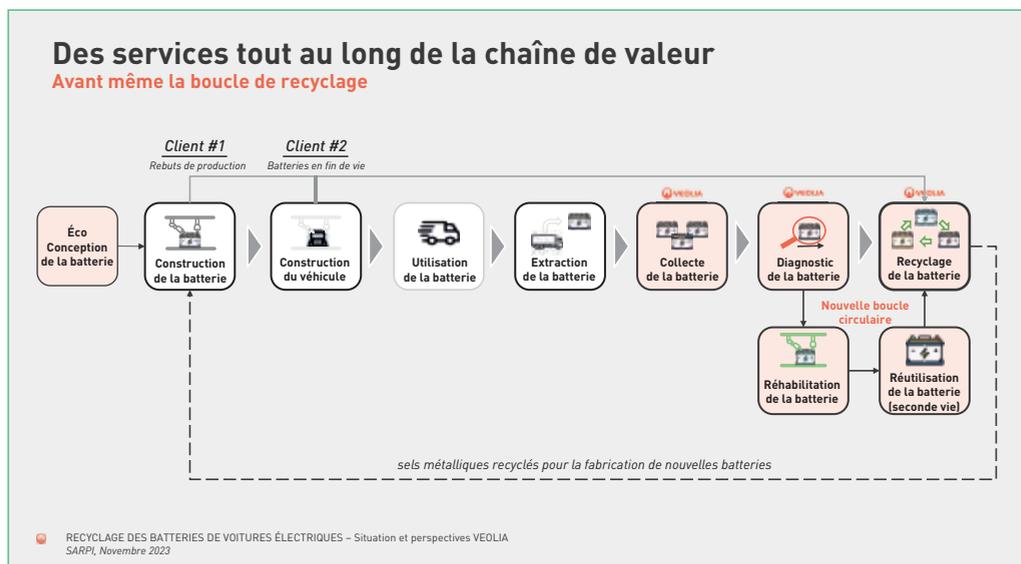


Figure 9

Cycle de vie d'une batterie pour automobile. On distingue, en carrés blancs les étapes de la vie « utile » de la batterie, de sa construction à sa mise au rebut, et en carrés ocres celles qui correspondent à son recyclage – de la collecte à la réhabilitation.

de valeur est fondamentale. La directive impose à terme la réutilisation de métaux issus du recyclage pour la production de nouvelles batteries mises sur le marché en Europe. Mais il existe plusieurs chemins possibles pour fermer la boucle du point de vue du recycleur. En particulier de savoir jusqu'à quel niveau de pureté on doit aller et pour quel positionnement dans la chaîne de production des batteries :

- Est-ce que je me positionne en tant que producteur de produits finis ? Auquel cas, le recycleur produit un nickel de très haute pureté et se met en concurrence avec les acteurs miniers et métallurgistes qui fabriquent du nickel de haute pureté dans des volumes bien supérieurs à la réalité du marché du recyclage dans les années à venir.

- Est-ce que je fais le choix de construire des partenariats avec ces derniers ? Auquel cas, je reste dans ma zone de compétence et d'un déchet très complexe, variable et dangereux, le recycleur produit ce qui va constituer une matière première secondaire à introduire dans la chaîne de production en amont des procédés d'affinage conduisant à la production de métaux au grade batterie.

Dans cette deuxième option, l'opérateur substitue une fraction du nickel, du cobalt et du lithium issue des mines par un métal issu du recyclage avec des propriétés et qualités conformes au cahier des charges initial (Figure 10). La stratégie est de leur fournir des produits monométalliques d'une pureté suffisante pour qu'ils soient remis directement

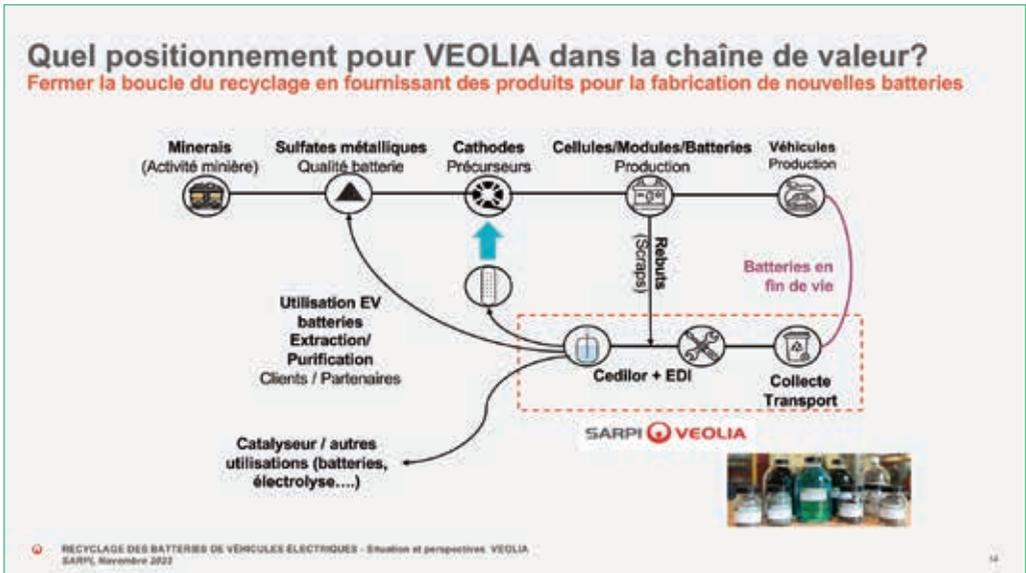


Figure 10

Le rôle de VEOLIA dans les opérations de recyclage.

dans la chaîne de production de batteries. **C'est ce choix que fait Veolia.**

3.2. Première étape : traitement physique de la batterie

A. Deux usines aux spécialités différentes

Deux usines situées dans l'Est de la France opèrent le recyclage des batteries de véhicules électriques à différentes étapes du procédé (**Figure 11**).

Le site de Dieuze recycle depuis plus de 25 ans des piles et des batteries, historiquement issues des téléphones et équipements portables. Depuis une dizaine d'années, elle travaille en partenariat avec les industriels de l'automobile, avec les industries de production de batterie pour

développer des solutions de recyclage des métaux présents dans ces nouvelles typologies de batteries utilisées pour la mobilité. Cette usine est dédiée aujourd'hui aux premières opérations de décharges, démantèlement et séparation des fractions unitaires par voies mécanisées.

Le site de Cedilor est, pour sa part, dédié au traitement et au recyclage des déchets dangereux, tous types confondus. Sur ce site (**Figure 11**), une première unité de recyclage par voie chimique des métaux contenus dans la *black mass*, le constituant des batteries contenant les métaux stratégiques, est en cours de démarrage.

B. Le démantèlement de la batterie

Une batterie de véhicule électrique pèse entre 300 et 500 kg

Une nouvelle filière de valorisation des batteries

Deux usines VEOLIA spécialisées dans le recyclage chimique en Région Grand Est

EDI – Fr 57 Dieuze
(Site dédié au recyclage des batteries)



Opère depuis 25 ans des outils de recyclage de batteries « 8 000 t/an » de toutes technologies (Alcaline, NiCd, LiP, Li-ion,...)
Voies mécaniques (tri, broyage, criblage)
Voies chimiques (recyclage des batteries Ni/Cd)

CEDILOR – Fr 57 Amnéville
(site multi-activités de recyclage)



Opère depuis 50 ans des unités de traitement et de recyclage des déchets dangereux : Tri, broyage, déconditionnement, procédés chimiques, biologiques et thermiques.
Hydrométallurgie extractive du nickel et du zinc.

RECYCLAGE DES BATTERIES DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES – Situation et perspectives. VEOLIA SARLPI, Novembre 2023

Figure 11

Les usines de Veolia dédiées au recyclage de batteries.

et contient généralement une énergie résiduelle pouvant présenter des risques lors des premières étapes de démantèlement. La première opération consiste donc à mettre la batterie en sécurité, c'est-à-dire réaliser la décharge complète de la batterie par voie électrolytique ou électrique. Au terme de cette opération, le module est extrait.

C. Le broyage et la séparation

Les opérations sont schématisées sur la **Figure 13**.

L'opération de broyage est réalisée en voie « humide » afin de limiter les phénomènes d'inflammabilité des solvants contenus dans les modules.

Cette première étape conduit à la production (voir le cercle photographié sur la **Figure 13**) de broyats grossiers. Ces broyats sont orientés vers une

unité mécanisée permettant de séparer les différentes fractions par des techniques granulométriques⁴ et aérauliques⁵. Le cuivre et l'aluminium (l'anode et la cathode) sont récupérés séparément ainsi qu'une partie de l'emballage de la coque, principalement du fer et de l'inox. La *black mass* représente à peu près 30 % du poids de la batterie. Cette matière contient l'ensemble des matériaux stratégiques : le lithium, le cobalt, le nickel, ainsi que du manganèse pour certaines technologies. Le cuivre et l'aluminium comme le fer et l'inox sont orientés vers des

4. Granulométrie : séparation basée sur la taille des grains.

5. Système aéraulique : système de séparation basé sur la différence de densité des matériaux, utilisant un flux d'air.



Figure 12

Premières étapes du recyclage : sécuriser et démanteler la batterie.

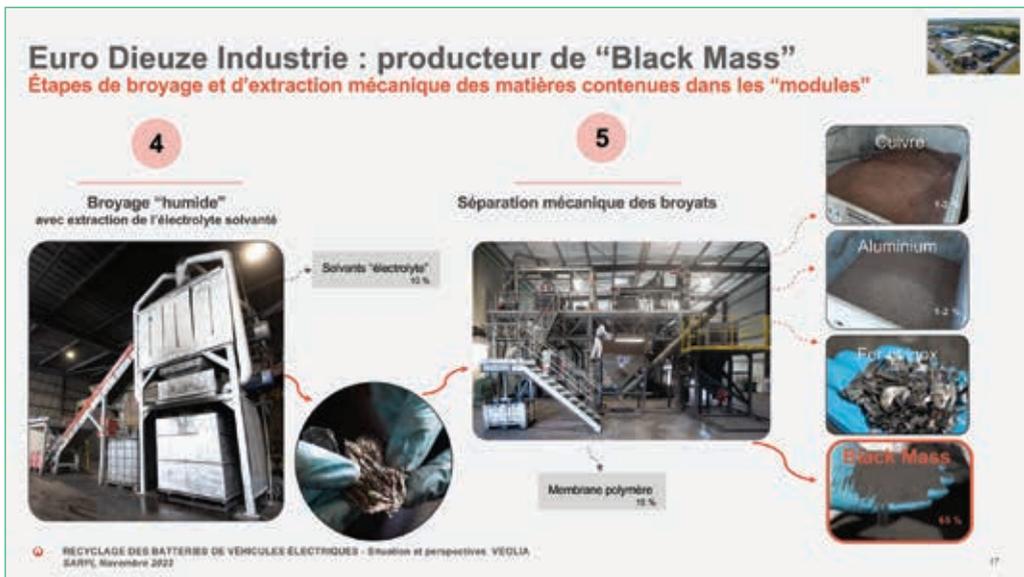


Figure 13

Obtention de matières broyées.

industries classiques de production par voies métallurgiques.

3.3. Puis traitement chimique

A. Un mélange de nombreux métaux

La black mass est l'enjeu fondamental de l'étape de recyclage car elle contient la

totalité des métaux considérés comme stratégiques. Un exemple de composition de black mass est présenté sur la Figure 14 pour différentes technologies.

On observe une variabilité importante des compositions en fonction des différentes technologies. Pour le nickel, par exemple, on varie entre

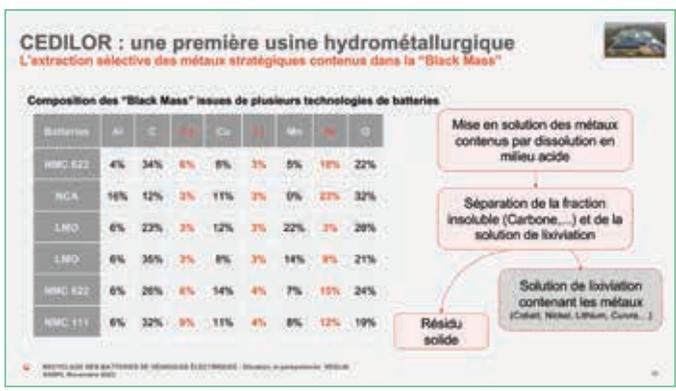


Figure 14

Métaux présents dans la « black mass » et étapes de traitement selon les différents types de batteries..

3 % et 18 %. Pour le cobalt, de 3 à 6 %.

L'objectif du procédé est de séparer les six métaux présents dans la matrice.

B. L'extraction sélective des différents métaux

La première étape consiste à mettre en solution la *black mass* de manière à dissoudre les métaux et obtenir un lixiviat⁶ sur lequel on va mettre en œuvre des opérations de séparation (Figure 15).

La Figure 15 présente quelques résultats d'analyses obtenues

6. Lixiviat : solution obtenue après l'opération de lixiviation. La lixiviation consiste à mettre les métaux en contact avec une solution aqueuse, souvent acide, de manière à permettre leur dissolution dans l'eau puis leur récupération ultérieure.

sur les fractions mono-métalliques qui sortent des étapes de séparation des lixiviats et qui sont essentiellement des oxy-hydroxydes métalliques. L'hydroxyde de nickel par exemple contient des concentrations extrêmement faibles en métaux « non désirables » comme le cuivre, l'aluminium, le cobalt, ou le fer.

C. Vers l'échelle industrielle

Après une période de validation à une échelle pilote semi-industrielle (Figure 16), la décision a été prise de passer à l'échelle industrielle. La construction d'une nouvelle installation a démarré en février 2022.

La Figure 16 montre quelques photos des équipements. Le démarrage est prévu pour janvier 2024 avec une capacité de

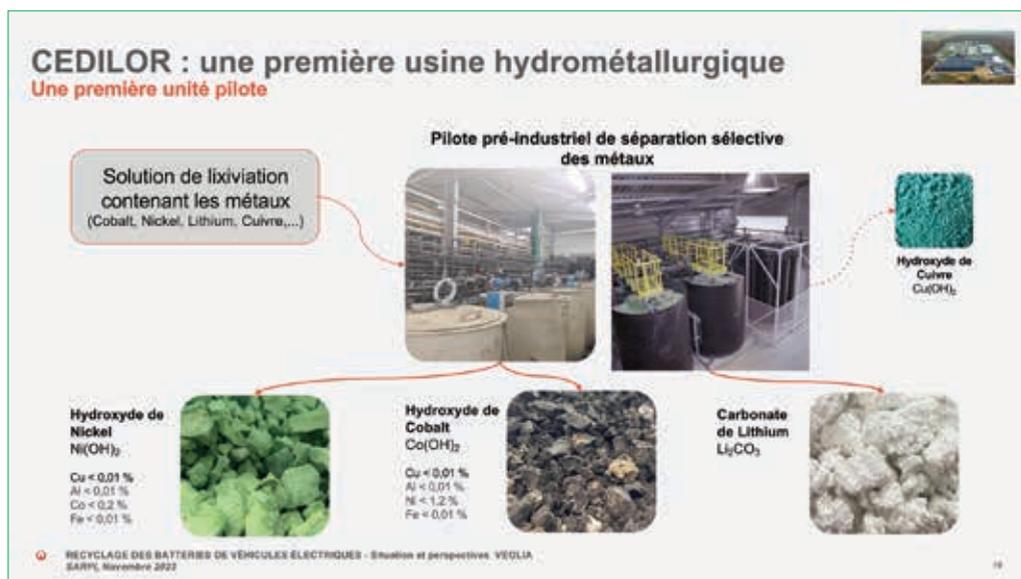


Figure 15

Produits obtenus après traitement de la black mass.



Figure 16

Usine de traitement hydrométallurgique : de la « black matter » aux métaux.

7 000 tonnes de *black mass* par an, ce qui représente près de 20 000 tonnes de batterie. Le CAPEX⁷ (investissement industriel) est de 18 millions

7. CAPEX : abréviation de l'anglais « CAPital EXpenditure », signifiant « dépenses en capital ». Pour usine cela recouvre notamment l'ensemble des coûts liés à l'implantation et à l'achat du matériel industriel.

d'euros pour un objectif de chiffre d'affaires de 20 millions d'euros annuellement à pleine capacité.

L'analyse carbone prévisionnelle estime un CO₂ évité de 1,5 tonne par tonne de batterie recyclée par rapport à une production de batterie issue uniquement de métaux ou de minerais natifs. C'est bien un impact positif sur les émissions de CO₂.

Conclusion

Ce chapitre sur le recyclage des batteries des véhicules électriques dépasse son strict objectif. Il est exemplaire de toute une évolution vers le respect de l'environnement et des ressources qui s'impose maintenant à l'industrie. Ces programmes ne sont plus des gadgets pour faire

plaisir aux écologistes : tous ont maintenant compris qu'on ne pouvait plus s'y soustraire sous peine d'être éliminés par la concurrence.

Et on voit ici les efforts, d'abord de compréhension puis d'adhésion à l'objectif, que cela entraîne. Ensuite, de nouveau, appel à la technique : il faut inventer comment modifier ses procédés, ses outils, ses partenaires pour rester « dans le coup » en ayant intégré les impératifs de l'environnement et du respect des ressources. On voit bien la démarche exigeante qui s'est mise en place à propos des batteries : d'abord l'analyse d'une question que l'on croyait simple mais qui est complexe, définir la nature même de « l'objet batterie », puis invention de procédés de collectes qui ne doivent pas être aveugles mais préparer au tri, invention de principes techniques en laboratoire, passage à l'échelle supérieure par la création et l'exploitation de pilotes industriels, changement d'échelle encore avec la construction d'installations industrielles et l'implantation sur des marchés internationaux et ce n'est pas fini... Reste à tout optimiser au fil des expériences acquises et, car l'entreprise Veolia en a les capacités, à s'imposer sur le plan mondial grâce à de nouvelles aventures industrielles, passage aux très grandes échelles.

Ce qui nous est conté là par Veolia, ses efforts continus et impressionnants, sur plusieurs années voire plusieurs décennies, c'est la démarche qui s'impose à toutes les branches industrielles. Grâce à cet exemple on saisit maintenant ce qu'il y a vraiment derrière les mots populaires et publicitaires de « respect de l'environnement » : c'est beaucoup de compétences, de pluridisciplinarité, de technologie, de volonté de collaborer, de volonté et de persévérance pour assurer le succès de tous et la possibilité de poursuivre nos acquis techniques.

Industrie photovoltaïque : les enjeux de la circularité

D'après la conférence de Yohan PARSA

Yohan Parsa, directeur Recherche & Développement de Rosi Solar

L'entreprise Rosi est une start-up spécialisée dans la revalorisation et le recyclage des déchets issus de l'industrie photovoltaïque. On fera d'abord un état des lieux rapide de l'industrie photovoltaïque en insistant sur le cycle de vie des équipements qu'elle utilise et produit. On verra ensuite de plus près les deux activités principales de recyclage qui permettent à l'entreprise d'améliorer sa chaîne de valeur.

1 Introduction aux enjeux portés par le recyclage dans le domaine du photovoltaïque

1.1. Un horizon du marché du photovoltaïque

Les capacités installées chaque année dans le monde pour l'industrie photovoltaïque sont impressionnantes. Au cours des dix dernières années, la croissance annuelle du marché avoisinait les 20 % (*Figure 1*)

État des lieux du photovoltaïque

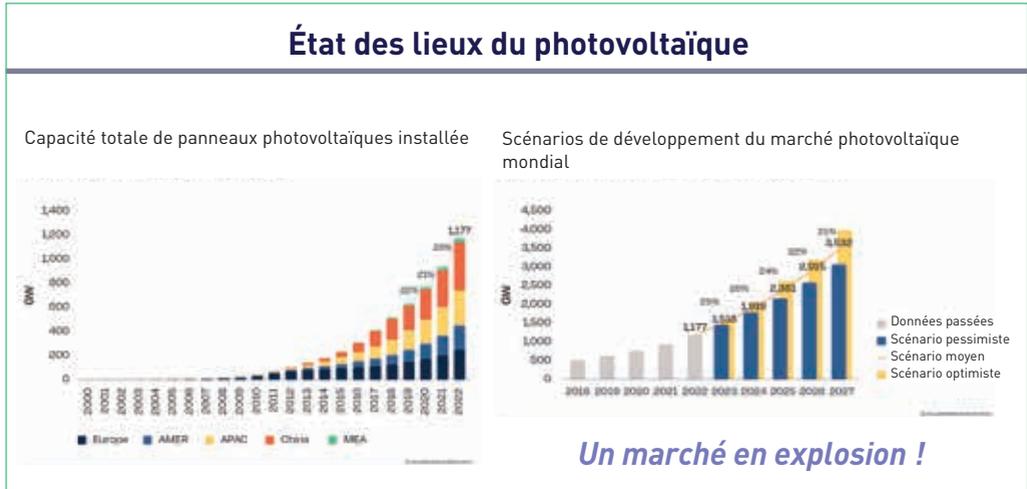


Figure 1

Évolution du nombre de panneaux photovoltaïques installés depuis 2000 dans le monde, et perspectives à l'horizon 2027.

et les scénarios indiquent que la croissance va se poursuivre sur les mêmes bases. Il s'agit donc d'une réelle explosion qui appelle un impérieux besoin de traiter les questions de circularité que va porter ce domaine et les défis associés.

Un grand nombre de technologies existent aujourd'hui pour fabriquer les panneaux solaires : citons-les par leurs matériaux de base : la pérovskite¹, l'hétérojonction² ou le

1. Minéral de formule chimique CaTiO_3 , composé d'oxyde de calcium et de titane.

2. Les différentes positions que peuvent occuper les électrons dans les atomes n'ont pas toutes la même énergie. Dans les métaux, il peut exister un gros écart d'énergie entre ces positions. L'hétérojonction est le peuplement simultané de plusieurs positions d'énergies très différentes.

monocristallin³ (Figure 2). En fait, la réalité est que depuis plusieurs années le marché est dominé par un seul métal, le silicium, qui couvre près de 95 % des demandes. La circularité du photovoltaïque, c'est donc essentiellement le cycle de vie du silicium.

1.2. Le cas particulier du silicium

Le silicium s'obtient à partir de ressources naturelles, six tonnes de matières premières pour une tonne de silicium (Figure 3). On utilise du quartz (un produit minier) (on entend parfois qu'on utilise du

3. Ici, désigne un panneau solaire dont l'intégralité du silicium provient du même cristal (du même morceau de minerai).

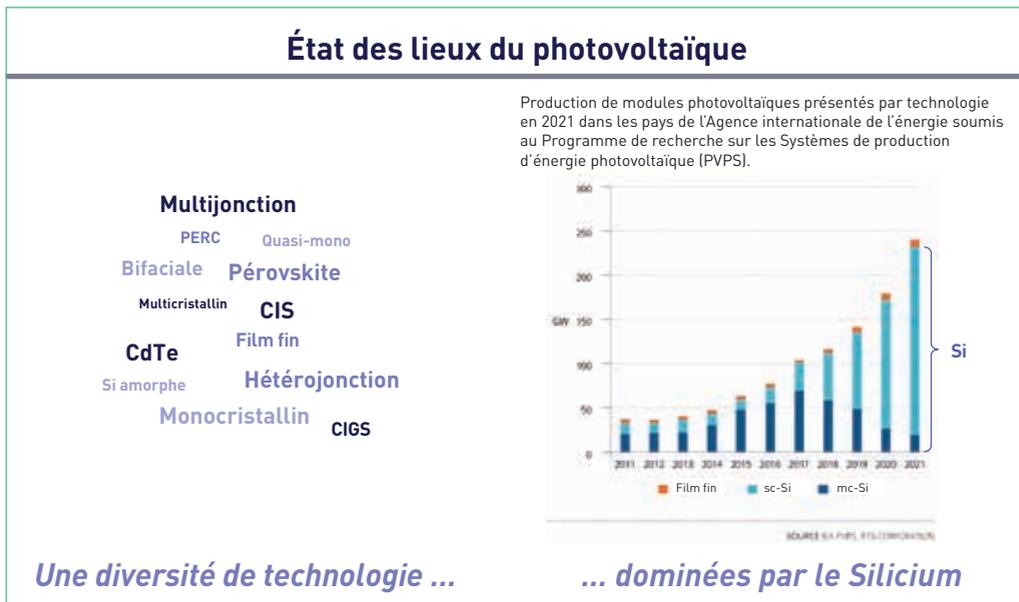


Figure 2

Glossaire de termes et de technologies relatifs au silicium.

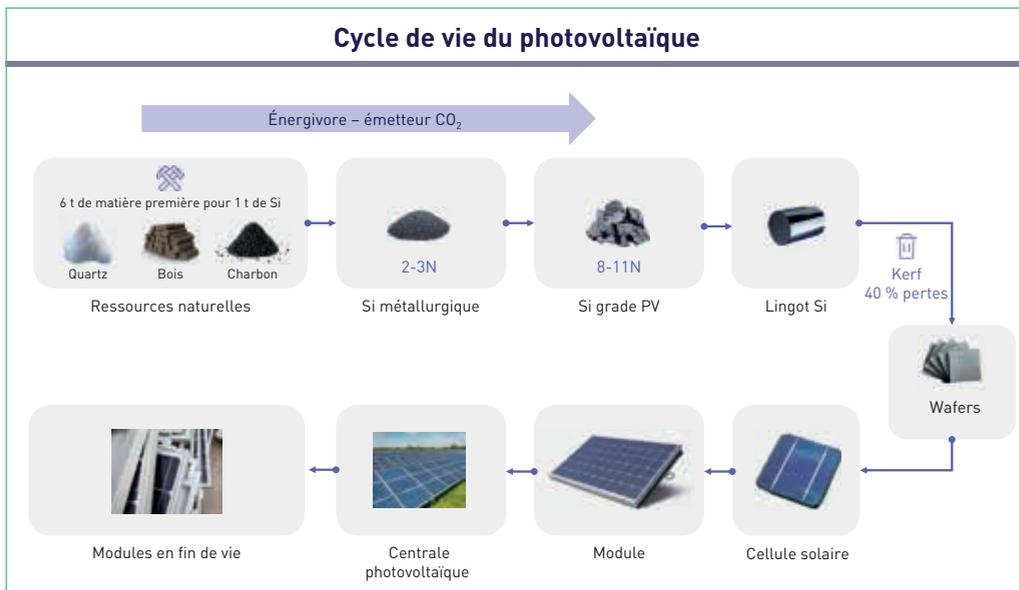


Figure 3

Cycle de vie actuel de l'industrie photovoltaïque. 2-3N et 8-11N désignent le degré de pureté du produit (voir note 4).

sable, mais c'est faux : il faut juste du quartz de qualité suffisante), du bois, du charbon. On obtient ainsi du silicium de qualité métallurgique (de 2N à 3N⁴), c'est-à-dire d'une pureté allant de 99 % à 99,9 %. Ce silicium est ensuite purifié jusqu'à atteindre une qualité suffisante pour un grade photovoltaïque⁵. On va de plus en plus loin dans les niveaux de pureté, qui aujourd'hui peuvent atteindre 9N ou 11N.

Après purification, le silicium est refondu et mis sous forme de lingots, pour permettre son utilisation sous forme monocristalline. Il est ensuite coupé en tranches (*wafers*⁶) qui constituent le matériau de base de l'industrie photovoltaïque. Ces *wafers* sont ensuite travaillés pour la fabrication de cellules solaires : on y introduit une couche anti-réfléctive (la couche bleue) ainsi que des fils de cuivre et d'argent pour conduire l'électricité. Ces cellules sont assemblées dans un module photovoltaïque en les complétant par une couche de verre et du polymère⁷, ainsi qu'un cadre en aluminium.

Ce sont ces modules qui sont finalement installés sur le toit des maisons ou, cela se fait de plus en plus, dans des centrales photovoltaïques où

elles resteront une vingtaine d'années (ce qui correspond à leur durée de vie).

Ce cycle de production assez long est bien connu. Dès les premières étapes, ce procédé est très consommateur en ressources naturelles (six tonnes de ressources pour une tonne de silicium), très consommateur en énergie (la première étape a lieu sous une température de 1 500 °C), et très émetteur de CO₂. **Il y a ainsi un vrai besoin et un vrai intérêt à aller récupérer et revaloriser toutes les pertes et les déchets de cette chaîne de valeur.**

2 Le non-recyclage du silicium : une première source de pertes

2.1. Le silicium récupéré sous forme de kerf⁸

La première perte sur cette chaîne de valeur se situe au niveau de la découpe du lingot, où 40 % (en masse) du silicium est perdu. Cette perte se fait sous la forme d'un matériau : le kerf (*Figure 4*). Mais qu'est-ce que le kerf ?

La découpe du lingot de silicium se fait à l'aide d'une scie à fil diamanté (cela permet d'obtenir des tranches) qui est pratiquement aussi épaisse que la tranche qu'on veut couper. Si vous avez déjà coupé un morceau de bois, vous vous rendez bien compte qu'une grosse partie du silicium va être perdue sous forme de sciure (copeaux de silicium). Ces copeaux sont très purs,

4. Unité donnant le nombre de « 9 » présents dans la pureté d'un métal. Par exemple, 2N désigne une pureté de 99 %, et 5N à 99,999 %.

5. Un « grade » désigne le degré de qualité d'une cellule photovoltaïque. Le grade photovoltaïque est le grade de plus haute qualité (cellules sans défauts visibles).

6. *Wafers* : plaquettes.

7. Molécule de grande longueur, composée de la répétition d'un monomère.

8. Kerf : trait de scie.



Figure 4

Le kerf désigne le silicium contaminé par le liquide utilisé pour son découpage.

mais ils sont mélangés avec un liquide de découpe qui est en majorité composé d'eau, et avec des lubrifiants, des agents anti-mousse ou des tensioactifs⁹.

Ce « silicium très pur » mélangé avec du liquide de découpe (induisant une contamination carbonée) s'appelle le « kerf », qui est donc à la base un matériau très pur, mais contaminé, et n'est en fait pas du tout revalorisé.

Si on regarde de plus près ce qu'est le kerf, il ressemble à un petit copeau de silicium et n'a donc pas de forme régulière (Figure 5). Sa taille est de l'ordre du micron. Le silicium pur s'entoure d'une couche de silice (oxyde de silicium¹⁰) qui se forme pendant la découpe. En effet, celle-ci se faisant par abrasion, chauffe la matière et le silicium, très réactif,

s'entoure d'une petite couche d'oxyde par réaction avec l'eau ou l'oxygène qu'il rencontre.

Le polyéthylène glycol¹¹, polymère utilisé dans le liquide de découpe, vient par ailleurs s'enrouler autour des particules de silicium ; ses longues chaînes carbonées tapissent la particule de kerf. Toutes

11. Cf. infra.

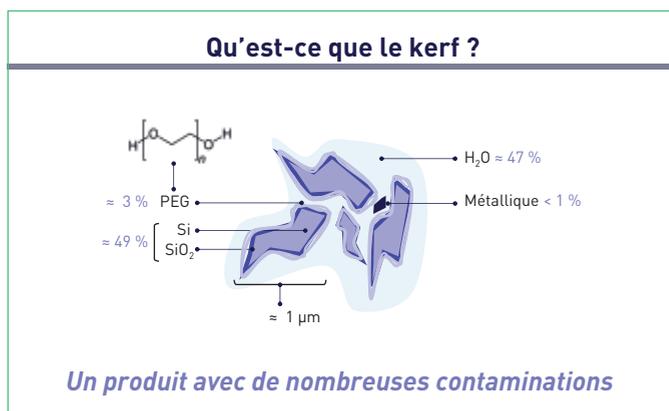


Figure 5

Illustration de la structure du kerf.

9. Espèce chimique permettant d'augmenter la rigidité d'une interface liquide-liquide ou liquide-gaz.

10. Composé chimique de formule SiO₂.

ces particules vont ensuite s'agglomérer les unes avec les autres, formant des amas un peu plus volumineux et souvent largement humides. Au milieu de ces amas peuvent se trouver des particules métalliques (de l'inox¹² ou de l'aluminium) provenant des supports utilisés pour tenir les lingots lors de la découpe ou des bacs de récupération des sciures.

En résumé, le kerf est constitué de beaucoup de silicium (environ 50 %), de beaucoup d'eau (environ dans les mêmes proportions), et de contaminants : le polyéthylène glycol, l'oxyde de silicium et quelques contaminants métalliques. La composante silicium, très contaminée, est inutilisable directement : c'est ceci qui fonde le besoin d'ajouter au procédé initial, une étape « circulaire » de récupération de la matière. L'enjeu est très

12. Acier inoxydable : alliage d'aluminium, de fer, de chrome et de nickel.

important, car il concerne 40 % de la masse de silicium global.

2.2. Le procédé de recyclage du kerf pensé par Rosi

La stratégie de purification du kerf développée par Rosi prévoit plusieurs étapes de traitement de ce déchet : le kerf est d'abord purifié à basse température, séché, conditionné puis repurifié, cette fois-ci à haute température (**Figure 6**). Lors de cet enchaînement, chaque étape a pour but d'éliminer un type de contamination : les contaminants organiques sont retirés dans un premier temps, avant d'éliminer l'eau, les oxydes et enfin les composants métalliques.

Le contaminant organique principal est le polyéthylène glycol, les longues chaînes carbonées entourées autour de la particule de kerf (**Figure 7**). Pour le traiter, on réalise un traitement oxydant en voie aqueuse pour attaquer les liaisons des chaînes de polymère

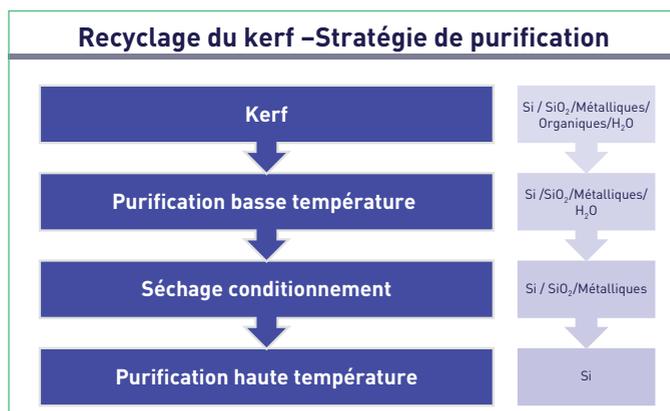


Figure 6

Schéma de principe du procédé de recyclage du kerf.

Recyclage du kerf – Purification basse température

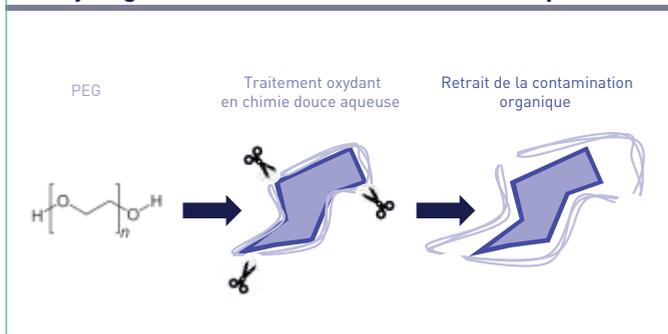


Figure 7

Schéma de principe de l'étape de traitement du polyéthylène glycol.

afin de les découper, de les détacher de la particule de kerf et de les éliminer.

Après cette étape, on obtient un produit humide à 50 % constitué de particules de formes et de tailles très irrégulières. Ces irrégularités empêchent de l'utiliser pour la suite (Figure 8) et on le soumet plutôt à des étapes de conditionnement et de séchage qui fourniront un produit beaucoup plus facile

à l'usage parce que beaucoup plus sec (moins de 5 % d'humidité), de taille homogène et de forme contrôlée. À ce stade, la contamination carbone et la contamination due à l'humidité ont été retirées.

Il reste donc à adresser la contamination en oxygène et en particules métalliques. Pour cela, on va utiliser les hautes températures et des procédés de fusion sur le

Recyclage du kerf – Séchage et conditionnement

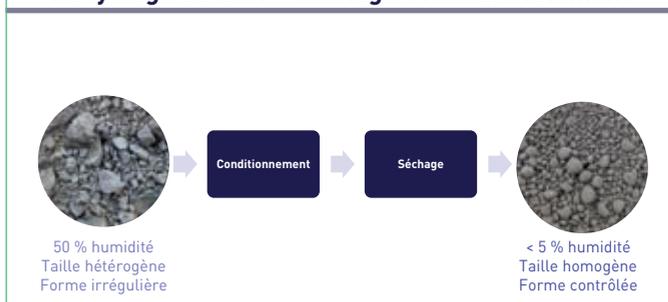


Figure 8

Schéma de principe des étapes de séchage du kerf.

produit séché et conditionné. Deux étapes vont être appliquées (*Figure 9*).

Tout d'abord, **une étape de fusion-désoxydation**, réalisée à plus de 1 500 °C, ayant pour but de retirer la couche d'oxyde et dans un second temps, une deuxième étape pendant laquelle ont lieu un **reconditionnement et une ségrégation¹³ des particules**. Cette seconde étape permet de retirer la plupart des particules métalliques, et d'obtenir du silicium sous plusieurs formes (des granules ou des éléments beaucoup plus massifs). Ce silicium se présente sous une forme très précise et il est de grande pureté (de 4N à 5N).

Ainsi, sur la boucle du procédé, on récupère une partie des 40 % de pertes sous forme de silicium de pureté 4N qui peut, soit être réintégrée

13. Enrichissement de certains atomes particuliers dans un alliage.

dans la chaîne de valeur du photovoltaïque au niveau des procédés de purification, soit fermer d'autres boucles de circularité (puisque le silicium est utilisé dans le photovoltaïque, mais aussi dans beaucoup d'autres procédés, notamment la chimie des silicones).

3 Le non-recyclage des panneaux photovoltaïques : une autre source de pertes

3.1. Les enjeux du recyclage des panneaux en fin de vie

Ces traitements permettent d'éviter la première grosse perte de silicium dans le procédé photovoltaïque. La deuxième, dont on entend beaucoup plus parler puisqu'elle est visible, est celle qui est associée aux **modules en fin de vie** (*Figure 10*). Ces modules sont généralement désinstallés au bout de vingt ans et la question du recycleur est : qu'est-ce qu'on en fait ?

Entre aujourd'hui et 2050, on aura multiplié par 500 la quantité cumulée de panneaux photovoltaïques en fin de vie qui aura besoin d'être traitée. On est aujourd'hui tout au début de la courbe (voir la *Figure 11* pour l'évolution des besoins mondiaux), le point où la stratégie de traitement doit être étudiée ou décidée. **Le traitement de ces modules s'impose** pour deux raisons. D'une part, **il est impossible pour des raisons écologiques, de se contenter de les enfouir**. Et, d'autre part, comme le marché du photovoltaïque grandit, le besoin en silicium augmente : il y a **une vraie mine urbaine dans ces panneaux en fin de vie**



Figure 9

Schéma de principe de la purification du kerf séché.

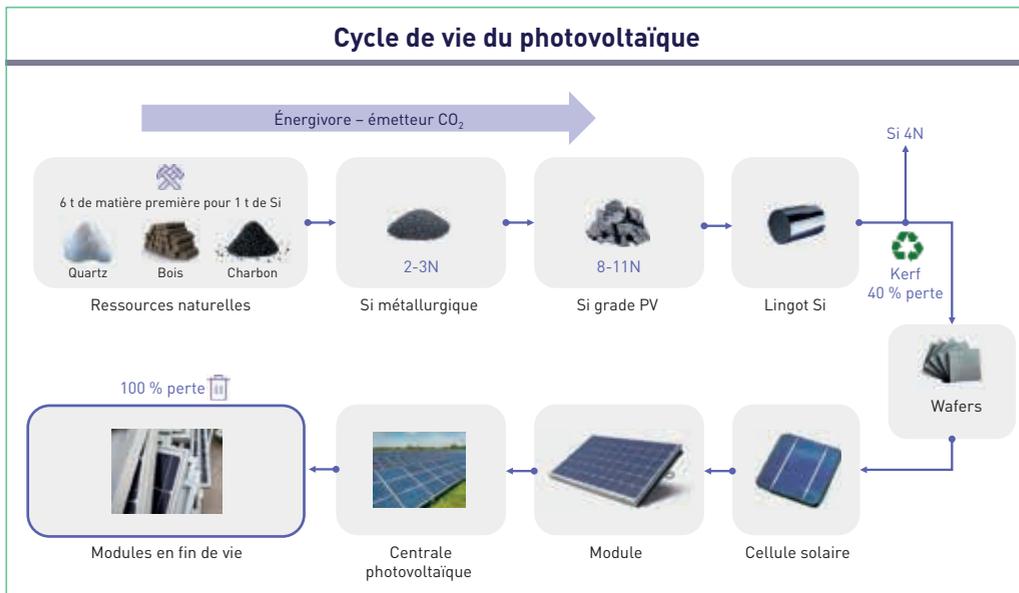


Figure 10

Place des modules en fin de vie sur le cycle de vie de l'industrie photovoltaïque.

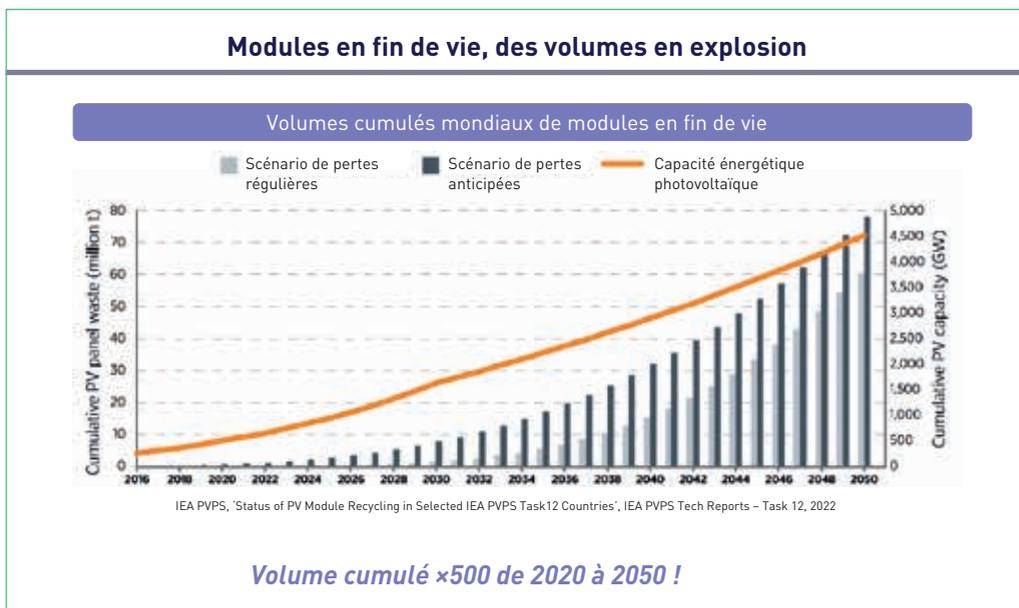


Figure 11

Volumés mondiaux de modules en fin de vie cumulés, en fonction du temps (données et projections).

qui permettrait de récupérer des matériaux qui vont pouvoir eux-mêmes alimenter le marché du photovoltaïque.

Regardons d'un petit peu plus près ce qu'il y a dans un panneau (Figure 12, à gauche). L'élément principal est la **cellule solaire**, composée principalement de silicium, mais aussi d'argent, de cuivre et d'aluminium déposés sur la face avant ou sur la face arrière pour conduire l'électricité. Ensuite, on retrouve **une plaque en verre technique**¹⁴ à haute transparence qui protège le module et les cellules. Enfin, à l'arrière du panneau se trouve un **backsheet**¹⁵ (une feuille de polymère) qui permet d'assurer l'étanchéité de la structure. Ces trois éléments sont liés par des couches d'encapsulant (qui est aussi un polymère). Le tout est pris dans un cadre

en aluminium, et un boîtier de jonction à base de cuivre est rajouté pour brancher le panneau.

Finalement, **un panneau est un millefeuille de matériaux**. Le composant le plus présent en termes de masse est le verre qui représente 85 % de la masse totale du panneau, mais on se rend vite compte qu'il ne compte pas beaucoup en valeur à côté des métaux : l'argent, le silicium, le cuivre et l'aluminium. Par exemple, l'argent représente moins d'un pourcent de la masse totale du panneau, mais 50 % de sa valeur (Figure 12, à droite).

3.2. Les procédés de recyclage des composants d'un panneau photovoltaïque

Les procédés de recyclage actuels se contentent de récupérer le verre et l'aluminium. Dans le cas de l'aluminium, c'est assez simple : il est présent dans le cadre du panneau et on peut le séparer mécaniquement. Le verre, quant à lui, est récupéré pour satisfaire la législation qui impose que 80 % de la masse des panneaux photovoltaïques soient recyclés et, en cassant et broyant le panneau, on arrive bon gré mal gré à séparer le verre du reste et obéir à la directive.

Le point intéressant est que la totalité des matériaux de la cellule ne sont à l'heure actuelle pas du tout adressés. C'est ainsi le cas du silicium et de l'argent notamment alors qu'il y en a un vrai besoin sur le marché. **Chez Rosi, nous avons développé des procédés permettant d'adresser non seulement le verre et**

14. Verre de haute qualité utilisé dans l'industrie des matériaux.

15. Backsheet : feuille dorsale.

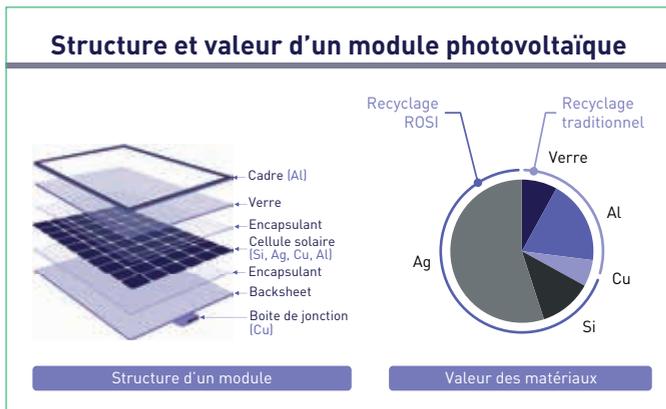


Figure 12

Structure d'un panneau photovoltaïque et valeur des matériaux le composant.

l'aluminium, mais aussi le silicium et l'argent.

Pour cela, Rosi définit les différentes étapes en adaptant et modifiant des procédés connus. On met ainsi en œuvre le prétraitement, la pyrolyse¹⁶, le tri mécanique, la gravure chimique¹⁷ et le tri final (Figure 13).

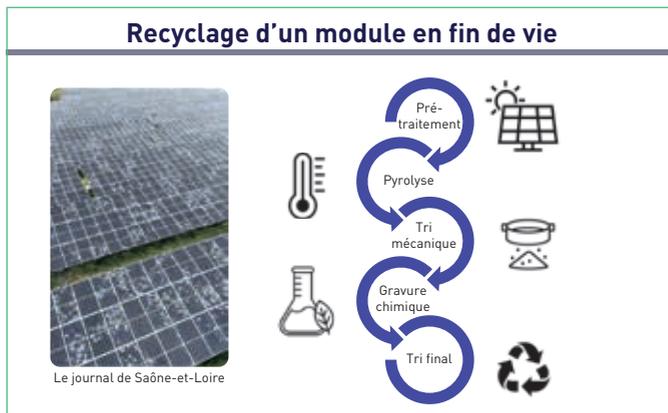


Figure 13

Schéma de principe du recyclage d'un panneau en fin de vie.

3.3. L'étape de pyrolyse

Dans l'étape de pyrolyse (Figure 14), on ne cherche pas à récupérer les monomères du

polymère, mais on veut délaminer le module en dégradant thermiquement ses polymères. On va ainsi éliminer ces polymères qui collent les matériaux les uns aux autres, ce qui permettra d'accéder aux matériaux constituant le panneau.

16. Procédé permettant de séparer les atomes d'une espèce par élévation très forte de température et en absence d'oxygène (absence de combustion).

17. Procédé permettant le décapage de zones précises d'un matériau grâce à des produits décapants.

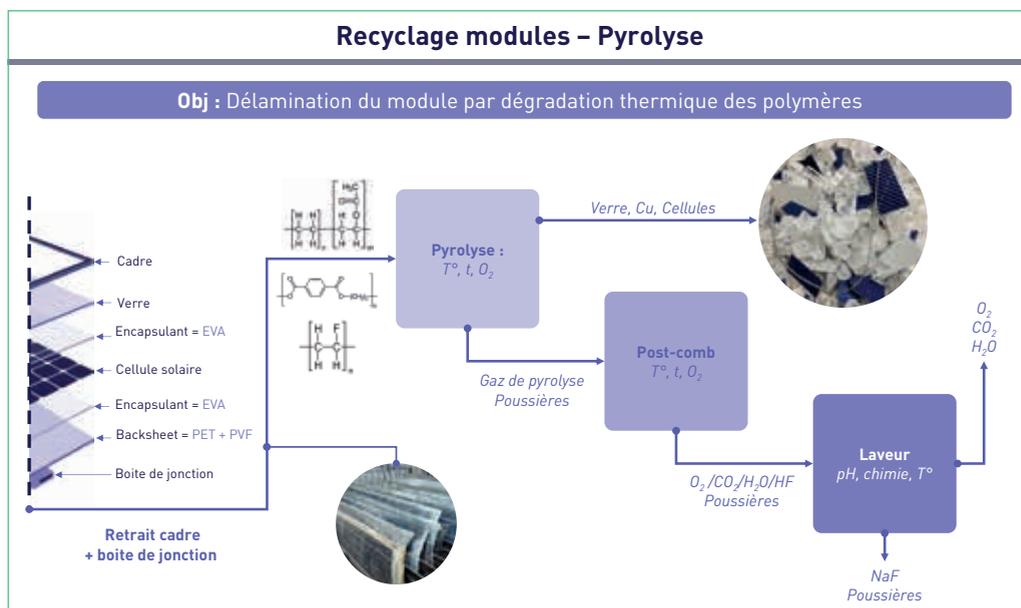


Figure 14

Schématization du processus de pyrolyse.

Les polymères en question sont au nombre de trois : les polymères d'encapsulant (de l'EVA¹⁸) et ceux présents sur le backsheet (du PET¹⁹ et du PEF²⁰). Sur le panneau entier, on applique un premier traitement, relativement facile, consistant à lui retirer son cadre et son boîtier de jonction. On récupère alors les backsheet, le verre et les cellules des panneaux. Ces restes de panneau subissent ensuite une pyrolyse dont, pour rappel, l'objectif est de dégrader thermiquement les trois polymères représentés ici (voir le schéma du procédé *Figure 14*). En contrôlant les paramètres de la pyrolyse, on transforme ces polymères en « gaz de pyrolyse ». Ceux-ci transitent ensuite par une chambre de post-combustion, qui les transforme en gaz simples, oxygène, dioxyde de carbone et vapeur d'eau, ainsi

18. Éthylène-acétate de vinyle.
19. Polytéraphthalate d'éthylène.
20. Polyéthylène furanoate.

qu'en acide fluorhydrique (HF), formé à haute température par le PVF²¹, un polymère fluoré. Ce dernier passe en sortie de la chambre de post-combustion, dans un laveur de gaz qui le transforme en NaF²², un matériau que l'on peut récupérer sous forme de poussières. **À la fin de la pyrolyse, les gaz relâchés sont uniquement de l'oxygène, du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau.**

3.4. L'étape de tri mécanique complétée par la gravure chimique

Le pyrolysate récupéré, un mélange de matériau, de verre, de cuivre et de cellules photovoltaïques, entre ensuite dans une étape de tri mécanique, où l'on sépare ces différentes fractions (*Figure 15*). Le premier élément à être trié est le cuivre, prêt à rentrer dans le circuit de revalorisation « classique ». Il reste ensuite le verre et des parties de cellules photovoltaïques qui sont reprises par un « tri grossier – verre ». Le verre issu de ce tri est de haute transparence (du verre technique) qui sera repris par une autre chaîne de revalorisation. Il reste encore après ces étapes de traitement, des cellules et des petits éclats de verre qui font l'objet d'une **étape de « tri fin »**, séparant le verre fin des restes des cellules (*Figure 15*).

En fait, on n'est pas au bout du chemin, car on veut aller plus loin pour recueillir les dernières quantités de silicium et d'argent qui sont les deux matériaux les plus motivants pour la filière.

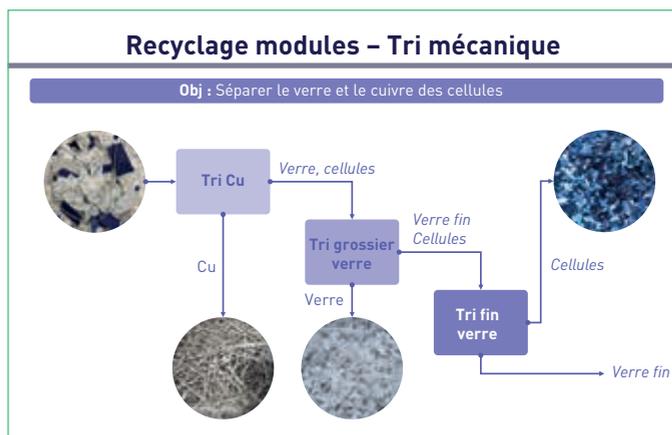


Figure 15

Schématisme du processus de tri mécanique.

21. Polyfluorure de vinyle.
22. Fluorure de sodium.

Dans cet objectif, Rosi et ses collaborateurs ont mis au point **une dernière étape de gravure chimique** (Figure 16). Insistons sur le fait qu'ici il ne s'agit que de détacher les fils d'argent : nous ne faisons pas d'hydro-métallurgie ni essayons de dissoudre ces métaux. Nous évitons ainsi par ailleurs des procédés coûteux et à impact environnemental fort.

Le procédé retenu consiste à détacher les fils d'argent juste par gravure : on conserve

l'intégrité physique du fil, en contrôlant nos paramètres de gravure. Cette gravure chimique fait intervenir des étapes de rinçage et de séchage. Elle fournit en sortie un mix de cellules de silicium et de fils d'argent (les pelotes de la Figure 16 sont des fils d'argent qui ont été détachés des cellules). Ce mix est ensuite soumis à une étape de tri fin qui sépare le silicium et l'argent : **on récupère deux produits critiques purs**.

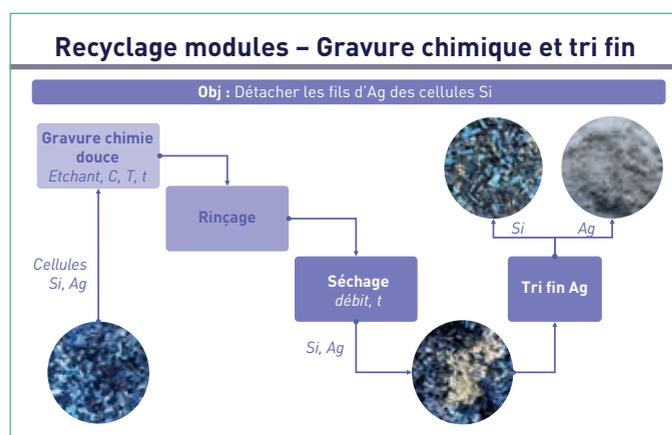


Figure 16

Schématization du processus de gravure chimique.

Conclusion : les richesses insoupçonnées de la revalorisation

La Figure 17, qui schématise le « bilan réel » du recyclage des panneaux photovoltaïques, diffère de la Figure 10 du « bilan plus modeste », maintenant dépassé et envisagé avant l'arrivée des progrès des techniques du recyclage. Le bilan des activités de recyclage des modules

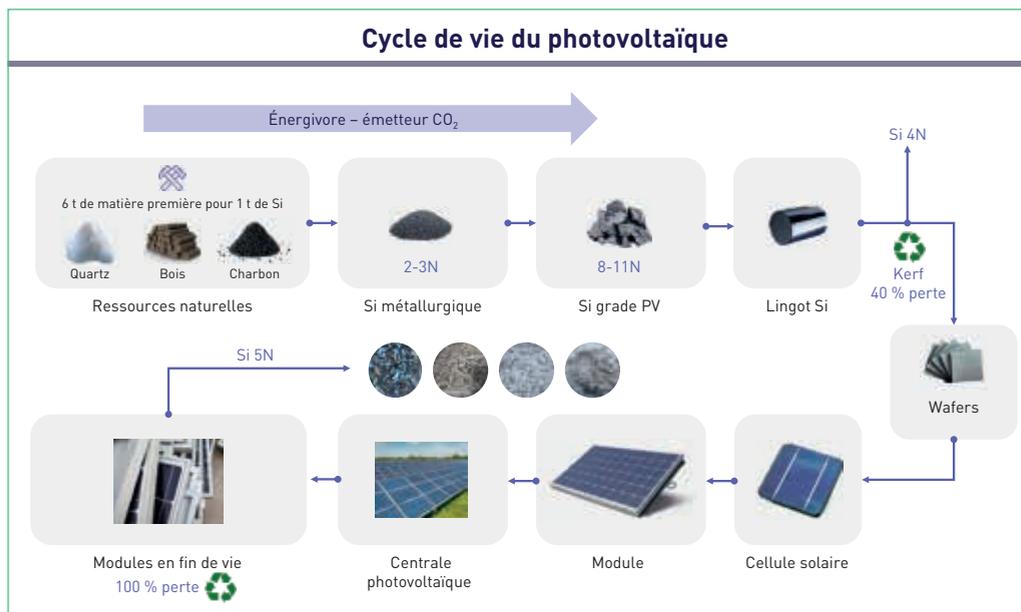


Figure 17

Représentation des 100 % de recyclage des matériaux présents dans les panneaux photovoltaïques en fin de vie.

photovoltaïques en fin de vie présentées dans ce chapitre n'est pas seulement la production de silicium 4N visée prioritairement au départ. C'est aussi celle de silicium 5N et d'autres matériaux, le cuivre, le verre et l'argent, qui chacun retourneront dans leur circuit de valeur. Elle permet d'alléger les contraintes sur les métaux critiques que sont le cuivre et l'argent (**Figure 17**).

La **Figure 17** indique l'évolution de la quantité de déchets de l'activité photovoltaïque en Europe. Si la forte croissance en est l'information fondamentale, il faut aussi remarquer la faiblesse de la part de la France en comparaison de celle de l'Allemagne et du reste de l'Europe. Les résultats présentés dans ce chapitre mettent tout de même en relief la présence des laboratoires et des jeunes industries françaises dans le domaine.

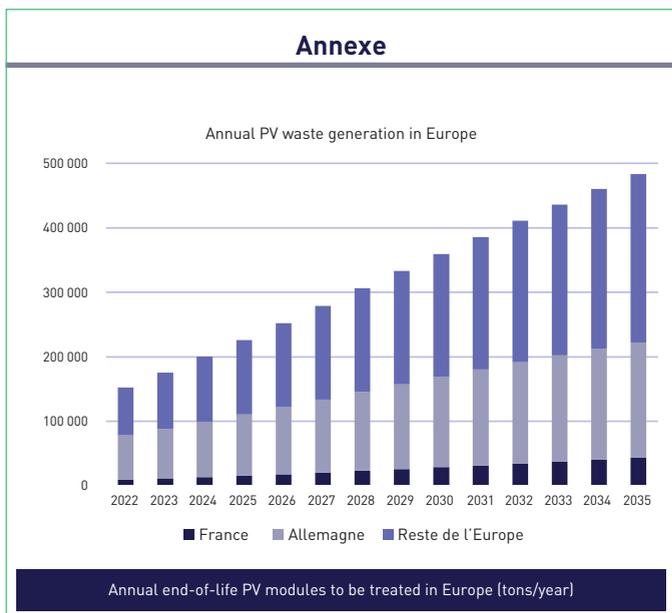


Figure 18

Quantité de déchets annuelle due aux panneaux photovoltaïques en fin de vie en Europe en fonction du temps (exprimée en tonnes par an).

Partie 3

Problématique du recyclage
et de l'économie circulaire
des matériaux de grande
diffusion

Recyclage de l'aluminium : enjeux, défis et opportunités

Fanny Mas, Ingénieure Recherche et Développement en métallurgie chez Constellium

Introduction

Commençons par une rapide présentation de l'entreprise Constellium et de son centre de recherche. Ensuite nous regarderons les sources d'émissions de gaz à effet de serre dans l'ensemble du cycle de vie de l'aluminium et en quoi le recyclage a un rôle clé à jouer. Nous finirons par un focus sur un domaine particulier qui est l'automobile et les défis de la mise en place d'une économie circulaire dans ce domaine.

Constellium est l'une des multiples émanations d'un groupe

historique français, Pechiney¹. Aujourd'hui, Constellium c'est 12 500 employés répartis en 28 sites de production et 3 centres de recherche, majoritairement en Europe et aux États-Unis, avec un chiffre d'affaires de l'ordre de 8 milliards d'euros. Constellium conçoit et développe des produits et des solutions pour une variété de marchés en partenariat avec ses clients et pratique aussi le recyclage.

1. Ancien groupe français spécialisé dans l'électrometallurgie et le traitement de l'aluminium disparu en 2003.

Les différents types de produits vendus par Constellium sont résumés sur la **Figure 1** : les produits laminés, les bobines qui vont ensuite servir à la construction d'une pièce de carrosserie automobile par exemple, et aussi des produits extrudés qui peuvent servir à une structure dans une aile d'avion ou dans des composants automobiles. Nous reviendrons sur le recyclage plus en détail.

Nos grands secteurs d'activité sont (**Figure 2**) : l'emballage (avec notamment la canette), l'automobile, l'aéronautique, et de façon plus générale, l'industrie. Nos clients sont les principaux constructeurs automobiles, les fournisseurs de boîtes boissons, de sodas ou de bières et les constructeurs aéronautiques et aérospatiaux. Le centre de recherche (**Figure 3**), situé en France, près



Figure 1

Principaux matériaux produits et recyclés chez Constellium.

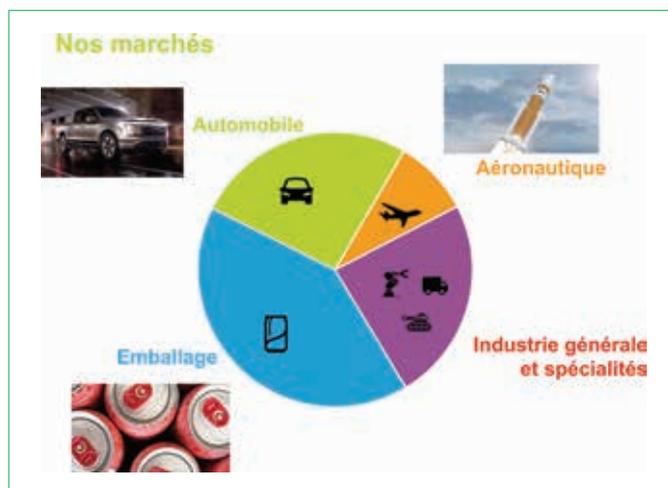


Figure 2

Les différentes branches d'activité de Constellium.



Figure 3

La recherche technologique chez Constellium.

de Grenoble, a deux antennes : une antenne sur le sol américain, dans le Michigan, et une antenne en Angleterre. La Recherche représente 230 salariés et un portefeuille de brevets de l'ordre de 225 familles de brevets². Nous développons des nouveaux produits (des nouveaux alliages), nous améliorons les procédés de fabrication, nous caractérisons les matériaux et nous fournissons un support technique à l'ensemble de nos usines. Nous avons aussi toute une partie de développement technologique sur les procédés de nos clients, et en collaboration avec eux : soudage, assemblage et mise en forme.

2. Brevets portant sur le même type d'innovation (parties d'un même procédé, d'un même produit).

1 Principales sources d'émissions de gaz à effet de serre dans le cycle de vie de l'aluminium

Le cycle de vie de l'aluminium est résumé sur la *Figure 4*. On part du minerai qui est bien connu : la bauxite³. Ensuite, il y a une étape d'affinage qui permet d'obtenir l'alumine (une combinaison d'oxygène et d'aluminium) puis une étape d'électrolyse⁴ qui permet de passer de l'oxyde au métal aluminium. Enfin, pour faire

3. Bauxite : roche sédimentaire blanche, rouge ou grise, caractérisée par sa forte teneur en alumine Al_2O_3 et en oxydes de fer.

4. Électrolyse : méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique.

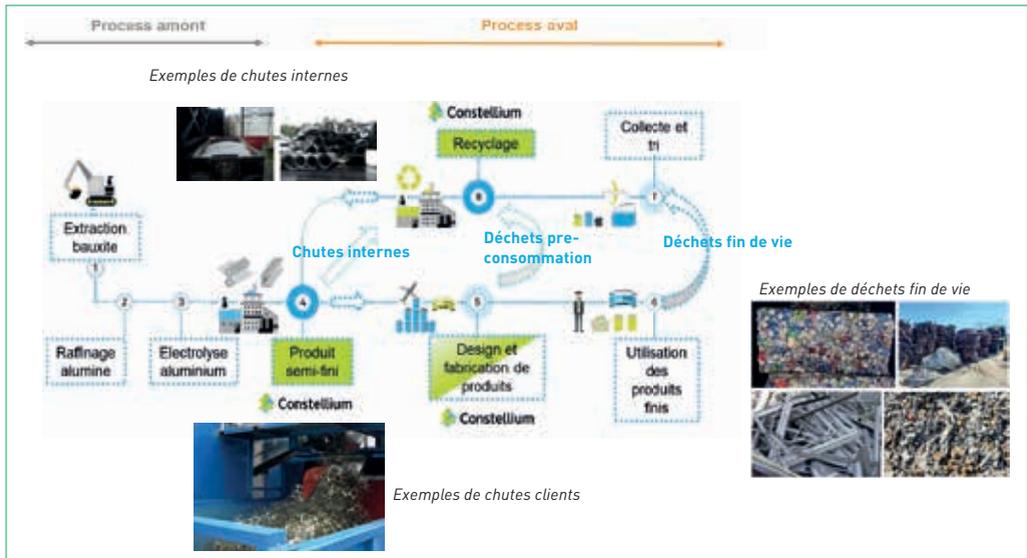


Figure 4

Positionnement de Constellium le long de la chaîne de valeur de l'aluminium.

un produit qu'on appelle semi-fini, on peut combiner de l'aluminium primaire (qui provient du minerai), et de l'aluminium secondaire qui provient de la boucle à droite (c'est-à-dire des différentes chutes qu'on va pouvoir récupérer lors du cycle de vie de l'aluminium).

Le premier type de chutes sont nos chutes internes issues de nos procédés de fabrication qui sont incorporées dans la fabrication des produits. Le second type de chutes, que l'on appelle les déchets pré-consommation, provient des chutes de nos clients (Figure 4). Par exemple, lors de la livraison d'une bobine, vont avoir lieu des étapes de découpe et de mise en forme : ces étapes conduisent à des chutes qui peuvent être elles aussi réutilisées dans le procédé. *Le plus important, ce sont les déchets fins de vie dont*

beaucoup sont bien connus : la canette en aluminium, les câbles électriques ou les profilés bâtiments (par exemple les profilés de fenêtres). Nous reviendrons sur l'aluminium issu de pièces automobiles usagées plus tard.

Constellium n'intervient pas sur la partie extraction de la bauxite, affinage de l'alumine et électrolyse, nous achetons l'aluminium primaire et nous y incorporons des éléments d'alliages tels que le silicium, le magnésium, le cuivre, le zinc...

L'empreinte carbone de la production de l'aluminium primaire (Figure 5) est importante. Pour donner un ordre de grandeur, le monde de l'aluminium représente 2% des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale, avec une moyenne de 17 tonnes

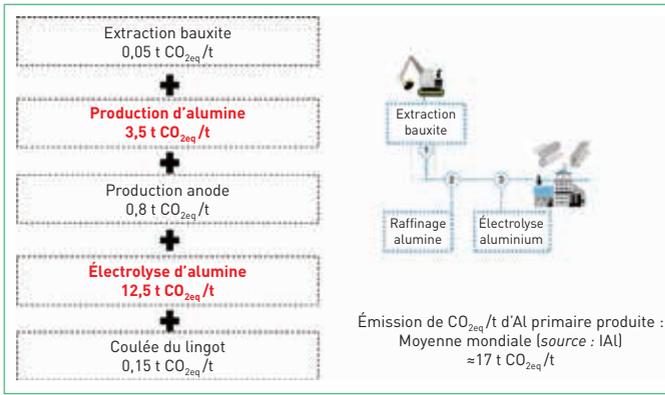


Figure 5

Empreinte carbone de la production d'aluminium primaire.

d'équivalent CO₂⁵ (noté T_{éq}/t dans la suite) par tonne d'aluminium produite.

L'électrolyse de l'aluminium est un procédé particulièrement énergivore qui, suivant la source d'énergie qui va être utilisée, émet une quantité significative de CO₂.

L'empreinte carbone de l'aluminium est donc dominée par le contenu en CO₂ du métal arrivant en amont de nos productions (Figure 6). Nos procédés internes, c'est-à-dire les émissions de CO₂ à la sortie de nos usines et l'électricité que nous consommons, sont bien plus faibles, comme représenté par la taille du petit rond orange de la figure ci-après.

Dans l'industrie, on divise les émissions de CO₂ en trois scopes. Le scope 1, ce sont les émissions à la sortie des

5. Tous les gaz à effet de serre n'ont pas le même impact sur le réchauffement de l'atmosphère. Dans un souci de compréhension, on standardise en fonction du pouvoir de réchauffement d'une molécule de dioxyde de carbone. Par exemple, si une tonne d'un gaz X a une capacité de réchauffement quatre fois plus grande que le CO₂, elle équivaldra à 4 tonnes d'équivalent CO₂.

usines. Le scope 2, c'est l'électricité consommée, et le scope 3 représente tous les achats. Dans notre cas, nous achetons de l'aluminium primaire qui provient de l'électrolyse. C'est donc ce scope 3 qui domine le contenu CO₂ du métal final livré à nos clients.

Le groupe Constellium s'est engagé à une réduction des émissions de CO₂. Nous sommes aujourd'hui en moyenne à 5 T_{éq}/t. Notre objectif est de passer à 3,5 T_{éq}/t,

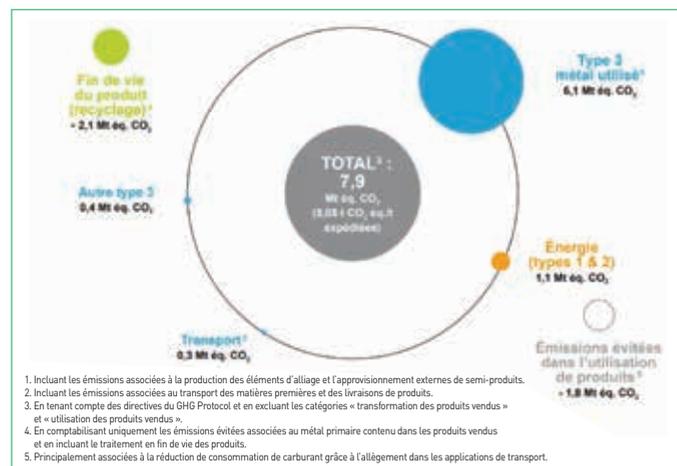


Figure 6

L'empreinte carbone de Constellium.

ce qui inclut nos achats de matières extérieures. La tenue de cet objectif passe notamment par une augmentation du recyclage avec un minimum de 50 % d'aluminium utilisé issu des process de recyclage en 2030.

2 Le rôle clé du recyclage de l'aluminium

2.1. L'impact de l'aluminium primaire sur l'environnement

Le graphique de la *Figure 7* donne l'empreinte carbone par tonne d'aluminium primaire en fonction de son procédé de production. On retrouve les 17 Téqu/t de la moyenne mondiale (barre orange), même si cela va varier en fonction du pays dans lequel l'aluminium primaire est produit et de la source d'électricité utilisée pour cette production. On voit que, même quand on utilise une énergie décarbonée (par exemple sur l'usine de Dunkerque), on émet tout de même 4,5 Téqu/t (barre bleue). Mais quand on recycle (refusion de chutes), on passe de 17

à 0,5 Téqu/t (barre verte) et on réduit de 95 % les émissions de dioxyde de carbone, ainsi que l'énergie utilisée.

Le recyclage est un objectif clé pour l'aluminium étant donné ce gap⁶ d'émission de CO₂ entre la production primaire et le recyclage. La comparaison entre l'énergie utilisée pour la production primaire de différents matériaux et l'énergie utilisée pour recycler ces matériaux est représentée sur la *Figure 8*. Nous voyons que l'aluminium est le matériau pour lequel, parmi les matériaux courants, la différence est la plus importante. C'est lié au fait que l'aluminium a une forte affinité pour l'oxygène. Ainsi, lors de l'étape d'électrolyse, pour passer de l'alumine à l'aluminium, il va falloir séparer l'aluminium de l'oxygène et cette étape est très énergivore. À l'inverse, l'aluminium a un bas point de fusion, c'est-à-dire que quand il faut le refondre pour le recycler, il suffit de le chauffer à une température entre 600 et 700 °C. Ainsi, la consommation énergétique liée à l'étape

6. Gap : écart.

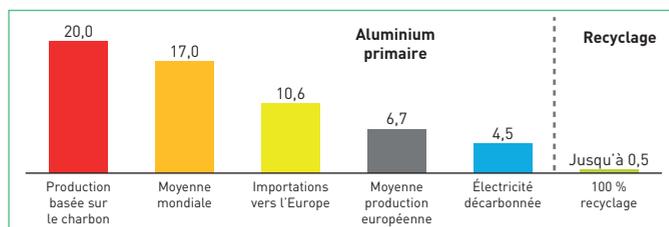


Figure 7

Émissions de gaz à effet de serre de la production d'aluminium primaire et du procédé de recyclage en tonne d'équivalent CO₂ par tonne d'aluminium produit (Téqu/t).

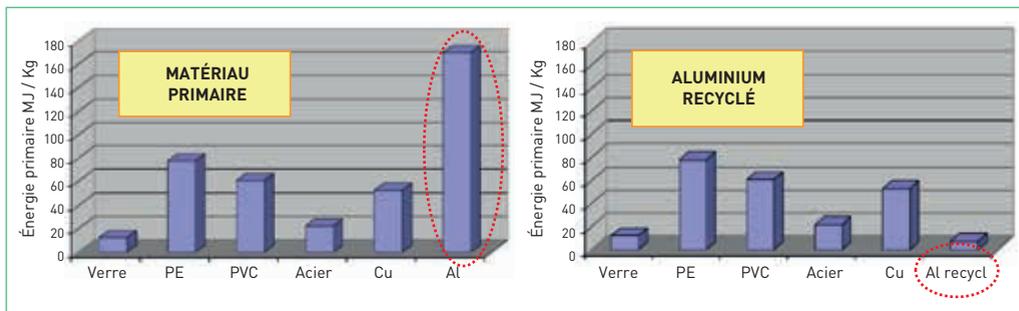


Figure 8

Différence d'énergie utilisée par les matériaux primaires et recyclés.

de recyclage est relativement faible. **Le recyclage est vraiment la pierre angulaire de la diminution des émissions de CO₂ dans le domaine de l'aluminium.**

Le recyclage des canettes

Regardons l'exemple de la canette en aluminium. Le taux de collecte des canettes en Europe est de 80 %. La France est un mauvais élève parce qu'elle n'en collecte que 60 %. Dans beaucoup de pays il y a une consigne sur la canette en

aluminium et ces canettes sont collectées séparément des autres déchets. Globalement, quand elles sont ainsi collectées, elles peuvent être directement compactées (Figure 9) et envoyées dans nos fours de recyclage. Pendant le cycle de fusion, il y a une étape qui permet d'éliminer les peintures et les vernis, on obtient ensuite un lingot (Figure 10). Ce lingot peut servir à refabriquer le corps de la canette en aluminium. Ce cycle de recyclage fonctionne bien et tend vers un



Figure 9

Aluminium compacté.

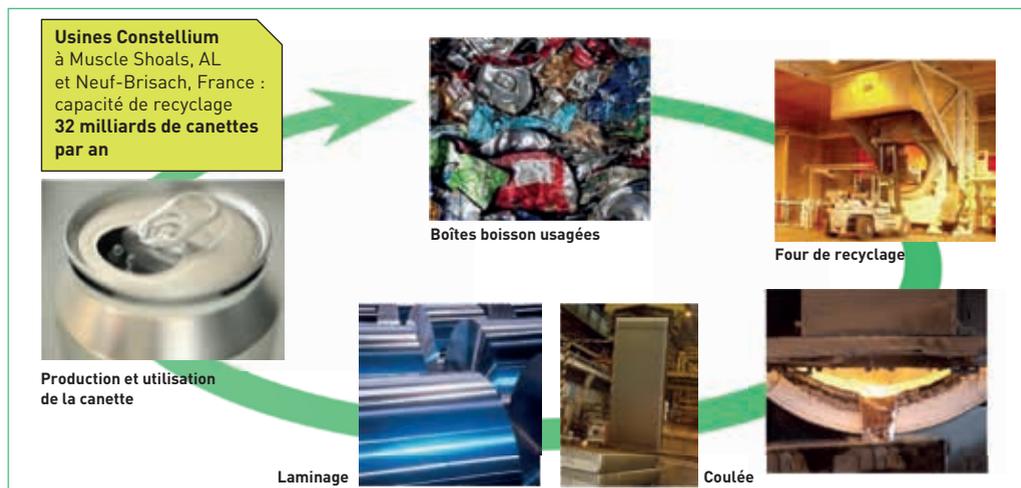


Figure 10

Canettes en aluminium : cycle de recyclage de l'aluminium.

recyclage infini (ce n'est pas le cas forcément des autres domaines).

Dans le cas des canettes, le challenge est l'investissement : il faut investir sur les capacités de recyclage, et plus particulièrement sur les fours de recyclage. Sur notre site production en Alsace, il y a un chantier de construction d'un nouveau centre de recyclage (*Figure 11*). L'objectif est de pouvoir accueillir 135 000 tonnes supplémentaires de produits recyclés et ainsi éviter 400 000 tonnes d'émissions de CO₂ sur ce site. Les avantages seront la diminution de la dépendance à l'électrolyse, et la diminution du contenu CO₂ de nos produits en réponse aux attentes environnementales de nos clients, ainsi qu'une diminution des coûts de production et une meilleure efficacité énergétique. Le début de la production pour ce nouveau centre de recyclage est prévu pour septembre 2024.

2.2. Les enjeux du recyclage de l'aluminium

Le recyclage de l'aluminium peut parfois être limité par la présence d'impuretés ainsi que le mélange des familles d'alliages.

Il y a deux gros challenges à résoudre qui sont la séparation de l'aluminium par famille d'alliages et l'élimination de la contamination. Le pire ennemi est le fer, or l'acier est abondant dans un certain nombre de produits. Regardons l'exemple de la *Figure 12*, à gauche : c'est une image au microscope électronique à balayage⁷ d'un produit en aluminium. Ce qui figure en blanc et en noir est ce qu'on appelle des phases intermétalliques. Comme le fer n'est pas très

7. Microscope électronique à balayage : technique de microscopie qui utilise un fin faisceau d'électrons capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon.



Figure 11

Usine de recyclage d'aluminium en construction.

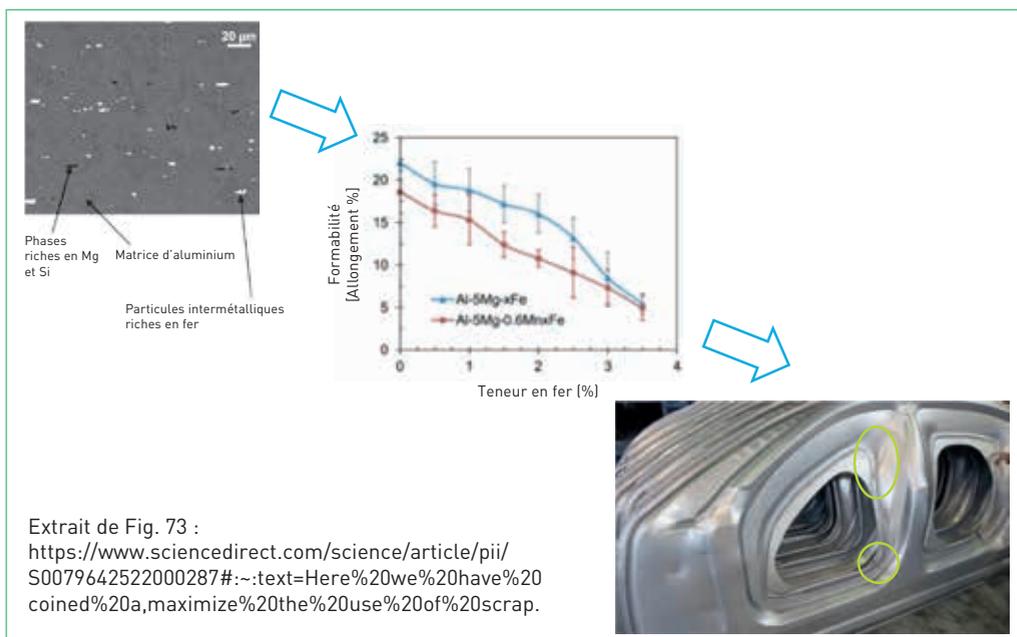


Figure 12

Conséquence de la présence de fer dans les alliages d'aluminium.

soluble dans l'aluminium, il s'agglomère pour former ces phases intermétalliques qui, ensuite, peuvent donner lieu à des sites d'endommagement lors de la sollicitation mécanique du matériau. On voit la conséquence sur la **Figure 12**, à droite, le produit final qui est un côté de caisse automobile qui a été embouti et qui présente des fissures.

De plus, un certain nombre de produits doivent répondre à des caractéristiques mécaniques de ductilité⁸ et de mise en forme importantes, qui peuvent dépendre de la pureté de l'aluminium : il va donc falloir focaliser nos efforts sur la décontamination lors du recyclage.

8. Ductilité : capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre.

3 Le challenge de l'économie circulaire pour l'aluminium de l'automobile

3.1. L'aluminium dans les véhicules légers

Dans l'automobile, la situation est très différente de la situation de la canette mentionnée précédemment. Dans l'automobile, on utilise beaucoup d'alliages d'aluminium différents, ce sont des produits plus complexes qu'une canette. On a deux grandes familles d'alliages d'aluminium :

- **Les alliages moulés créés par des procédés de moulage.**

Ces alliages sont actuellement très présents dans l'automobile parce qu'ils sont utilisés dans toutes les pièces du bloc motopropulseur d'un véhicule thermique. Il y a deux types

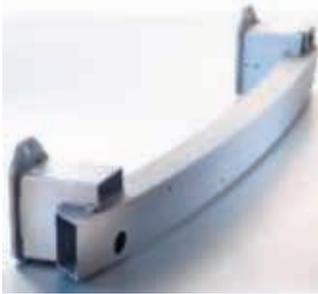


Figure 13

Poutre de pare-chocs.

d'alliages de moulage. On va trouver *des alliages de moulage secondaires* qui peuvent tolérer beaucoup d'impuretés, car ils sont utilisés pour des pièces qui sont peu sollicitées mécaniquement (c'est le cas par exemple d'un caisson d'un moteur thermique).

Au contraire dans le cas des roues ou des pièces de structure, on utilise *des alliages de moulage primaires* qui vont avoir peu de tolérance aux impuretés. Ces alliages sont des mélanges d'aluminium et de silicium, pouvant contenir jusqu'à 10-12 % de silicium. Constellium ne travaille pas sur ce type d'alliage.

- La deuxième famille est celle des **alliages corroyés** qu'on retrouve plutôt sur tous les ouvrants, parmi lesquels les portières, les capots, les poutres de pare-chocs comme celle qui est représentée

Figure 13 ou certaines pièces de structure. Ces pièces sont fabriquées avec d'autres alliages que les pièces moulées. Certes, on a toujours majoritairement de l'aluminium, mais on a aussi du magnésium pour la famille 5xxx, ou pour la famille 6xxx des mélanges silicium et magnésium.

Le challenge pour recycler l'aluminium du véhicule est non seulement de l'extraire au milieu de tous les autres éléments qui sont présents (verre, plastique, acier, autres matériaux métalliques), mais aussi de faire ensuite une séparation par famille d'alliage.

Malheureusement, les alliages corroyés sont peu tolérants aux alliages de moulage. À l'inverse, les alliages de moulage de seconde fusion peuvent absorber les alliages corroyés, mais ce n'est pas le cas dans l'autre sens (**Figure 14**).

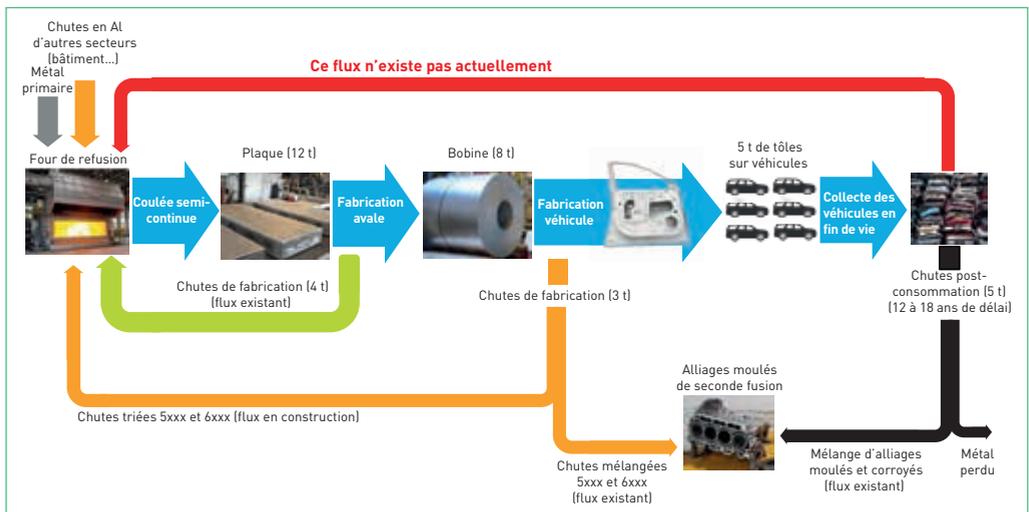


Figure 14

État du recyclage de l'aluminium dans l'automobile.

3.2. Le recyclage de l'aluminium dans l'industrie automobile (Figure 14)

Aujourd'hui, nos fours de fusion sont alimentés, soit par du métal primaire, soit par des déchets de fin de vie. Mais ces déchets de fin de vie ne viennent pas de l'automobile, ce sont des déchets issus du bâtiment ou issus de câbles. Ces déchets sont coulés en lingots et les chutes de fabrication reviennent dans le four de fusion.

Ensuite, la bobine qui est obtenue va être livrée chez le constructeur automobile qui va la mettre en forme et la découper pour en faire par exemple une portière. À ce moment-là, il y a des chutes de fabrication. Le flux retour des chutes entre les constructeurs automobiles et les fabricants d'aluminium est en train de se mettre en place, notamment parce que certaines lignes traditionnelles des constructeurs automobiles ne font pas l'objet de tri entre familles d'alliages (5xxx et 6xxx mélangés). En effet, pour une même pièce de carrosserie par exemple, on peut avoir un alliage 5xxx pour la partie interne et un alliage 6xxx pour la tôle externe. Quand les chutes sont mélangées, elles retournent dans les alliages de seconde fusion, elles sont certes recyclées, mais pour une application différente à moindre valeur ajoutée.

Enfin, le véhicule en fin de vie représente un dernier challenge : il compte parmi les déchets qu'on appelle post-consommation. Lorsque le véhicule est broyé, on sépare l'aluminium des autres matériaux ; par contre, tous

les mélanges d'aluminium retournent dans les alliages de moulage de seconde fusion. L'enjeu est d'être capable d'extraire les alliages corroyés des véhicules pour les réinjecter dans nos fours.

3.3. Perspectives pour le futur du recyclage (Figure 15)

Nous avons un projet en cours de construction, avec l'ADEME⁹ et l'Écosystème du recyclage automobile, pour récupérer les alliages corroyés sur les véhicules en fin de vie. Sachant que leur part ne fait qu'augmenter, à l'avenir les quantités à traiter vont être de plus en plus importantes. Globalement, nous voulons travailler sur deux types de filière, en collaboration avec des partenaires.

La filière traditionnelle est celle du broyage du véhicule et du traitement du résidu d'aluminium après séparation d'avec les autres matériaux¹⁰. Nous travaillons avec des techniques de tri type laser pour séparer les différentes familles d'alliages d'aluminium, notamment pour récupérer la famille 6xxx qui nous intéresse particulièrement.

Avec un partenaire français appelé l'Indra, qui est spécialisé dans le démantèlement des véhicules, nous voulons tester une autre filière basée sur le démontage. Plutôt que de mélanger et de broyer la voiture, nous souhaitons aller chercher spécifiquement les pièces en aluminium. Notre projet a pour but d'évaluer la faisabilité technique et l'intérêt

9. ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

10. Ce résidu est appelé « twitch ».

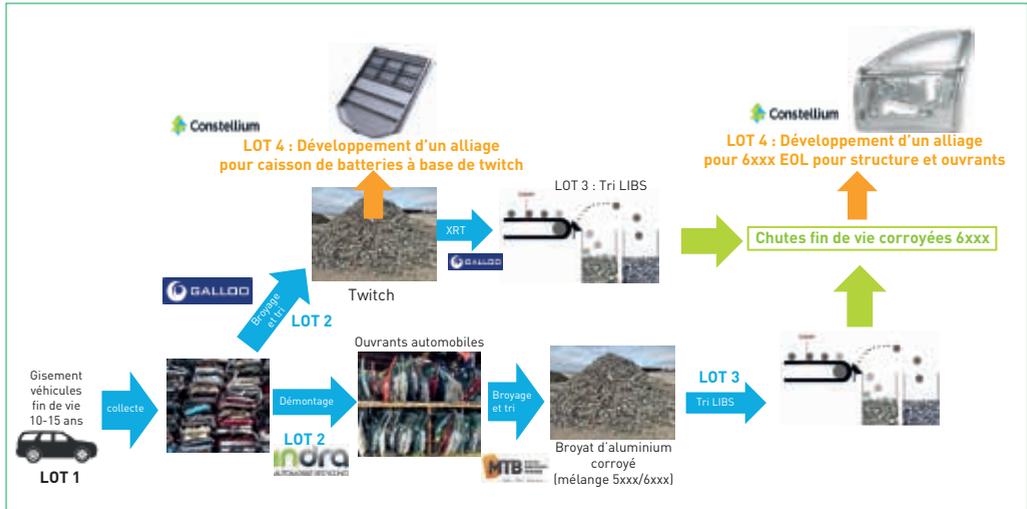


Figure 15

Les différents projets de Constellium pour la circularité de l'aluminium.

économique de ces deux filières et de les comparer.

Avec une croissance des véhicules électriques pour lesquels la demande en alliage de moulage de seconde fusion va être bien moindre, on devrait se retrouver avec un surplus de ce type de déchets. Ainsi, l'idée est de développer des alliages

plus tolérants aux impuretés, plus compatibles avec ce type de matériaux d'entrée. Une application possible concerne le caisson de la batterie du véhicule électrique. Nous travaillons sur des modèles qui seraient capables d'avoir des hautes teneurs en aluminium de recyclage à partir de ce type de mélange.

Conclusion

Dans la filière de l'aluminium, augmenter le contenu recyclé du métal est la façon la plus rapide, la plus simple et la moins consommatrice d'énergie pour réduire l'empreinte carbone des produits. C'est une combinaison unique d'opportunités et de challenges.

La culture du recyclage est déjà bien développée (avec une excellente recyclabilité intrinsèque) et présente un bénéfice économique clair.

En revanche, le concept d'économie circulaire doit être étendu à l'ensemble des marchés avec le challenge d'atteindre les exigences de performance des produits finis.

Constellium est actif pour aborder ces défis aussi bien sur la partie investissement industriel qu'au niveau R&D avec de multiples actions :

- développement d'alliages plus tolérants aux impuretés et aux variations de composition ;
- écodesign en partenariat avec les constructeurs pour faciliter le recyclage en fin de vie (composants mono alliage notamment) ;
- amélioration des techniques de tri avec les spécialistes du tri, et optimisation de la préparation des chutes avant refusion avec les récupérateurs.

Recyclage du verre plat

Jean-Christophe Arnal, docteur en génie des procédés¹ et directeur de l'usine de fabrication du verre plat sur le site Saint-Gobain d'Aniche-Émerchicourt.

Introduction

Nous allons commencer par une introduction sur le verre : qu'est-ce que le verre, comment le fabrique-t-on, quels sont les polluants associés, et comment les appelons-nous ? Ensuite, nous aborderons la collecte du verre plat, en faisant un parallèle avec l'emballage, notamment les bouteilles. Enfin, on donnera des informations sur le processus de recyclage du verre plat, avec un point sur la Responsabilité élargie des producteurs (REP²).

1. Discipline visant à concevoir, optimiser et contrôler les opérations industrielles.

2. Responsabilité élargie des producteurs : principe selon lequel les producteurs sont tenus responsables de la gestion des déchets générés par leurs produits tout au long de leur cycle de vie.

1 Le verre et sa fabrication

1.1. Qu'est-ce que le verre plat ?

Le verre est un solide obtenu par le refroidissement rapide d'un mélange de dioxyde de silicium et de fondants à l'état liquide. Il s'agit d'un matériau amorphe ; il n'y a pas de phase cristalline interne. Le verre qui nous intéresse ici est le verre sodocalcique donc à base de soude. Il existe différents types de verre, celui-ci est utilisé à la fois pour le verre plat, l'emballage (bouteilles) et dans une certaine mesure pour les fibres d'isolation (**Figure 1**).

Les principaux matériaux de structure constituant les verres sodocalciques sont la silice, l'alumine, le calcium, la



Figure 1

Deux exemples d'utilisation du verre sodocalcique, panneaux de verre plat en sortie d'usine ; bouteilles.

magnésie et la soude. Les deux principaux restant la silice, le matériau de base, et la soude, utilisée comme fondant³ pour diminuer les températures de fusion du procédé et permettre ainsi des économies de gaz. La **Figure 2** indique les compositions de ces matériaux dans les verres sodocalciques.

À ces matériaux sont ajoutés des colorants, essentiellement du **fer**, du **cobalt** ou du **sélénium**, dont les quantités, beaucoup plus faibles, s'expriment en ppm⁴ (gramme par tonne). Le fer produit essentiellement des couleurs vertes, mais peut aussi tirer vers le jaune ou le bleu. Le cobalt donne une teinte bleue, et le sélénium, rouge. Chaque produit a une cible colorimétrique

qui lui est dédiée, visible ci-après (**Figure 3**). L'impact du colorant peut être observé en examinant la tranche du verre, en raison de l'effet de la transmission. Si vous prêtez attention aux verres que vous avez chez vous, ils sont généralement légèrement verdâtres même s'ils semblent clairs et transparents.

Le verre est un matériau recyclable à l'infini car il n'est pas dégradé par les opérations de recyclage : même qualité optique, même performance mécanique, même durabilité. Si l'on prend une plaque de verre, qu'on la casse et qu'on la remet dans le four pour fusion, on retrouve une plaque de verre identique.

On distingue deux types de recyclage pour le verre plat dans l'industrie verrière :

1) pour refaire du verre plat, donc en boucle fermée (économie circulaire) ;

	Verre sodocalcique
SiO ₂	60-75 %
Al ₂ O ₃	1 %
CaO	5-12 %
MgO	4 %
Na ₂ O	12-16 %

Figure 2

Composition de base du verre sodocalcique (en %).

3. Substance utilisée pour abaisser le point de fusion d'un mélange, souvent dans la métallurgie.

4. Partie par million (0,1 % équivaut à 1 000 ppm).

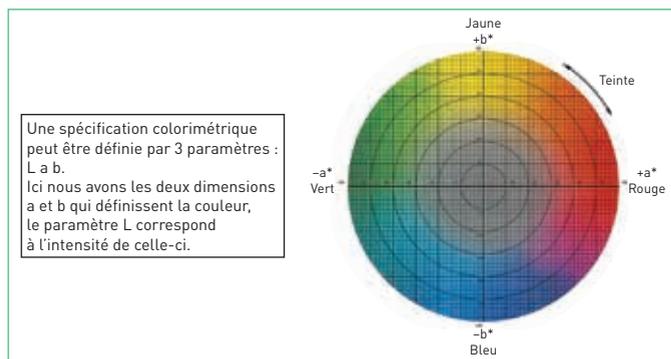


Figure 3

Paramètres a et b d'une cible colorimétrique (référentiel L a b).

2) pour fabriquer des bouteilles ou des fibres d'isolation ; pour ces opérations, il peut être mélangé à du verre cassé de toutes origines.

1.2. Comment fabriquer le verre plat ? (Figure 4)

Pour fabriquer du verre plat, on commence par assembler des matériaux de base : principalement le sable, le calcaire, la dolomie⁵, le carbonate de soude. On ajoute ensuite du calcin (c'est-à-dire des morceaux de verre provenant d'objets cassés de différentes origines). On soumet ensuite ce mélange à une étape de fusion, essentiellement par la combustion de gaz naturel. Pour un site de verre plat, la température du four est de l'ordre de 1 500 °C et l'opération représente 90 % de la consommation énergétique du site. Un ordre de grandeur important : le

débit de verre pour une ligne de verre plat est d'à peu près 600 tonnes par jour, ce qui représente autour de 200 000 tonnes par an de production de verre plat.

La fusion produit un liquide que l'on vient ensuite former. Ceci se fait en déposant le liquide à la surface d'un bain d'étain en fusion. Comme de l'huile sur de l'eau, il flotte, puis on l'étire par un rouleau à la sortie du bain. Il se comporte comme du chewing-gum : plus on tire fort, plus la couche va être mince au milieu, moins on tire fort, plus elle va être épaisse. Afin d'avoir un bon profil d'épaisseur, on a des équipements sur le côté, les *top rolls*⁶, qui vont venir tirer le bord de la feuille de verre ou la repousser au milieu, afin d'avoir un profil d'épaisseur constant sur toute la largeur du verre. Quand on fait fonctionner la *top roll*, qui est une roue dentée, on entame le verre et on génère du déchet obligatoire.

5. Roche carbonate contenant du magnésium, utilisée comme matière première dans l'industrie des matériaux de construction.

6. Rouleaux supérieurs.

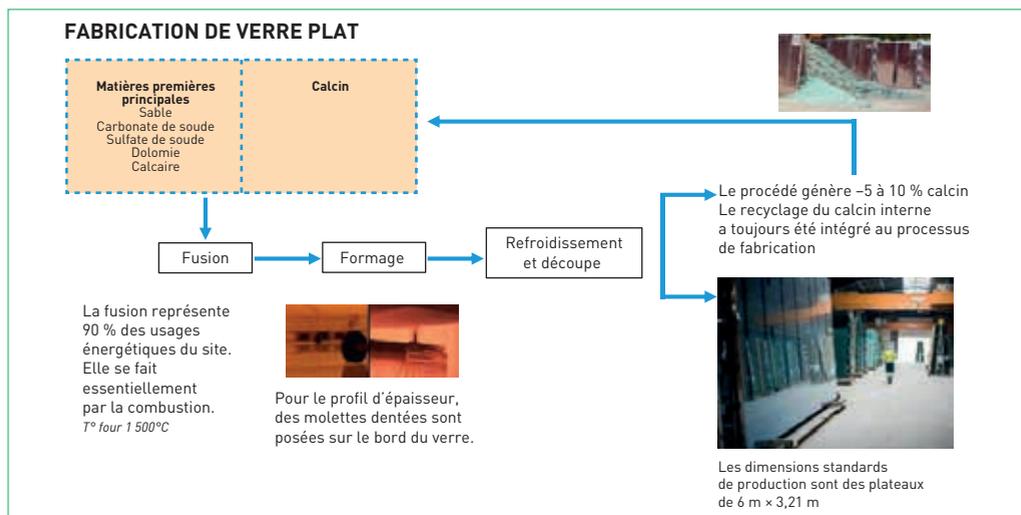


Figure 4

Processus de fabrication du verre plat.

La phase suivante est le refroidissement et la découpe en plaques de tailles standardisées. Un plateau de verre standard mesure 6 mètres par 3,21 mètres, à peu près 20 m², et on produit des piles de plateaux qui vont de 3 à 10 tonnes suivant les clients. Une deuxième sortie du procédé correspond aux pertes générées par les opérations : les traces des marques des *top rolls* ainsi que les effets de corrections de défauts exigées par la qualité voulue du verre final. Ceci génère donc déjà 5 à 10 % de calcin sur notre procédé. Généralement, une ligne de verre clair va avoir entre 5 et 20 % de calcin qu'elle va utiliser en boucle fermée, c'est ce qu'on appelle le calcin interne (Figure 4).

1.3. La réutilisation du calcin

Pour fabriquer une tonne de verre sans utiliser de calcin,

on utilise 1,2 tonne de réactifs : du sable, du carbonate de soude, du calcaire, dolomie, feldspath⁷ ou autres. La combustion fait qu'environ 20 % de la masse des réactifs est évacuée sous forme d'émissions de CO₂ provenant essentiellement du carbonate de soude et du calcaire.

En revanche, quand on utilise du calcin, on n'utilise pas toutes ces matières premières et, par ailleurs, on a besoin de moins d'énergie pour la fusion. Cela diminue les émissions de CO₂ pour l'étape de fusion (Figure 5).

L'utilisation de calcin permet de diminuer l'utilisation de matières premières, dont on sait qu'elles sont aujourd'hui « en tension ». Un ordre de grandeur : une ligne de

7. Minéral silicaté abondamment utilisé dans la fabrication de céramiques et de verre.



Figure 5

Impact environnemental du recyclage du verre dans les deux voies – avec ou sans calcin.

600 tonnes de verre par jour demande 2 300 tonnes de sable par semaine. C'est du sable de carrière, du calcaire de carrière, de la dolomie de carrière... Par l'utilisation du calcin, la tension sur les matériaux de carrière est fortement allégée. Il en est de même de la tension sur l'environnement, l'utilisation du calcin permettant de réduire la consommation énergétique et donc l'impact final, l'émission de CO_2 .

Le calcin présente en revanche certains inconvénients dus à la présence des impuretés qui le polluent. Elles peuvent impacter à la fois la couleur, les propriétés optiques ou la présence de défauts, solides ou gazeux. Il est difficile de contrôler finement le calcin lors de sa réception. Nos procédés à base de calcin sont typiquement dimensionnés à 120 tonnes par jour. Ils viennent par arrivages de camions de 20 tonnes, des volumes importants qui impliquent que la ségrégation et le contrôle soient réalisés en amont.

1.4. Les polluants du calcin

Abordons quelques types de pollution du calcin.

L'exemple de la vitrocéramique. La vitrocéramique n'est pas vraiment du verre : elle fond à 1 700 degrés environ, mais si on en recycle un morceau, on s'aperçoit qu'on n'arrive pas à le fondre. Des défauts restent au milieu de la plaque et il devient donc un infondu.

Le cas de l'aluminium. Dans nos opérations, il ne provient pas de canettes, mais souvent des séparateurs en aluminium situés entre les plaques de verre dans le double vitrage. Suivant les cas, on se retrouve avec des baguettes ou des morceaux de baguettes d'aluminium et l'aluminium réagit pendant la fusion. Il cause une réduction locale de la silice qui produit du silicium métal sous forme de billes ainsi qu'un dégagement gazeux important. On a donc là une crise à la fois solide et gazeuse (Figure 6).

Bien sûr, il y a d'autres types de pollution... les porcelaines, les



Figure 6

Exemples de pollution par la vitrocéramique (gauche) et par les billes de silicium (droite) formées par l'aluminium (milieu).

métaux, les meules abrasives, les pierres, le blé, tout ce qui est végétal qui peut nous arriver par les transports en camions.

Pourquoi une pollution est-elle problématique ? Dans un four de verre en fusion, on a à peu près 1 200 tonnes de verre pour un débit de l'ordre de 600 tonnes par jour. Avant le début de la perception d'une crise de pollution, il se passe 7 à 10 heures. Ensuite il faut plusieurs jours de temps de purge (Figure 7). Pendant 3 à 4 jours on ne produit donc rien. Les effets dépendent des types de crises : par exemple, si on prend une meule abrasive qui va passer au milieu du verre en fusion, on ne peut pas fondre les grains de corindon qui vont donc être recyclés à travers le calcin. On sera obligé d'isoler toute la partie de calcin produite à ce moment-là ; elle sera perdue car on ne sera pas capable de la fondre de nouveau.

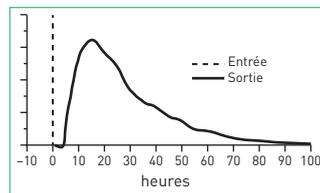


Figure 7

Flux d'entrée et de sortie d'un réacteur déclenché par une crise de pollution.

2 La collecte du verre

2.1. L'exemple de l'emballage

Un exemple de collecte du calcin est l'emballage : tout ce qui est bouteille, pot, flacon... Cette collecte a démarré dans les années soixante-dix, juste après le premier choc pétrolier. Pourquoi ? Parce que plus de calcin, c'est moins d'énergie dépensée ; il y avait donc vraiment un gain sur le sujet. En 2019, les acteurs de la chaîne se sont réunis et ont défini un projet pour aller vers 90 % de réutilisation du verre d'ici 2025 et 100 % en 2029. Ce sont de vrais défis puisqu'on n'est aujourd'hui qu'à 76 % de recyclage sur l'emballage.

La collecte est faite essentiellement par vous et moi, c'est le consommateur qui choisit sa poubelle et place sa bouteille à l'intérieur. Il y a eu un certain nombre de campagnes de sensibilisation ainsi que des démarches personnelles vers le recyclage des déchets ainsi qu'un maillage important des points de collecte : tout le monde a un point de collecte à côté de chez soi ou une poubelle qui y est dédiée (Figure 8).

Le calcin collecté est ensuite trié manuellement, mécaniquement, avec l'aide de détecteurs de métaux, de tris optiques, puis envoyé vers le



Figure 8

Point de collecte de verre.

point de la chaîne de recyclage où l'on fabrique les bouteilles, « l'usine de fonte de verre ». Un des problèmes du tri du calcin est que plus on le transporte et plus il va se casser, et fournir finalement des fines de calcin, des petits morceaux de quelques millimètres sur lesquels les détecteurs de métaux – et donc les tris – seront moins efficaces ; idem pour les tris optiques qui deviennent inopérants en dessous d'une certaine dimension. On n'est donc pas capables de connaître la composition des fines avec exactitude.

2.2. Le cycle de vie du verre plat

Le cycle du verre plat est présenté en **Figure 9**. Il distingue tout d'abord **une partie production** avec le calcin interne liée au processus. Vient ensuite

la partie « transformation » où sont formés les plateaux de 6 m par 3 m 21, dans lesquels les clients vont découper une fenêtre, une porte ou un vitrage. Les chutes de ces opérations fournissent des résidus

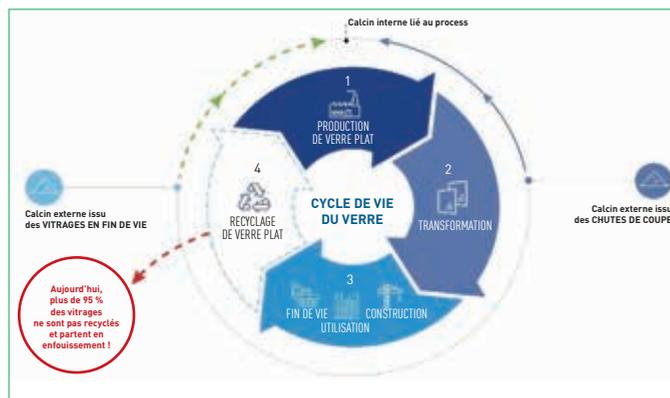


Figure 9

Cycle de vie du verre plat.

de coupes qui **constituent le « calcin externe »**. Ensuite interviennent les **parties de « construction » puis d'« utilisation »** dans lesquelles on installe la fenêtre, la porte ou le vitrage. Puis vient une **partie « fin de vie »** où l'on démolit ou change sa fenêtre en retirant l'ancien vitrage. **Enfin vient la partie « recyclage »** : on a retiré le vitrage, on récupère la vitre et on la renvoie vers l'usine de verre plat.

En 2020, seulement 5 % de verre était récupéré : le calcin en fin de vie. Le reste partait essentiellement en enfouissement. Au moment de la démolition, tout est mélangé : on ne fait pas le tri, on ne va pas chercher le verre, on casse tout pour l'enfouir. Sur les 5 %, le calcin de fin de vie, une bonne partie part sur la partie

emballage. La plus grande partie du verre récupéré vient donc de la collecte où se trouve la vraie difficulté pour le verre plat. Le calcin doit être propre pour être recyclé : un plateau de verre pèse entre 200 et 500 kg, et **quelques milligrammes de pollution au milieu obligent à casser le plateau**. Il faut donc qu'il soit propre et pour cela, il faut que l'intégrité du vitrage soit maintenue jusqu'au moment où l'on va commencer la partie recyclage.

2.3. La collecte du verre plat

La *Figure 10* présente quelques exemples de collectes : dans des bennes où le vitrage est maintenu constamment soit horizontalement, soit verticalement. Si les bennes arrivent



Figure 10

Exemples de collectes conformes et non conformes.

sous le format représenté sur les deux photos de droite, on ne pourra pas les recycler parce qu'on ne sera pas capable de les nettoyer correctement pour les amener sur un calcin recyclable par la suite.

La difficulté par rapport à l'emballage est que la collecte est réalisée par l'installateur, le cureur⁸ ou l'entreprise de dépose. Puisqu'il s'agit d'entreprises, se pose la question du coût des opérations : à quel point l'entreprise est-elle motivée pour venir séparer ce verre pour effectuer le tri du matériau, par rapport à un coût de simple mise en décharge. Aujourd'hui, un réseau de collecte est encore manquant. Cependant la situation est en cours de formalisation : il y a un besoin de structurer économiquement la filière, d'où la mise en place de la REP PMCB en France.

2.4. La mise en place de la Responsabilité élargie aux producteurs (REP)

Cette REP est très importante, car c'est elle qui va vraiment permettre le lancement de la filière. En 2017 a été voté un engagement pour la croissance verte relatif au recyclage du verre plat. Comme on l'a vu, il a finalement eu des effets moyens mais a permis de poser les filières, de comprendre quel était le marché et de savoir où on en était. En 2021 a été créée par décret la REP, une Responsabilité élargie aux producteurs pour la gestion des ressources naturelles et la collecte de tous

les déchets du bâtiment, avec la hiérarchisation des traitements pour les Produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment (PMCB). Elle concerne les matériaux de construction avec des sous-classes qui permettent de définir comment on doit les gérer. Des éco-organismes ont été définis et agréés et début 2023, le démarrage opérationnel de la filière a pu être acté.

Résumé de la REP. Elle part du « metteur au marché », la personne qui fabrique la vitre et va ensuite la vendre ; elle paye un éco-organisme à l'aide d'une éco-contribution, similaire, par exemple, à ce que l'on pratique pour l'électroménager. Ensuite, il y a l'installation du produit, puis la dépose par le détenteur du déchet, pour la filière, c'est généralement l'installateur au moment du remplacement ou le démolisseur, et enfin la gestion de fin de vie du produit. À ce moment-là, on a une reprise gratuite du déchet si les règles de tri ont été respectées, c'est-à-dire qu'on ne casse pas le verre mais on le remet sur châssis. L'éco-organisme va alors subventionner la déchetterie, le point d'enlèvement ou le collecteur, afin de séparer le verre, le placer proprement dans les bonnes bennes et retirer toute la partie encadrement de vitrage. Le déchet est ensuite envoyé vers le recycleur associé au « traiteur », qui vont fondre ce verre et le réutiliser.

Il ne faut pas oublier le rôle du « traiteur » qui est chargé de séparer les types de verre : le vitrage, les portes vitrées mais également d'autres types de verre. Il faut également retirer

8. Préparateur en démolition de bâtiments.

le vitrage de son cadre, broyer, cribler⁹ si besoin, alors que le recycleur, c'est celui qui va réutiliser.

2.5. Les types de vitrages utilisables

Quatre types de vitrage ont été identifiés pour faire un recyclage propre en boucle fermée.

La première catégorie est le vitrage clair ou extra-clair. On regroupe ici tout ce qui est simple vitrage, recuit ou trempé, il n'y a pas de différence. Dans un substrat clair ou extra-clair, selon le taux de fer à l'intérieur du verre, on va avoir des couleurs différentes : il y a deux gammes, une gamme qui est dite « diamant », extrêmement claire, et une autre « standard », qui est simplement claire et comporte ou non plusieurs couches. Les couches peuvent par exemple avoir été déposées par magnétron¹⁰ à la surface du verre pour donner des propriétés de contrôle solaire thermique. Il n'y a pas de problème de recyclage non plus pour les vitrages isolants comme le double vitrage.

La deuxième catégorie de verre est le vitrage teinté. On peut colorer le verre en bleu, en rose, en vert, en agissant sur un certain nombre d'oxydes métalliques. Il convient de séparer ces verres-là du verre blanc, parce qu'ils pollueraient le verre

blanc par les colorants et leur donneraient une teinte bleutée ou rosée, ce qui n'est pas acceptable. On a donc d'un côté le verre blanc et de l'autre côté les verres teintés. Globalement, on peut recycler ces verres suivant leur type de colorant dans des verres adaptés. Avec un verre rouge, on va pouvoir mettre du rouge, un verre bleu, on va pouvoir mettre du bleu, et un verre vert, on va prendre un verre vert. Si jamais il y a une pollution de verre teinté à l'intérieur du verre clair et qu'il est réutilisé, il y aura une dérive de la couleur et la couleur finale sera altérée.

Tout ce qui est miroir, vitrage émaillé ou laqué, peut également être recyclé dans les mêmes installations. Il faut juste vérifier le type d'émail qui est appliqué et l'utiliser en concentration faible pour s'assurer qu'il n'y a pas de montée de défauts. C'est **la troisième catégorie** de verre.

Quant au verre feuilleté, **la quatrième catégorie** de verre, ce sont deux plaques de verre mises en sandwich autour d'une couche de PVB¹¹. Après l'assemblage, l'ensemble est mis à cuire et passé à l'autoclave pour enlever les bulles. C'est le verre de sécurité, aussi utilisé pour le confort acoustique. Pour le recyclage, on doit prétraiter ce « sandwich » et on va le broyer, séparer le PVB et le verre. Le verre, on le réutilise directement, le PVB est envoyé vers des chaînes de valorisation dédiées. Même s'il reste un peu de PVB sur le verre, on est capable de le refondre.

9. Processus de séparation de particules indésirables du verre lors de sa production.

10. Type de cathode qui génère un champ magnétique et est souvent utilisé dans les procédés de dépôt physique en phase vapeur (PVD) pour appliquer des revêtements minces sur divers substrats, tels que le verre.

11. Poly(butyl acrylate), polymère thermoplastique de synthèse utilisé entre autres pour assembler les verres et fabriquer du vitrage feuilleté.

Conclusion

La difficulté pour le verre plat, c'est la collecte. C'est le point critique, car il faut avoir une qualité de verre très propre. On ne peut pas accepter de pollution à l'intérieur et chaque membre de la filière de traitement doit s'obliger à respecter un certain nombre de règles de tri. La REP a donné un cadre pour définir le travail et tout un réseau de collecte est en train d'être organisé pour le recyclage en fin de vie.

De nombreuses initiatives de sensibilisation des acteurs ont été menées, essentiellement auprès des industries de démolition et d'un grand nombre d'artisans. **Le verre, en tant que matériau recyclable à l'infini, est un produit qui s'inscrit naturellement dans une économie circulaire** puisqu'on peut le recycler sans dénaturer le produit en lui-même.

Tri et valorisation de mâchefers¹ d'incinération d'ordures ménagères, l'installation de Pierrefeu

D'après la conférence de Hervé ANTONSANTI

Hervé Antonsanti, Chef de service, Directeur de la branche Valorisation, traitement des déchets, entreprise Pizzorno (Figure 1).

Introduction

On réduit souvent les besoins en matériaux pour la transition énergétique aux batteries pour moteurs électriques, aux pales pour éoliennes et aux panneaux photovoltaïques. Mais il y a un grand gisement de matériaux que l'on oublie trop souvent : ce sont les matériaux que l'on utilise tous les jours et que l'on met dans nos poubelles. La société Pizzorno, une entreprise multidisciplinaire

qui travaille notamment sur la récolte d'ordures et de déchets ménagers de la région PACA, va corriger notre point de vue en nous parlant du recyclage des mâchefers utilisés principalement pour les travaux publics, en particulier pour les travaux routiers.

1 Présentation de la société Pizzorno

Les ordures ménagères, comme chacun sait, sont les déchets que l'on produit en tant que citoyen. Leur gestion relève de la compétence des collectivités locales, qui, soit

1. Résidu de la combustion des ordures ménagères dans les centres spécialisés.



Figure 1

Place de l'entreprise Pizzorno (Photo CZanieri).

s'en occupent elles-mêmes (on dit qu'elles travaillent *en régie*), soit les confient à des opérateurs extérieurs. Le groupe Pizzorno fait partie de ces opérateurs, au niveau national, qui répondent aux collectivités afin de leur fournir ces services. Pizzorno est une société familiale, basée dans le Sud de la France, faisant partie des dix plus gros opérateurs du secteur des déchets.



Pour une valorisation des mâchefers d'incinération

- ✔ **C'est quoi un mâchefer ?**
Résidu du traitement des déchets non dangereux d'une Unité de Valorisation Énergétique (UVE)
- ✔ **Constat en Région Sud**
Faible valorisation des mâchefers
Nécessité de trouver de nouvelles voies de valorisation.
- ✔ **But**
Valoriser les métaux.
Production d'un matériau alternatif ALTER-GRAVE®

Les qualités et caractéristiques sont comparables à celles des matières premières naturelles.

Figure 2

Présentation du mâchefer et de sa valorisation (Photos : CZanieri-Pizzorno Environnement).

2 Présentation du mâchefer et du site de revalorisation de Pierrefeu-du-Var

2.1. Le mâchefer

Qu'est-ce qu'un mâchefer d'ordures ménagères ? C'est le résidu qui provient de leur combustion dans ce que l'on appelle des « unités de valorisation énergétique des ordures ménagères ». Il s'agit du produit restant sur la grille du four lors du processus de combustion. Le mâchefer est récupéré dans des fosses situées derrière les fours après qu'ils aient été arrosés pour stopper toute combustion. Le mâchefer ressemble à la matrice présentée (Figure 2, en bas).

Il s'agit donc d'un déchet qu'il va falloir revaloriser. Le constat réalisé dans les années 2010 montrait que les mâchefers étaient en majorité acheminés dans des centres de stockage de déchets, alors même qu'ils ont un potentiel de revalorisation.

Le but de la revalorisation des mâchefers est double : on peut en extraire des métaux réutilisables ou les utiliser comme « grave²» que l'on appelle au sein de Pizzorno « ALTER-GRAVE® », qui pourront entrer dans des circuits de revalorisation du secteur des travaux publics, par exemple comme matériaux de support des routes. Ces matériaux, qui ont pour vocation de remplacer des matériaux de carrière, devront donc posséder des propriétés qui leur seront comparables.

2. Produit issu d'une gravure (élimination sélective de certaines couches d'un matériau).

2.2. Le site de valorisation de Pierrefeu-du-Var

La **Figure 3** présente deux photos de l'installation de maturation et d'élaboration des mâchefers (IME) de Pierrefeu-du-Var exploitée par l'entreprise Pizzorno. Cette installation existe depuis 2009 : la planification régionale de la valorisation des déchets ménagers, venant de la déclinaison de réglementations européennes et nationales, prévoyait la construction d'IME dès 2004. Nous en sommes aujourd'hui au troisième process de valorisation des mâchefers.

L'installation de Pierrefeu-du-Var est classée dans le cadre de la protection de l'environnement, c'est-à-dire que son implantation, sa conception et son exploitation sont agréées par des autorisations préfectorales. Une fois le besoin d'une installation de ce type décidé, il faut élaborer et déposer aux autorités des dossiers qui comportent des présentations techniques et administratives,

ainsi qu'une étude d'impact et de danger. Les pièces du dossier sont ensuite étudiées et donnent lieu (ou non) à un arrêté préfectoral d'autorisation d'exploitation et de construction. Cette procédure d'instruction explique ses délais de construction importants, en l'occurrence de cinq ans.

Sur l'installation de Pierrefeu-du-Var, la partie présentée en **Figure 3** fait environ deux hectares et il faut pratiquement deux hectares supplémentaires pour stocker les matériaux finis. L'installation comporte des modules de « stockage amont » : elle reçoit des déchets provenant de l'usine de valorisation énergétique de Toulon, ou de celle de Nice-Ariane (dans le département des Alpes-Maritimes).

La conception du stock amont est pensée avec précision, puisqu'elle sert au stockage, pendant un à deux mois, des mâchefers produits four par four, mois par mois, dans les usines de valorisation

Des solutions de valorisation

IME de Pierrefeu-du-Var – En quelques chiffres

200 000 t/an provenant de la Région Sud, départements limitrophes et Principauté de Monaco

Étapes du traitement

Séparation de toutes les parties non minérales (non brûlées de toutes natures) qui sont recyclées et/ou stockées (déchets ultimes)

- Captation de la fraction métallique ferreuse/non ferreuse (aluminium, zinc, fer...) qui fait l'objet d'une valorisation matières en France et en Europe
- Production des matériaux alternatifs ALTER-GRAVE®, qui sont valorisés en techniques routières ou en sous-couche de plateformes industrielles

Le procédé s'appuie sur des technologies maîtrisées, permettant un haut niveau de pureté des matériaux produits.



Figure 3

Mission et présentation des installations de Pierrefeu-du-Var de Pizzorno Environnement (Photos : Pizzorno Environnement).

énergétique avant qu'ils ne soient intégrés dans le process. Le but des opérations est alors de retirer les imbrûlés (des pneus, des morceaux de troncs d'arbres...) qui seront recyclés ou stockés dans l'installation de stockage continu. Ensuite, sont retirées les parties ferreuses et non ferreuses (je vais y revenir ensuite). Enfin, il faut obtenir une grave qui soit de qualité suffisante pour qu'elle puisse être utilisée dans différentes applications.

3 Le processus de valorisation du mâchefer

La *Figure 4* montre le synoptique³ du process : les mâchefers bruts sont acheminés au moyen d'engins chargeurs sur une grille effectuant un premier tri qui permet d'éliminer les particules de taille supérieure à 250 mm, qui sont principalement des déchets métalliques et des imbrûlés. Ensuite, un trommel⁴ séparant les particules de taille supérieure à 40 mm et celles de taille inférieure à 40 mm est alimenté.

Les particules de plus de 40 mm seront triées par des opérateurs. Lors de cette étape, d'autres imbrûlés et des bobines (pouvant servir dans des moteurs électriques) vont être éliminés. En théorie, ces matériaux n'ont rien à faire là, puisque le système de collecte des déchets en France permet de jeter séparément les produits électroniques et électriques en fin de vie.

3. Vue d'ensemble.

4. Cylindre rotatif dont les parois sont un crible.

Pourtant on en récupère des montagnes. Ces bobines nous sont rachetées à environ 500 € la tonne.

L'étape suivante subie par ces particules est leur passage dans un broyeur couplé à un électroaimant⁵ afin d'en retirer les métaux ferreux. Lors de cette étape, un résidu est récupéré et ramené à un autre niveau de l'installation afin d'en réaliser un sur-tri (je ne détaillerai pas cette partie du processus).

Les particules de moins de 40 mm, quant à elles, sont à nouveau séparées en trois fractions grâce à un crible à étages : une fraction de particules de moins de 4 mm, une de particules de 4 à 10 mm et une dernière constituée de particules de plus de 10 mm. Chaque fraction est alors récupérée et passée sur des machines à courant de Foucault⁶. Ces machines servent à trier les matériaux non ferreux présents dans les fractions. Le courant de Foucault est induit au moyen d'une roue polaire⁷ tournant à une vitesse déterminée. Le champ magnétique ainsi créé permet de séparer les matériaux non ferreux, qui vont « sauter » vers une goulotte. Le reste du déchet tombe dans une autre goulotte, assurant ainsi la séparation. Le fait de séparer le mâchefer en trois fractions permet d'optimiser les procédés d'extraction.

5. Aimant de très forte capacité d'attraction.

6. Courant électrique créé par un conducteur en mouvement plongé dans un champ magnétique.

7. Composant circulaire permettant la création d'un champ magnétique à partir d'un courant électrique.

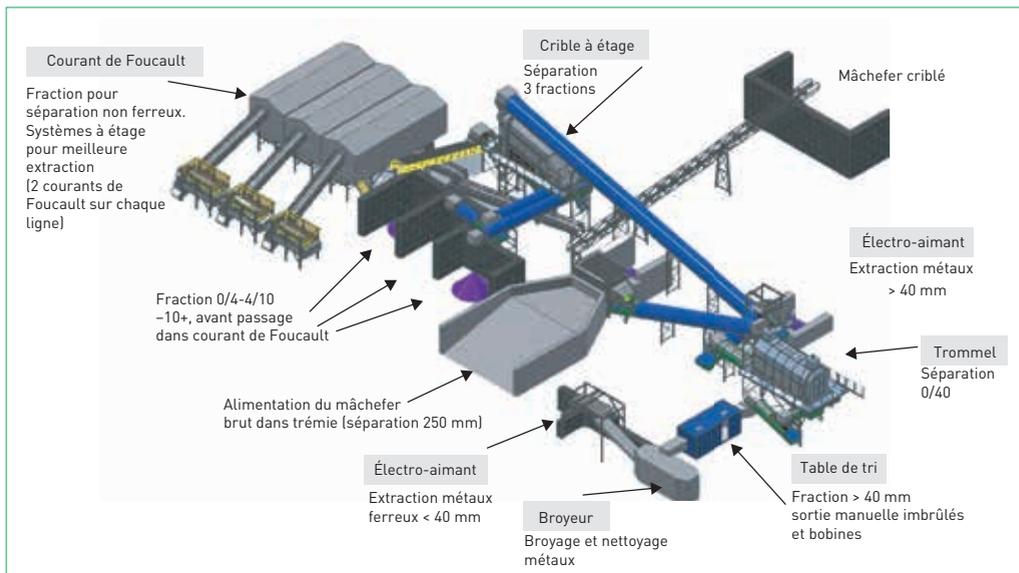


Figure 4

Schéma de fonctionnement de l'IME de Pierrefeu-du-Var (Copyright CZanieri-Pizzorno Environnement).

4 L'utilisation des matériaux sortant de l'IME de Pierrefeu-du-Var

4.1. L'utilisation des matériaux autres que l'ALTER-GRAVE®

En bout de processus, trois fractions ont été séparées (Figure 5). La première contient les métaux ferreux, qui alimentent des aciéries (principalement en France, en Allemagne et en Italie).

La deuxième est composée des métaux non ferreux (des nodules⁸ issus des fractions de 0 à 40 mm). Dans le cadre de notre partenariat avec le groupe néerlandais Heiling, nous allons en extraire de l'aluminium (à plus de 60 %), du cuivre, du laiton et du plomb. Ce processus illustre que nous ne pouvons pas tout

faire tout seuls : la séparation et l'extraction des métaux sont réalisées par un partenaire industriel à qui nous envoyons nos matières.



Figure 5

Applications des différentes fractions de matériaux récupérées lors du recyclage du mâchefer (Copyright illustrations CZanieri - Photos CZanieri).

8. Petites particules de taille et de forme irrégulières.

4.2. La revalorisation de l'ALTER-GRAVE® : une voie de recyclage encadrée

La troisième fraction, l'ALTER-GRAVE®, est composée des matériaux alternatifs et doit avoir les mêmes caractéristiques qu'une grave naturelle. Le processus de maturation conduit à une réaction de carbonatation⁹ entre la chaux contenue dans la grave et le dioxyde de carbone atmosphérique. Ainsi, le pH de la fraction est modifié, ce qui a pour effet d'empêcher les métaux lourds d'être éliminés de cette matrice par lixiviation et de rendre le produit du processus adapté aux différents usages que l'on va considérer maintenant.

Dans notre installation, 100 % des matières sont réutilisées pour les applications présentées en jaune dans la **Figure 6**. Il y en a deux types : les graves

de type 1 peuvent être introduites sous des parkings ou des aménagements routiers, tandis que les graves de type 2 sont utilisées à des fins d'aménagements plus visuels.

Pour ce dernier cas particulier, il faut obtenir une autorisation : nous ne pouvons pas utiliser des remblais de grave de plus de trois mètres d'épaisseur et nous devons garantir une pente constante. Dans les deux cas, le principe général de l'usage des mâchefers est de les protéger des eaux météoriques¹⁰. Les graves de type 1 sont revêtues d'aménagements étanches (par exemple de l'asphalte ou des enrobés de voirie), alors que les graves de type 2 sont recouvertes. Les normes pour les graves de type 2 sont légèrement différentes : il est possible d'utiliser des épaisseurs de déchets pouvant aller jusqu'à cinq mètres et avoir une pente

9. Dissolution du dioxyde de carbone de l'air ambiant dans un liquide. Cette dissolution a pour conséquence d'acidifier le liquide en question.

10. Eau issue des précipitations n'ayant pas encore rencontré de surface (n'ayant pas terminé leur chute).



Figure 6

Usages actuels des mâchefers recyclés. Une réglementation exigeante.
Source ADEME – Illustrations CZanieri-Pizzorno Environnement

de 5 %. Ainsi, de la terre suffit à les recouvrir. Comme vous pouvez le deviner, les graves de type 2 doivent être de meilleure qualité que les graves de type 1.

Tout cela est extrêmement encadré et nous revenons aux délais que j'évoquais précédemment. Ils reposent sur des notes techniques, par exemple du BRGM¹¹, ce qui veut dire que les acteurs de la recherche et les scientifiques sont intervenus. Ensuite, se pose la réflexion sur l'application professionnelle et industrielle de la gestion des déchets non dangereux. Ce qui en est tiré est mis en application ; les guides du SETRA¹² qui déterminent l'acceptabilité en termes de qualité datent de 2011.

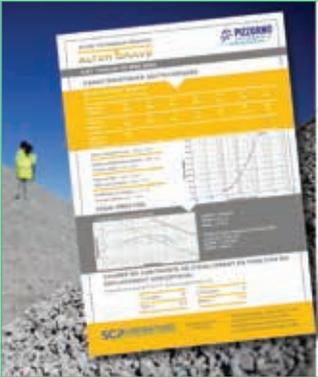
Ainsi, ces processus évoluent, et demandent en premier lieu que des scientifiques déterminent l'acceptabilité des matières.

11. Bureau de recherches géologiques et minières.

12. Guides méthodologiques Service d'Études techniques des routes et autoroutes.

Puis, les industriels développent les processus correspondants. Il existe donc des procédures de traçabilité très exigeantes des produits utilisés. Parmi elles, sont présentes des analyses dès la sortie d'usine (dites *analyses des valeurs intrinsèques des matières*) qui vont permettre de déterminer si les matières peuvent être utilisées ou non selon l'usage souhaité. Des analyses ont lieu ensuite après maturation (des tests de lixiviation) afin de s'assurer que l'on ne lixivie pas des matériaux dangereux pour l'environnement. Enfin, sont appliquées des restrictions d'usage. Par exemple, les graves ne peuvent être introduites à moins de 30 m d'un cours d'eau, ni dans une zone de protection faune-flore-habitat ou encore dans un périmètre de captage d'eau potable. Ainsi, tout le processus est cadré par des normes et textes officiels.

Un tel matériau bénéficie des mêmes interventions techniques que les matériaux naturels (*Figure 7*). Cela signifie



Des fiches techniques produits

Une fiche technique produit est également élaborée avec une analyse de caractéristiques géotechniques par un laboratoire indépendant Géotechnique et béton.

- Analyse granulométrique**
Selon norme NF EN ISO 17892-4
- Analyse géotechnique**
Essai Proctor avec détermination de la teneur en eau,
Selon norme NF P 94-093
- Courbes de contrainte de cisaillement**
Selon norme NF P 94-071

Figure 7

Analyses à effectuer pour s'assurer de la qualité des graves utilisées (Copyright Pizzorno Environnement).

que les matériaux issus de notre production sont soumis aux mêmes normes qu'un matériau équivalent qui serait naturel.

5 Les performances du site de Pierrefeu-du-Var

Pour évaluer notre installation, comparons nos performances réalisées avec nos attentes (*Figure 8*). Dans notre usine, les refus de tri et les imbrûlés représentent entre 1 % et 5 % des mâchefers. Pour les métaux ferreux, la littérature donne un ordre de présence d'environ 10 %. Sur site nous arrivons à une présence de 4 % à 7 %. Cela est dû au fait que l'on a utilisé des techniques qui viennent enlever une partie de la gangue qui entoure les métaux ferreux (on ne l'a donc pas dans la masse prise en compte pour ces chiffres) : le site affiche donc, en l'occurrence, des performances de qualité légèrement supérieures à la moyenne nationale.

Concernant les non ferreux, avoir divisé en trois fractions les mâchefers selon leur granulométrie, nous permet d'atteindre une présence de métaux non ferreux de 3 %, ce qui est très au-dessus de la moyenne nationale (qui est de l'ordre de 1 %). Les métaux non ferreux ont un cours actuel de l'ordre de 1 100 €¹³ par tonne lorsqu'ils proviennent d'industries comme la nôtre. Les métaux ferreux, eux, se vendent à environ 30 € par tonne aujourd'hui (pour le cas de ferrailles issues d'incinération).

6 Les limites de la revalorisation des mâchefers : état des lieux et perspectives

Le bilan actuel montre que **nous avons réussi à améliorer les rendements du tri et de la valorisation en extrayant un maximum de métaux. Nous avons également réussi à valoriser les graves de mâchefer : nous avons toujours réussi à écouler nos graves de mâchefer, pour différents usages.** Cependant, selon les régions ciblées, elles peuvent rester difficiles à évacuer : dans la partie sud de la France, nous avons beaucoup de carrières et donc une grande production de matériaux naturels. Ainsi, les matériaux issus du recyclage sont en compétition avec les naturels. Ces derniers étant présents en grande quantité, ils ne sont pas chers. C'est pourquoi, fréquemment, nous donnons nos graves de mâchefer et parfois même contribuons au financement de leur transport

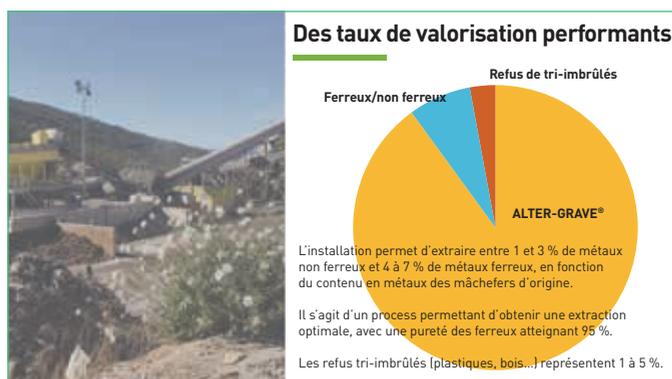


Figure 8

Taux de revalorisation des matériaux lors du processus (Photo CZanieri).

pour les acheminer suffisamment loin afin de pouvoir les écouler.

Pour éviter cela, nous avons recherché d'**autres solutions de valorisation** (Figure 9). Une première solution a été engagée en partenariat avec le bureau d'étude Néo-Eco, spécialisé dans l'éco-conception des matériaux basé dans le Nord de la France (ce qui nous a rapproché de l'IMT Lille-Douai Nord Europe). En 2019, nous avons étudié des pavés préparés à partir de mâchefer sur lesquels ils ont effectué des tests de résistance et de lessivage (comme on l'aurait fait avec des pavés en béton créés à partir de matériaux naturels). Certains résultats ont été obtenus, mais

malheureusement la pandémie de Covid-19 a interrompu cet échange. Cette opération a été réalisée dans le cadre de financement de l'ADEME¹⁴ et de la région Sud par l'intermédiaire des dossiers spécialisés qui permettent la recherche, l'innovation et le financement d'évolutions progressives.

Aujourd'hui, nous sommes en discussion pour renouveler ce partenariat avec l'ADEME et la région Sud afin de produire des monoblocs en béton (similaires à des Lego) grandement présents sur les installations industrielles ou pour protéger les rues contre les actes délictueux.

14. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

Conclusion : une valorisation exemplaire

Les déchets minéraux issus des opérations minières sont souvent présentés comme des nuisances absolues. Ils correspondent à des masses et des volumes qui représentent de véritables charges pour l'environnement.

Les techniques définies et mises en œuvre sous l'impulsion des préoccupations de protection de l'environnement depuis une dizaine d'années ont donné, dans le cas des mâchefers, des résultats remarquables. Les dommages à l'environnement sont largement évités, l'économie de matériaux de plusieurs secteurs utilisant les produits des traitements de ces déchets s'en trouve sensiblement améliorée. Et les possibilités techniques ne sont pas épuisées

(voir les innovations possibles sur la **Figure 9**). L'espoir, qui paraissait naguère naïf et trop optimiste de voir les déchets (vilain mot) devenir des ressources, s'en trouve complètement validé et peut-être entraînera une dynamique pour d'autres secteurs industriels. Au-delà des travaux routiers, l'utilisation actuellement majoritaire, d'autres secteurs des travaux publics sont envisagés (substitution du béton pour certaines applications).



Des perspectives d'avenir innovantes

Des matériaux alternatifs au cœur de l'économie circulaire
Pour une utilisation en pavés de voirie...

Étude menée avec l'IMT Douai
NEO-ECO-BE spécialisé dans l'éco-conception de matériaux,
Financée par l'ADEME & la Région Sud

Des résultats prometteurs

Possibilité d'intégrer les mâchefer dans le pavé mixte formulé comme **inerte**.

Les analyses environnementales classent le pavé mixte formulé comme **inerte**.

Aucun impact sur les propriétés physiques avec maintien des performances mécaniques.

Une contribution régionale pour **préserver les ressources naturelles**.

Nous redonnons leur potentiel aux matières

Fabrication de monobloc en béton, dans une démarche d'économie circulaire par la réalisation d'éco-matériaux, en cours de réalisation.

Figure 9

Revalorisations du mâchefer alternatives aux pavés routiers (Photo CZanieri).



Déchets d'aujourd'hui
Ressources de demain

Merci

Hervé ANTONSANTI
Directeur de Branche
Valorisation Traitement des déchets

PIZZORNO

Figure 10

Transparent conclusif de la conférence (Photo CZanieri).

Stratégie pour accélérer l'économie circulaire

Constance MARÉCHAL - DEREU

Constance Maréchal-Dereu, Cheffe du service de l'industrie à la Direction générale des entreprises (ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique). Précédemment directrice générale de France Logistique¹.

Introduction : État et recyclage

Avant de rentrer dans les deux grands types d'actions de l'État en matière de recyclage que sont la réglementation et le financement, rappelons pourquoi l'État s'intéresse à ce sujet.

L'économie circulaire comporte sept piliers, qui couvrent l'amont de l'activité industrielle ainsi que son aval. La partie amont, c'est l'écoconception, l'approvisionnement

des produits, etc. La partie aval, concerne l'usage, la gestion des déchets et leur recyclage. Une fois mises en place les activités de recyclage et assurée la mise à disposition de produits recyclés, on peut revenir sur la partie amont avec un approvisionnement durable, parce qu'au lieu d'avoir utilisé des produits neufs, on a utilisé des produits recyclés. C'est pourquoi on parle d'**économie circulaire**. L'État s'intéresse au travers des différents ministères à l'ensemble des volets qui favorisent une économie de plus en plus circulaire. Nous

1. Association gouvernementale cherchant à améliorer le secteur de la logistique en France.

allons ici **détailler le volet recyclage**.

Ce champ d'activité vise deux grands objectifs. D'abord l'impact environnemental pour lequel on cherche à réduire l'extraction des matières naturelles brutes ; ceci impose de soutenir l'économie circulaire par le recyclage. Ensuite, notamment pour les matières dont le territoire français ne dispose pas, l'économie circulaire joue aussi un rôle au service de notre souveraineté et de l'autonomie stratégique de nos industries. Le succès d'un sujet aussi complexe que le recyclage suppose que l'ensemble des acteurs travaillent ensemble, autant en amont sur la sélection des matières nécessaires à la production qu'en aval sur le recyclage. Tout ce travail collectif devra permettre d'augmenter les volumes de produits entrant dans le process de recyclage et assurer la qualité des matières recyclées pour que l'augmentation des volumes puisse être effective.

L'État agit par deux grands leviers : **le levier réglementaire et le levier financier**.

1 Les enjeux réglementaires du recyclage

Les enjeux réglementaires sont de deux types : la réglementation européenne et la réglementation nationale. Présentons-les en commençant par la réglementation européenne et en suivant par la réglementation française. Cette dernière a pu être au début un peu en avance, mais son rôle actuel est maintenant plutôt de compléter les options choisies par l'Europe.

1.1. La réglementation européenne de l'économie circulaire

Pour l'Europe, l'économie circulaire est historiquement tournée vers le développement durable. Les deux grandes préoccupations sont : **développer la demande en matières recyclées et s'assurer que l'offre suive**.

Du côté de la demande, on a des objectifs d'incorporation minimale de matière recyclée dans des produits finis avec des objectifs du type *25 % de plastique recyclé dans les bouteilles PET²* ou des règlements sectoriels analogues produit par produit. Certaines de ces réglementations sectorielles sont déjà publiées comme des règlements qui obligent à certains recyclages de matières premières : c'est le cas des batteries. D'autres règlements sont en cours de négociation, notamment sur les emballages et sur les véhicules hors d'usage. L'idée dans ces réglementations est de « fournir des clients » aux acteurs du recyclage en obligeant certaines entreprises ou certains secteurs entiers à utiliser des matières recyclées.

Il est bien d'avoir des demandes de clients mais il faut pouvoir les satisfaire. D'autres réglementations sont axées sur le développement de l'offre pour s'assurer que les acteurs du recyclage puissent fournir les produits recyclés qui sont demandés. Ainsi, il sera également obligatoire de simplifier les méthodes de calcul dépendant des statuts juridiques

2. PET : le poly téréphtalate d'éthylène est un polymère de type polyesters utilisé dans les emballages.

pour que les matières recyclées puissent être plus largement réutilisées, d'interdire progressivement la mise en décharge de certains types de déchets et d'accroître la collecte séparée de certains d'entre eux (progressivement : les biodéchets en 2023, etc.). Fondamentalement, la réglementation européenne est faite pour favoriser aussi bien la demande que l'offre.

Plus récemment, un nouvel enjeu de l'économie circulaire s'est formalisé : il faut que toutes ces réglementations soient **compatibles avec la compétitivité des activités européennes dans le monde**. Dans un monde de plus en plus tendu économiquement et géopolitiquement, il est indispensable de mettre en place le *level playing field*³ sur les sujets d'écodesign pour que l'intégration de matières recyclées dans les produits mis sur le marché soit attractive et respectée partout. Pour être équitables et respectées, il faut que ces pratiques s'appliquent aux produits faits en dehors de notre marché national comme aux produits européens. Ainsi le règlement écodesign vise à s'appliquer à tous les produits mis sur le marché européen avec des exigences spécifiques sur certaines substances ou certains contenus de produits recyclés, quel que soit le lieu de production.

Plus spécifiquement, on essaie d'utiliser le recyclage au service de notre autonomie stratégique : une négociation est en cours sur le *Critical Raw*

3. *Level playing field* : conditions de concurrence équitables.

*Materials Act*⁴. Elle vise à travailler sur l'approvisionnement des matériaux critiques en développant le recyclage avec un objectif d'au moins 15 % de produits issus du recyclage pour la consommation européenne à l'horizon 2030.

1.2. La réglementation française de l'économie circulaire

Sur les sujets réglementaires, on vient de parler des enjeux européens et des textes européens assez génériques. La France n'est pas en reste, avec par exemple la loi AGECS⁵ de 2020 qui pose des objectifs très ambitieux et génériques sur le recyclage. Plus récemment, fin novembre 2023, **la loi « Industrie verte »** vise la facilitation des réutilisations de certains résidus qui sortiraient du statut de déchets entre entreprises d'une même plateforme pour simplifier le recyclage. Pour l'instant, **nous en sommes toujours au stade de la rédaction de décrets : ce n'est pas encore concrètement opérationnel, mais la loi dit qu'il faut le faire**. On va donc rédiger tous les textes pour compléter le règlement européen par des directives nationales.

Un autre progrès important viendra du fait que **la loi Industrie verte est couplée au projet de loi de finances** en cours de discussion au Parlement en 2023. Elle vise

4. *Critical Raw Materials Act* : loi sur les matières premières critiques.

5. AGECS (Agir pour l'économie circulaire) : loi française qui vise à réduire les déchets et à favoriser la durabilité des modes de production et de consommation.

à instituer un **crédit d'impôt « Industrie verte » appelé C3IV**. Il va permettre d'accompagner les financements avec un dispositif de crédit d'impôt différent des modes de financement habituels de l'État, qui sont en général des appels à projets, pour accompagner toute la chaîne de valeur de certaines technologies de décarbonation. Ce n'est pas le recyclage pour tous les usages, mais cela pourra financer les activités de **recyclage des usages éoliens, des batteries, des pompes à chaleur et du photovoltaïque**.

2 Les enjeux financiers du recyclage

2.1. Le but du financement pour l'économie circulaire

Pour avoir une vue équilibrée des problèmes que pose le développement du recyclage, il convient de regarder les conditions du financement français dans le cadre des règles européennes. En effet, on n'a pas le droit de financer tout ce que l'on veut n'importe comment : les aides attribuées par la France sont soumises à des règles européennes. Et, cependant, tout l'argent que l'on va considérer maintenant, c'est bien de l'argent national, déployé sur deux grands objectifs.

Notre soutien financier a pour but de **développer l'offre de recyclage** sur des technologies innovantes ou sur des procédés compliqués qu'on voudrait déployer plus largement. Mais notre objectif c'est aussi de **renforcer l'autonomie stratégique**, en particulier pour lutter contre notre **déficit naturel en métaux critiques**.

Sur les filières de recyclage, et cela vaut aussi sur la partie métaux critiques, il y a deux grands types de financement : le premier est *France Relance*, qui a été plutôt actif en sortie de Covid, qui concerne le déploiement des solutions. Le second financement majeur vient de *France 2030*. La différence entre *France Relance* et *France 2030* est que ce dernier, plus récent, est axé davantage sur l'innovation, la R&D et moins sur le déploiement de solutions déjà existantes.

2.2. Les différents types d'appels à projets

Concernant les financements de projets de recyclage, il y a eu plusieurs appels à projets, plusieurs fonds, notamment un « fond économie circulaire » de l'ADEME⁶, qui ont permis de déployer des solutions. Ainsi plus de 150 millions d'euros ont été déployés spécifiquement dans le secteur plasturgie pour soutenir l'incorporation de matières plastiques recyclées en lieu et place de produits nouveaux. Des projets visant à réduire les écarts de prix, car les matières recyclées sont plus coûteuses que les matières originelles, ont également été soutenus. Les PME, par exemple, ont bénéficié d'un dispositif sur ce sujet pour une quinzaine de millions d'euros.

D'autres actions ont été déployées dans les territoires en lien avec les collectivités locales. Celles-ci ont en effet souvent « le rôle du premier tri » des déchets et elles ont

6. ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

été aidées pour déployer des solutions de tri et de valorisation de déchets un peu moins habituelles, notamment pour les biodéchets. L'objectif est d'aller encore plus loin en construisant des systèmes de valorisation de ces biodéchets pour en faire de la méthanisation et des combustibles solides de récupération.

Tout ce qui a été cité précédemment était la partie *France Relance* : on est plutôt dans le déploiement de systèmes qui existent déjà mais qui sont coûteux.

Sur la partie *France 2030*, on est plutôt sur le financement de l'innovation avec une stratégie d'accélération en trois phases : recyclabilité, recyclage et réincorporation. Les matières fournies aux acteurs doivent être recyclables dès le début (ce qui est assuré par le procédé amont) pour qu'on puisse effectivement les recycler et finalement, après récupération, accompagner leur réutilisation. L'objectif est, à terme en 2025, de disposer de capacités de traitement de l'ensemble des déchets plastiques français, soit 2 Mt de capacités de recyclage du plastique. Ceci est déployé notamment dans deux appels à projets.

Un **appel à projet dédié au plastique** vise à accompagner l'ensemble des modalités de recyclage du plastique, que ce soit du recyclage par voie chimique, mécanique ou via les modalités de tri. Il y avait 300 millions d'euros sur cet appel à projets et les projets retenus à date consomment plus de 100 millions d'euros d'aides. Ainsi, on espère

encore accompagner de nouveaux projets parce qu'il reste encore un peu de crédits.

Un autre **appel à projet, plus générique, concerne les métaux**. De la même manière, il nous reste des crédits : on a utilisé plus de 110 millions d'euros sur 170 millions d'euros débloqués.

Enfin, il y a aussi des appels à projets qui ne sont pas spécifiques matériaux ni même recyclage, mais qui peuvent être utiles pour des acteurs du secteur chimie, recyclage, économie circulaire. Ces aides visent des intérêts génériques : développer des acteurs nouveaux, faire émerger de nouveaux types d'entreprises, des start-up industrielles, etc. Il y a notamment un appel à projets dont une grande partie des bénéficiaires appartient au domaine du recyclage, c'est l'appel à projets *Première Usine*. Il ne finance pas que des usines de recyclage, mais aussi de beaux projets dans le domaine, notamment un sur le traitement des mégots de cigarettes pour en faire des matériaux isolants.

On recycle donc des biodéchets, du plastique, des matières dures, des métaux pour faire des batteries, mais on recycle aussi des mégots de cigarettes. Voilà donc la variété des activités et de l'usage qu'on peut faire du recyclage.

2.3. La souveraineté française dans l'approvisionnement

À côté de leur « objectif recyclage », *France Relance* et *France 2030* ont obtenu des résultats remarquables sous

l'angle de la souveraineté française. À titre d'exemple, je citerai la récupération d'aimants permanents de déchets d'équipements électroniques pour fournir l'industrie des batteries, ou de titane pour l'aéronautique.

Aujourd'hui, de nombreux secteurs se préoccupent de sécuriser leurs approvisionnements en métaux critiques. On peut penser que la situation des matériaux critiques (plus largement même que les métaux critiques) est un peu loin du recyclage. Pourtant, le recyclage est l'une des solutions

de souveraineté, aux côtés, bien sûr, de l'extraction ou du raffinage en France. De surcroît, le recyclage permet de réutiliser les matériaux critiques contenus dans les déchets. L'idée, sur cet objectif de métaux stratégiques, est de creuser toutes les pistes imaginables. Par exemple, pour l'appel à projet dédié à la sécurisation des métaux critiques, six des treize projets concernent le recyclage. L'importance des enjeux de recyclage sur cette souveraineté en métaux lui donne un nouveau relief particulièrement spectaculaire.

Conclusion : l'économie circulaire réclame les efforts conjoints de tous les acteurs publics et privés

La politique publique de l'État en matière d'économie circulaire et de recyclage a plusieurs objectifs :

- 1) Réduire notre empreinte carbone et répondre à nos objectifs en matière d'environnement.
- 2) Répondre à nos objectifs en matière de souveraineté et de compétitivité du territoire français.

Nos différents types d'actions, qu'elles soient réglementaires ou financières, soutiennent les acteurs privés qui sont ceux qui mettent en œuvre des projets pour répondre à ces grands objectifs.

Pour répondre à nos objectifs de **créer une économie circulaire**, il faut un équilibre entre **une demande de matériaux pour les fabrications industrielles** et **une offre adaptée de**

matériaux issus du recyclage. Pour la demande, cela implique la stratégie des industriels qui doivent développer les volumes de fabrication privilégiant la substitution de matières traditionnelles par des matières recyclées. Pour l'offre, les efforts doivent être faits en quantité et en qualité, ce qui veut dire que les matières recyclées doivent pouvoir être réutilisées facilement et économiquement.

Quand on voit les acteurs actuels du domaine, industriels, start-up et laboratoires, on voit la **nécessité que tout le monde travaille ensemble, État et acteurs privés.**

Chimie et recyclage et économie circulaire

Parmi les gros obstacles qui se présentent devant la civilisation, et à côté du changement climatique, il faut compter **l'épuisement des ressources**. Il s'agit des ressources fossiles au premier chef, puisque notre « civilisation pétrole » se révèle plus forte que la nature en consommant ce que la Terre contient,

mais aussi des ressources naturelles, minérales ou végétales, qui sont menacées, car notre gestion des terres ne sait pas résister à notre **démographie envahissante**.

C'est pourquoi le **mot « recyclage »**, naguère réservé aux responsables de la propreté, **désigne maintenant un concept majeur**. Il faut maintenant l'entendre comme outil de lutte – l'un des seuls outils – contre la disparition des matières sur lesquelles toutes nos vies reposent. Et on le résume par un idéal, l'économie circulaire, qui sous-entend que « rien ne se perd », si on travaille vraiment.

Ce livre explique les efforts considérables des laboratoires et des industriels vers la construction d'un monde qui saurait régler le problème des ressources. Qu'il s'agisse des pneus de nos automobiles, des équipements de la construction – métaux, verre plat, matières plastiques, etc. – ou de la production d'énergie-batterie pour le photovoltaïque, pales d'éoliennes par exemple, on y examine des exemples où, souvent grâce à la chimie, on trouve des solutions. Elles ne sont jamais simples, commencent par la récupération de la matière mais nécessitent qu'ensuite, on imagine et mette en œuvre un tri à chaque étape, et des traitements chimiques spécifiques. Le tout devant rester économique et respectueux de l'environnement !

La bataille peut être gagnée mais au prix de quels efforts d'imagination, de volonté et de technologies variées ! Après avoir lu cet ouvrage, **le lecteur saura mesurer l'ambition admirable mais indispensable** que tous – producteurs, consommateurs, scientifiques et industriels – doivent assumer **pour éviter les catastrophes**.



ISBN : 978-2-7598-3624-6

Prix : 25 €

edp sciences

www.edpsciences.org