

PROSPECTIVE DES MATÉRIAUX

1/4

Tendances et enjeux des consommations de matériaux



MÉTROPOLE

GRAND LYON

Jun 2023

SOMMAIRE

Introduction générale

Les matériaux, un enjeu d'avenir pour le territoire métropolitain5

Prospective des matériaux : éléments de cadrage5

Matériau(x), de quoi parle-t-on ? 5

Évolutions de la consommation de matériaux : panorama général 5

Quelles clés d'analyse des enjeux prospectifs ? 8

Analyse des enjeux par catégories de matériaux 10

Bois – Boris Chabanel11

Fibres textiles – Boris Chabanel21

Caoutchouc – Boris Chabanel31

Ciment – Aurélien Boutaud et Boris Chabanel37

Matériaux en plâtre et terre cuite – Marina Bellot et Mylène Martin 45

Verre – Aurélien Boutaud55

Composites – Aurélien Boutaud 61

Plastiques – Marina Bellot et Mylène Martin 67

Métaux – Mathieu Grandperrin77

Analyse transversale/ouverture conclusive93

Annexe - Mathieu Grandperrin 100

Ressources rares, critiques, stratégiques : le cas des métaux. Définitions100

JUIN 2023

Métropole de Lyon

■ **Coordination**

Direction de la prospective et du dialogue public (DPDP)

Nicolas Leprêtre et Jean-Loup Molin

■ **Rédaction**

DPDP/réseau de veille prospective

Marina Bellot (Scope), Aurélien Boutaud (Aboco), Boris Chabanel (Utopies),

Mathieu Grandperrin (Ouishare) et Mylène Martin (Scope)

■ **Réalisation**

Nathalie Joly (DPDP)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les matériaux, un enjeu d'avenir pour le territoire métropolitain

Tout pousse à ce que la prospective s'intéresse aux matériaux, leurs propriétés physiques, leurs procédés de transformation et les innovations qui les entourent.

D'abord parce que l'extraction et la consommation de matériaux est au cœur de notre société : elles se retrouvent dans nos biens de consommations du quotidien, dans le fonctionnement de notre économie, dans les services privés et publics dont nous bénéficions, et par les effets sur le climat et le vivant qui en découlent.

S'intéresser aux matériaux, leurs usages actuels, leur utilisation croissante ou leur abandon, c'est **comprendre leur place centrale dans notre société**, alors qu'ils sont rarement visibles dans les grands concepts qui guident le débat public. Quels sont les matériaux les plus présents dans notre quotidien ? Ceux dont l'économie dépend ? Ceux dont on ne peut pas se passer pour nos besoins essentiels ? Quels usages faudra-t-il changer ?

Ensuite, parce que nous sommes entrés dans une période de chocs et de stress continus, qui révèlent notre dépendance aux matériaux et qui laissent entrevoir des crises à venir, *a fortiori* dans un contexte géopolitique instable et face à l'impératif de transition énergétique.

S'intéresser aux matériaux, que ce soit la structuration des filières ou la disponibilité des ressources, c'est **anticiper les risques et hiérarchiser les priorités stratégiques**. Quels matériaux vont-êtré le plus demandés ? De quels matériaux dépend-on le plus ? Lesquels sont voués vraiment à se raréfier, alors que d'autres demeureront abondants ? Quelle est la criticité de chaque matériau ?

Enfin, parce que le domaine de l'innovation technologique est de plus en plus complexe. Les appels à « substituer » tel matériau par un autre ou à investir dans une nouvelle technologie engendrent des débats d'experts sur l'opportunité économique, la faisabilité physique, les impacts écologiques.

Sans pouvoir répondre à toutes les questions, **il en ressort un besoin de pédagogie autour de ces éléments techniques** (procédés, substituabilité, évolutions d'usages, innovations) pour aider les décideurs et citoyens à trouver des repères, pour se faire une opinion. Quelles alternatives en termes d'usage ou d'innovation peut-on raisonnablement espérer ? Quelles sont les limites physiques et écologiques qu'on ne peut pas ignorer ? Pour diminuer notre dépendance, qu'est-ce qui relève de l'optimisation des procédés, des filières ou d'une sobriété d'usages ?

C'est pour répondre à ces questions qu'une prospective des matériaux prend tout son sens. À son échelle, **elle contribue à la résilience du territoire, en proposant des clés de lecture claires, partagées publiquement, sur les enjeux et défis à venir** sur des catégories de matériaux stratégiques dont il faut se préoccuper collectivement.

Les intentions sont ambitieuses, peut-être trop. Les études qui suivent ne visent pas à l'exhaustivité du propos, loin de là, ce qui a amené à certains choix :

- Par « matériaux », on s'intéresse à la matière d'origine naturelle ou artificielle utilisée pour fabriquer des biens (véhicules, meubles, objets, etc.), construire des bâtiments ou des machines. On écarte ainsi l'alimentation et l'énergie.
- Des focus sur des matériaux courants et stratégiques sont privilégiés à un propos couvrant l'ensemble des matériaux existants.
- À ce stade, le travail pose un panorama généraliste des tendances et de l'actualité, mettant au même niveau des matériaux à la criticité variée (le verre, le bois, les métaux) et des procédés forts différents – la récolte et le lavage de la laine et la lithographie de circuits intégrés – de façon à ne pas se fermer de porte sur des matériaux potentiellement à enjeux. Ce travail ne propose donc pas, à ce stade, une priorisation des matériaux stratégiques pour le territoire métropolitain ou régional¹.

¹ Le choix a été fait dans les deux premiers documents de décrire le périmètre de la région Auvergne-Rhône-Alpes et non seulement celui du Grand Lyon car, en matière d'importation de matériaux, de structuration de filière et de chaîne de production, le périmètre grandlyonnais aurait été trop restreint.

Méthodologie

Le réseau de veille de la prospective s'est appuyé pour la rédaction de ce travail sur une revue de littérature et sur plusieurs entretiens auprès d'experts, également publiés sur Millénaire 3. Pour proposer plusieurs entrées de lecture à ce sujet foisonnant, quatre études ont été réalisées :

- La première étude, « **Les tendances et enjeux des consommations de matériaux** », propose un panorama général de la consommation de neuf matériaux : le bois, les fibres textiles, le caoutchouc, le ciment, le plâtre et la terre cuite, le verre, les composites, le plastique et les métaux. Chacun est mis en perspective par rapport à des enjeux de souveraineté, de décarbonation/biodiversité, de circularité/substituabilité, et d'économie locale.
- La deuxième étude, « **Les évolutions des filières de transformation et de consommation de matériaux** », explore la manière dont la dépendance en matériaux et les impératifs réglementaires, climatiques et économiques bouleversent huit filières : la construction-bois, le textile, le papier-carton, la métallurgie, la chimie, l'automobile, les énergies renouvelables et l'électronique.
- La troisième « **Les impacts des procédés techniques sur les matériaux** », détaille les innovations entourant différentes catégories de procédé technique, en proposant des focus sur quatre procédés : la lithographie des circuits intégrés, la fabrication dans la filière photovoltaïque, la récolte et le lavage de la laine, et les procédés de remanufacturing.
- La quatrième étude, « **La consommation de matériaux au cœur de l'organisation de notre société** », propose un aperçu des tendances réglementaires, économiques et d'usage qui ont une influence sur la consommation à la hausse et à la baisse de matériaux, en s'appuyant sur l'illustration de trois usages : se loger, se déplacer, se meubler.

Bonne lecture !

Nicolas Leprêtre

Prospective des matériaux : éléments de cadrage

MATÉRIAU(X), DE QUOI PARLE-T-ON ?

Définition de la notion de matériau

De manière simple, un matériau désigne toute matière d'origine naturelle ou artificielle utilisée pour fabriquer des objets, construire des bâtiments ou des machines. Il s'agit donc d'une matière première sélectionnée en raison de propriétés d'usage spécifiques (rigidité, conductivité électrique et thermique, etc.).

En cohérence avec cette définition, sont analysés ici les matériaux mobilisés pour la fabrication de bâtiments, biens « durables² » (véhicules, meubles, équipement ménager ou de loisir, etc.) et « semi-durables » (textile, habillement), par distinction avec les biens « non durables » (alimentation, énergie).

Classification des matériaux

Les matériaux sont différenciés selon leur provenance (issus d'êtres vivants par exemple) et leurs propriétés, qu'elles soient mécaniques (flexibilité ou rigidité), chimiques (perméabilité ou imperméabilité à l'eau) ou encore physiques (conductivité de l'électricité ou de la chaleur).

Ils sont généralement classés en 5 différentes grandes familles, chacune ouvrant sur une grande diversité de sous-catégories :

- **Matériaux métalliques :**

Périmètre : regroupent les métaux (fer, cuivre, bronze) et les alliages métalliques (acier inoxydable)

Propriétés : résistance mécanique, conductivité électrique et thermique, opacité, etc.

- **Matériaux issus de la biomasse³ (ou organiques) :**

Périmètre : regroupent les matériaux d'origine animale (laine, cuir) ou végétale (bois, coton, papier, caoutchouc)

Propriétés : facilité de mise en œuvre, biodégradables, bons isolants thermique et électrique, etc.

- **Matériaux plastiques de synthèse :**

Périmètre : matériaux obtenus à partir de pétrole

Propriétés : facilité de mise en œuvre, élasticité, etc.

À noter : la science des matériaux classe généralement les polymères et élastomères de synthèse avec les matériaux organiques.

- **Matériaux minéraux (ou céramiques) :**

Périmètre : regroupent les roches (pierres naturelles, plâtre), les céramiques (terre cuite, porcelaine), le verre

Propriété : rigidité, dureté, résistance mécanique et thermique (réfractaires)

- **Matériaux composites :**

Périmètre : combinent plusieurs matériaux de familles différentes pour obtenir de multiples propriétés (exemple : fibre de carbone, fibre de verre, Kevlar, contreplaqué, béton).

Propriétés : capacité à associer des propriétés complémentaires (ex. souplesse et solidité, légèreté et rigidité, etc.)

2. Voir définition de la durabilité des biens de l'Insee : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2120>

3. En écologie, la biomasse désigne la masse totale d'organismes vivants dans un biotope ou un lieu déterminé à un moment donné.

ÉVOLUTIONS DE LA CONSOMMATION DE MATÉRIAUX : PANORAMA GÉNÉRAL

Quelles évolutions de l'extraction mondiale de matières premières et de leur usage ?

La révolution industrielle a marqué une rupture historique dans le « métabolisme » de l'économie mondiale. L'exploitation à grande échelle de nouvelles sources d'énergie (charbon, pétrole, gaz) a permis de décupler l'exploitation des autres ressources naturelles : biomasse, minéraux non métalliques, métaux. L'extraction et l'usage des ressources sont marquées par trois évolutions majeures depuis le 20^e siècle :

- **Une croissance exponentielle de l'extraction de ressources naturelles...**

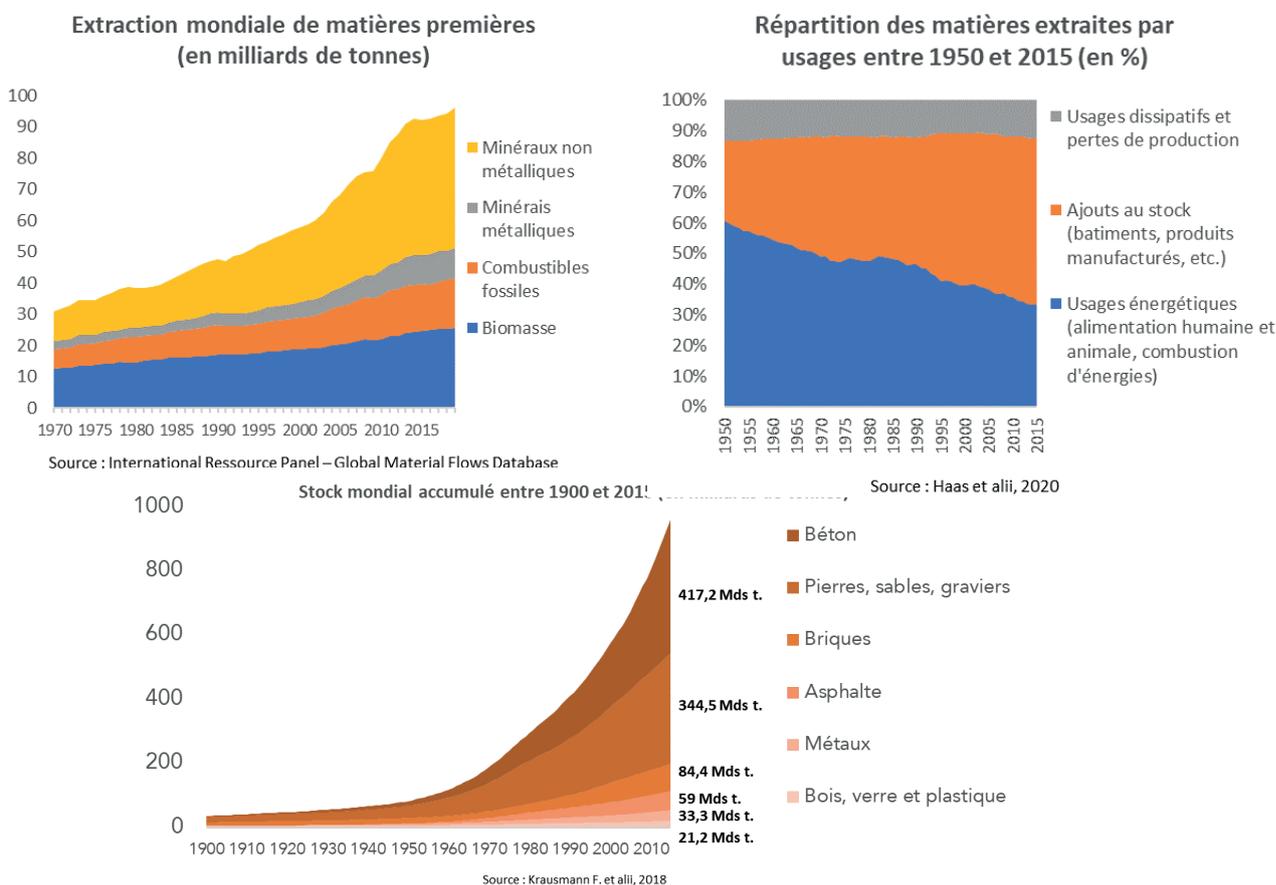
Approchant des 100 milliards de tonnes par an, l'extraction mondiale annuelle est multipliée par 3 depuis 1970 et par 13 depuis 1900, soit un accroissement bien supérieur à celui de la population : l'extraction de ressources par habitant passe de 4,6 à 12,5 tonnes sur la période.

- **... qui s'avèrent en large partie non renouvelables...**

Alors que jusqu'aux années 1960, la biomasse représentait la plus grande part de l'extraction mondiale, les combustibles fossiles, les métaux et, surtout, les minéraux non métalliques en composent aujourd'hui les trois quarts.

- **... et sont utilisées avant tout sous forme de matériaux ajoutés au stock.**

Alors que les usages énergétiques dominaient par le passé, plus de la moitié des ressources extraites aujourd'hui sont utilisées pour accroître ou renouveler le stock de biens en usage (infrastructures, bâtiments, machines, appareils électriques et électroniques, meubles et autres biens durables). Ceci concerne en premier les minéraux non métalliques (sables, granulats) et les métaux qui ne font pas l'objet d'usage énergétique.



Quelle part de l'extraction mondiale est captée par l'Union Européenne et la France ?

On distingue généralement trois approches de la responsabilité d'un territoire dans l'extraction mondiale :

- **Approche production (ou extraction domestique) :**

Elle renvoie aux ressources extraites au sein du territoire considéré. Selon cette approche, l'extraction domestique de l'Europe et celle de la France apparaissent relativement stables au cours des dernières décennies, et leur part dans l'extraction mondiale est comparable au poids de ces territoires dans la population mondiale.

- **Approche consommation (ou empreinte matières) :**

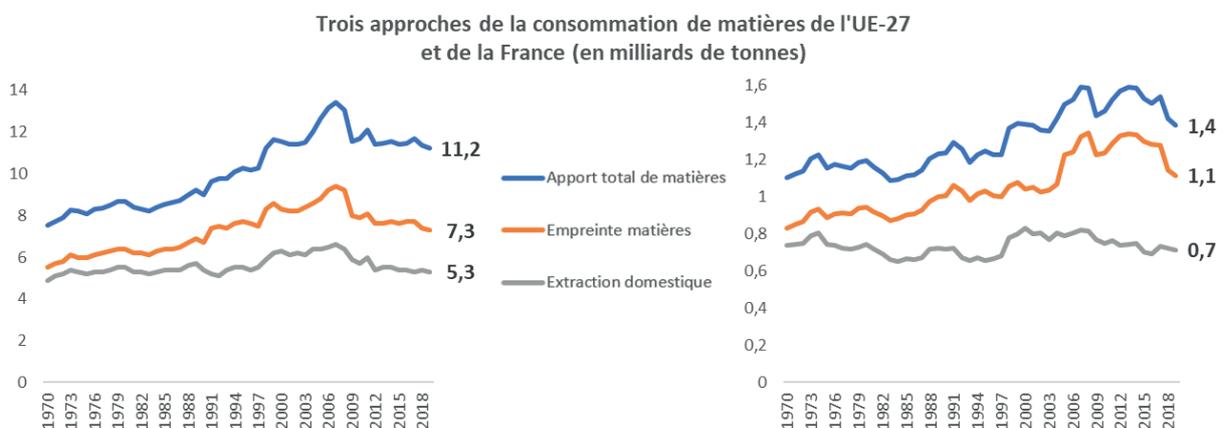
Elle consiste à évaluer l'ensemble des ressources mobilisées pour satisfaire la consommation finale du territoire considéré (consommation des ménages et des administrations publiques, investissements), quel que soit le lieu de production des biens et services consommés (production domestique ou importations). Ne sont pas prises en compte ici les ressources incorporées aux exportations. Partant du principe que toute production n'aurait pas lieu si elle ne visait à répondre à une demande, cette approche impute la responsabilité des impacts environnementaux au consommateur final.

L'empreinte matières de l'Europe et de la France se révèle sensiblement supérieure à leur extraction domestique, traduisant un recours aux ressources du reste du monde (importations) pour satisfaire leur demande interne (27% dans le cas de l'UE et 36% pour la France). Selon cette approche, l'UE et la France captent une part des ressources mondiales supérieure d'environ 1/3 à leur poids dans la population mondiale. Au total, l'empreinte matières par habitant de l'Europe (16,5 tonnes) et de la France (17 tonnes) s'avèrent sensiblement plus élevées que la moyenne mondiale (12,5 tonnes).

- **Approche globale (ou apport total de matières) :**

Elle prend en compte l'ensemble des matières nécessaires au fonctionnement de l'économie, c'est-à-dire aussi bien les matières nécessaires pour satisfaire la consommation finale du territoire que celles incorporées à ses exportations. Cette approche considère que les enjeux de souveraineté et de soutenabilité ne concernent pas seulement la satisfaction de la demande domestique mais également la capacité à exporter.

L'apport total de matières nécessaire au fonctionnement de l'économie européenne est plus de deux fois supérieur à l'extraction domestique. En d'autres termes, plus de la moitié des matières mobilisées chaque année par l'UE provient du reste du monde. Selon cette approche, l'Europe capte environ 12% des ressources extraites à l'échelle globale, soit le double de son poids (6%) dans la population du globe. L'écart est nettement moins marqué à l'échelle de la France, même si elle capte elle aussi une part des ressources bien supérieures à son poids dans la population.



Source : International Resource Panel – Global Material Flows Database

QUELLES CLÉS D'ANALYSE DES ENJEUX PROSPECTIFS ?

Le travail de repérage des tendances et enjeux mené dans cette étude s'organise autour d'une dizaine de clés d'analyse :

1. **Définition et caractéristiques** : quelles sont les caractéristiques physiques du matériau ?
2. **Procédés de fabrication et principaux usages** : comment est obtenu ce matériau et quels sont ses principaux usages ?
3. **Tendances de consommation, production et importations** : quelle est l'évolution de la consommation et de la production de la France ou de l'Europe ? Quelle est la dépendance de la France ou de l'Europe aux importations ?
4. **Disponibilité de la ressource** : quels risques de disponibilités futures sont-ils prévisibles, aussi bien concernant les ressources/productions nationales que les importations ? (à ce propos, voir l'annexe 1 sur les notions de criticité et les critères associés)
5. **Circularité** : quel est le niveau de recyclage actuel du matériau ? Quel potentiel de recyclage peut-on attendre pour le futur ?
6. **Décarbonation** : l'extraction, la transformation et/ou l'usage de ce matériau sont-ils fortement émetteurs de gaz à effet de serre ? Le recours à ce matériau est-il essentiel aux stratégies de décarbonation ?
7. **Autres impacts environnementaux et sociétaux** : l'extraction, la transformation et/ou l'usage de ce matériau ont-ils un impact significatif sur, par exemple, la biodiversité, la santé, etc. ?
8. **Substituabilité** : ce matériau soulève-t-il un fort enjeu de substitution, soit pour être remplacé par d'autres, soit pour se substituer à d'autres ?
9. **Innovation** : quelles sont les principales tendances en matière d'innovation autour de ce matériau ? Sur quelles catégories de matériaux se concentre aujourd'hui l'effort d'innovation ? Quels objectifs principaux guident l'effort d'innovation ?
10. **Territoire** : Ce matériau renvoie-t-il à des matières premières, des activités de transformation ou des usages présents en région AURA/lyonnaise ?

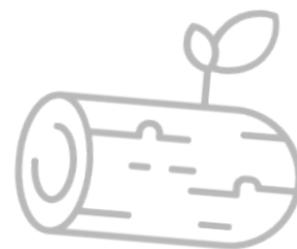
Une première phase exploratoire a permis de retenir 9 catégories de matériaux soulevant les enjeux les plus significatifs au regard de ces clés d'analyse (sans ordre hiérarchique) : le bois, les fibres textiles, le caoutchouc, le ciment, les matériaux en plâtre/terre cuite, le verre, les matériaux composites, les plastiques et les métaux. La partie suivante synthétise les enseignements clés pour chacun de ces matériaux.

Analyse des enjeux par catégories de matériaux

Bois Boris Chabanel	11
Fibres textiles Boris Chabanel	21
Caoutchouc Boris Chabanel	31
Ciment Aurélien Boutaud et Boris Chabanel	37
Plâtre et terre cuite Marina Bellot et Mylène Martin	45
Verre Aurélien Boutaud	55
Composites Aurélien Boutaud	61
Plastiques Marina Bellot et Mylène Martin	67
Métaux Mathieu Grandperrin	77



BOIS



En résumé – Matériau naturel renouvelable présentant des propriétés physiques remarquables, le bois fait l'objet de multiples usages en tant que bois d'œuvre (charpente, meubles, menuiseries, etc.), bois d'industrie (papier-carton, panneaux) et bois énergie. Comptant sur une ressource forestière abondante et diversifiée, la France s'est fixée un objectif d'accroissement de la récolte de bois afin de contribuer aux objectifs de la Stratégie Nationale Bas Carbone (stockage du carbone via la construction bois) et combler son déficit commercial pour les produits bois. Toutefois, plusieurs facteurs écologiques et socio-économiques pourraient faire obstacle à cette ambition.



Définition et caractéristiques

Le bois est un matériau naturel renouvelable d'origine végétale. Il est constitué par un tissu végétal rigide formant la plus grande partie du tronc, des branches et des racines des plantes ligneuses (arbres, arbustes et buissons) et assurant le rôle de conduction de la sève des racines jusqu'aux feuilles et le rôle de soutien mécanique de la plante. Le bois est un organisme vivant, constitué de cellules qui se reproduisent en se divisant dans l'espace compris entre le bois du tronc et l'écorce.

Les propriétés physiques du bois ont fait de lui une matière première particulièrement appréciée pour de nombreux usages en tant que matériau et combustible : résistance mécanique à la traction et à la compression, densité permettant la flottaison, durabilité, pouvoir isolant et calorifique, etc.



Procédés de fabrication et principaux usages

L'amont forestier correspond aux activités de sylviculture (éclaircie et conservation des forêts, boisement et reboisement, etc.) et d'exploitation forestière (abattage et débardage, etc.). En aval, on distingue trois grands types d'utilisation et de transformation du bois, correspondant à des niveaux de valorisation décroissant.

– **Le bois d'œuvre** : Il désigne tous les bois de dimension suffisante (diamètre et longueur du tronc sans branches) (illustration du bois d'œuvre) et de qualité supérieure pour être transformés par les activités de **sciage-rabotage-façonnage**



et de **placage-déroulage** (fabrication de contreplaqué), dont les produits sont utilisés pour la fabrication de charpente, parquet, menuiserie, ameublement, emballage, etc.

– **Le bois d'industrie** : concernant les autres bois de coupe inférieure (<25 cm pour les feuillus et <14 cm pour les résineux) ainsi que les coproduits (copeaux, sciures, etc.) issus des scieries et activités de transformation du bois d'œuvre, il alimente principalement les activités de **fabrication de pâte à papier** (utilisée pour la fabrication de papier et de carton) et de **fabrication de panneaux de fibres et de particules de bois** (utilisés pour la fabrication de charpente, parquets et revêtements de sols, menuiserie, ameublement, emballage, etc.).

– **Le bois énergie** valorisant les mêmes matières premières que pour le bois industrie (petit bois et résidus de transformation), il est destiné à la combustion (bûches, granulés, etc.) ou à la carbonisation (charbon de bois).



Tendances de consommation, production et importations

Le bois d'œuvre et d'industrie en 2019, c'est...



Représentant la plus grande part de la consommation de bois de la France, **les usages matériaux** – bois d'œuvre et bois d'industrie – sont appelés à progresser sensiblement à l'avenir sous l'impulsion de la Stratégie Nationale Bas Carbone (cf. décarbonation). Celle-ci prévoit en effet une forte progression de la consommation annuelle de produits bois à longue durée de vie dans la construction (charpente, bardage, panneaux, isolants, parquets, etc.).

Le **bois énergie** représente à lui seul près d'1/3 de la consommation primaire d'énergie renouvelable en France, soutenue par son utilisation croissante dans les installations de cogénération et de production de chaleur (telles que les chaufferies bois). Toutefois, après avoir progressé dans les années 2000, la consommation de bois de chauffage est plus atone ces dernières années, en raison notamment du recul des ventes d'appareils de chauffage au bois pour le résidentiel depuis 2013 (à l'exception des chaudières et poêles granulés). À l'avenir, la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2019-2023 (PPE) prévoit des objectifs ambitieux d'augmentation de la consommation de chaleur issue de la biomasse (entre +31% et +41% entre 2017 et 2028), portés avant tout par le logement collectif (développement des réseaux de chaleur et chaufferies biomasse) et l'industrie (remplacement de chaudières fossile par des chaudières biomasse).

Du point de vue de la production, la récolte forestière nationale est actuellement insuffisante pour satisfaire la consommation intérieure. La France présente en effet un déficit extérieur croissant sur les échanges de produits bois (hors bois énergie). Plus précisément, la France est exportatrice nette de bois bruts (+2,1 millions de tonnes) et importatrice nette de bois transformés (-4,3 millions de tonnes). Les principaux déficits concernent les meubles, les produits des industries papiers-cartons, et les sciages de conifères. En valeur, le déficit du commerce extérieur augmente fortement en 2021 et atteint 8,6 milliards d'euros. Ce déficit pourrait cependant se réduire à l'avenir avec l'augmentation de la récolte de bois et le triplement de la production de produits bois pour la construction prévus par la SNBC.



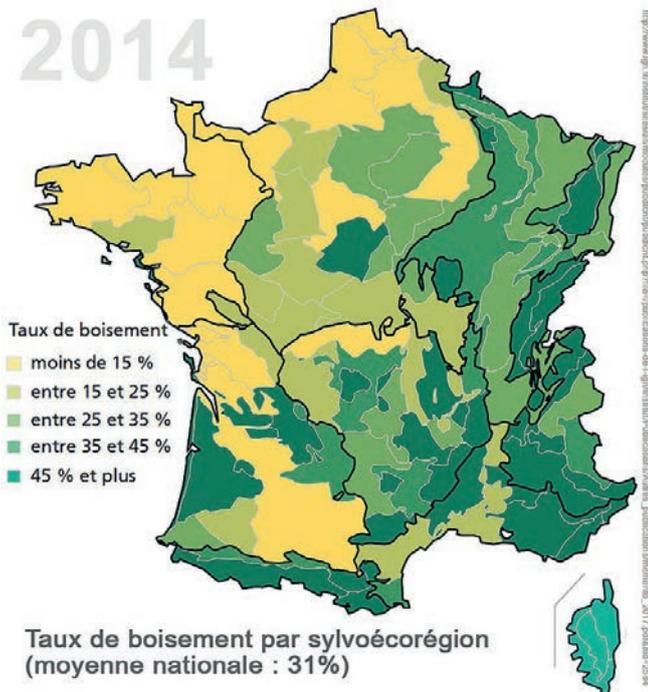
Disponibilité de la ressource

La France dispose d'une ressource forestière significative. Après être tombée à environ 9 millions d'hectares au début du 19^e siècle, la surface forestière nationale augmente durablement en raison d'une moindre pression sur la ressource permise notamment par l'intensification de l'agriculture (mécanisation, intrants chimiques, etc.) et le boom des énergies fossiles. Elle atteint 17 millions d'hectares aujourd'hui et progresse d'environ 80 000 ha par an. Grâce à l'accroissement biologique (quantité de bois produite chaque année par la croissance des arbres), le stock de bois sur pied connaît lui aussi une forte progression (+50% depuis le milieu des années 1980) pour atteindre désormais 2,8 milliards de mètres cubes. En croissance, la forêt présente également une grande diversité d'espèces et une large part de feuillus comparativement aux autres pays européens.

La forêt techniquement exploitable peut être scindée en trois parties :

- **Les forêts d'essences à usage principal matériaux** (présentant un accroissement naturel moyen de 11 m³/ha/an) regroupant le sapin pectiné (Auvergne-Rhône-Alpes et Grand Est), l'épicéa commun (idem), le pin maritime (Nouvelle-Aquitaine), le douglas (Auvergne-Rhône-Alpes) et le peuplier (Hauts-de-France). Ces forêts procurent 73% de la récolte nationale de bois d'œuvre, bien que n'oc-

2014



cupant que 17% de la surface forestière. Elles sont donc stratégiques du point de vue des besoins de la filière car elles couvrent tous le champ des usages du bois.

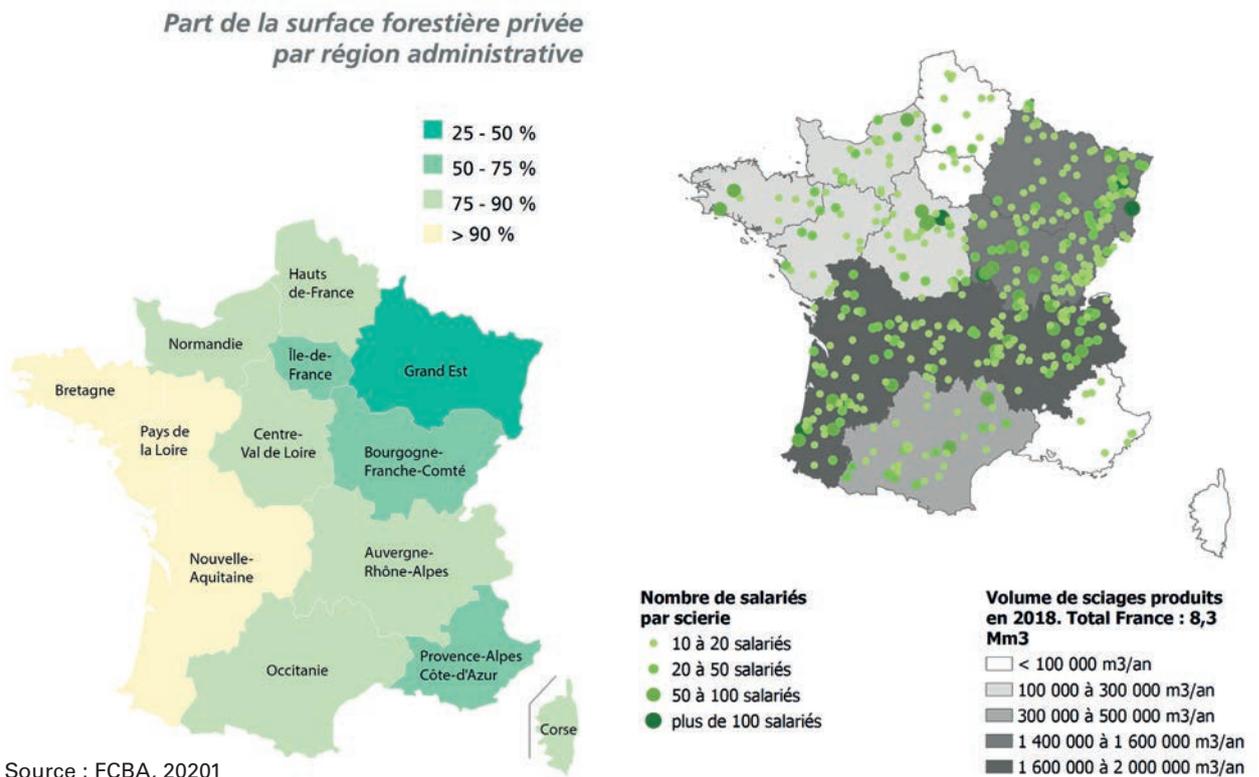
- **Les forêts d'essences à vocation matériaux** (présentant une productivité inférieure à la catégorie précédente : 4 m³/ha/an) : les chênes nobles (Grand-Est, Bourgogne-Franche-Comté), le hêtre (Auvergne-Rhône-Alpes, Grand-Est, Hauts-de-France) et tous les autres résineux (le pin sylvestre, le pin laricio, le mélèze, le cèdre, le pin d'Alep...). Ces forêts occupent 42% de la surface forestière mais ne procurent que 24% de la récolte de bois d'œuvre.
- **Les forêts dans lesquelles la valorisation en bois matériaux est marginale** (pour des raisons de qualité et de coûts de revient), à savoir toutes les autres essences de feuillus.

Sur la période 2011-2019, **le volume des prélèvements est en moyenne de 50,1 millions de mètres cubes par an, soit 56% de l'accroissement annuel**; en sachant que seule une partie de la récolte fait l'objet d'une valorisation commerciale : 38 millions de m³ (Mm³) en 2019, dont 19,6 Mm³ de bois d'œuvre, 10,5 Mm³ de bois d'industrie et 8,1 Mm³ de bois énergie. Le reste correspondant pour l'essentiel au bois énergie autoconsommé. **La Stratégie Nationale Bas Carbone prévoit une amplification de la récolte de bois et de la part orientée vers des usages matériaux à longue durée de vie** (voir décarbonation) : augmentation de 1,2 Mm³ jusqu'en 2035 puis ralentissement de la progression (+0,8 Mm³ par an) pour atteindre **83 Mm³ en 2050**.

Toutefois, plusieurs facteurs pourraient remettre en question l'atteinte cet objectif :

- **La mortalité des arbres connaît une nette augmentation ces dernières années**, notamment due aux crises sanitaires liées à des conditions climatiques à la fois difficiles pour les arbres (les sécheresses impactant une grande superficie des forêts françaises sont particulièrement récurrentes au cours des cinq dernières années, tandis que plus de la moitié des forêts seront classées à risque d'incendie d'ici à 2060 contre un tiers aujourd'hui) et propices à l'expansion géographique de pathogènes (concernant en particulier les épicéas, frênes et buis). La mortalité des arbres représente environ 10 millions de m³ par an sur la période 2011-2019, soit +35% par rapport à la période 2005-2013.
- **Le renouvellement des forêts d'essences à usage principal matériaux n'apparaît pas assuré** : faible part des jeunes arbres dans ces forêts (même constat concernant les forêts d'essences à vocation matériaux).
- La forêt française est détenue par une myriade de propriétaires privés peu impliqués dans sa valorisation : les forêts publiques ne constituent que 25% de l'ensemble.
- **Les bois d'œuvre français ne seraient pas suffisamment adaptés aux attentes du marché**. Si la diversité d'essence de la forêt française constitue une richesse au plan de la biodiversité et de la résilience aux aléas, elle apparaît en revanche comme un frein pour répondre aux enjeux d'industrialisation des activités de transformation aval, et notamment concernant la construction bois. Pour nombre d'acteurs, les bois d'importation (Scandinavie, Allemagne) affichent une compétitivité supérieure en matière de coût, de qualité et de fiabilité d'approvisionnement.
- **L'exploitation forestière est freinée par plusieurs facteurs** : décalage entre l'augmentation du coût du travail et l'évolution des prix des bois (même si ces derniers atteignent des records en 2022), faible attractivité du métier, difficultés d'exploitation dans certains territoires (montagne), absence de documents de gestion sur plus de la moitié des surfaces forestières.

- **L'appareil de première transformation (sciage) ne permet pas de valoriser la diversité des bois français** : à l'instar des exploitations agricoles, les scieries françaises connaissent une tendance à la concentration, qui se traduit par une baisse de leur nombre (environ 1300 en 2019, -30% en dix ans) et une augmentation de leur taille moyenne ; leur production en m³ connaît une baisse tendancielle depuis la crise de 2008 (-22% depuis 2007) ainsi qu'une spécialisation croissante sur les résineux pour répondre aux tendances du marché de la construction bois.
- **L'intensification de l'exploitation de la forêt suscite un débat croissant à la fois au plan scientifique et citoyen.** Il concerne d'une part les pratiques de coupes rases et de remplacement de forêts naturelles par des plantations industrielles, qui sont perçues comme dommageables au puit de carbone forestier (voir décarbonation), à la biodiversité et au paysage.



Point de débat : la forêt française est-elle surexploitée ?

- 57% de l'accroissement naturel annuel est récolté. Ce taux peut cependant dépasser les 60% pour les feuillus dans les régions Hauts de France et Bourgogne-Franche-Comté, et les 90% pour les résineux en Nouvelle-Aquitaine, Bretagne et Hauts de France.
- Les prélèvements annuels sont en augmentation (+18% entre les périodes 2005-2013 et 2011-2019), mais la récolte commercialisée stagne ;
- La très grande majorité des coupes de bois faites en France (hors catastrophes naturelles) ne sont pas des coupes rases mais des coupes partielles : les coupes rases concernent chaque année moins de 1% de la surface forestière, leur surface moyenne est inférieure à 4 ha et ces chiffres demeurent stables.
- Le renouvellement forestier est essentiellement assuré par la régénération naturelle : on évalue à un peu plus de 2 millions d'hectare la superficie de la forêt ayant donné lieu à plantation, soit 13% du total. Par ailleurs, 93% de la surface forestière est dominée par des espèces d'arbres autochtones.
- La part des peuplements de résineux dans les surfaces forestières stagne au cours des 30 dernières années.

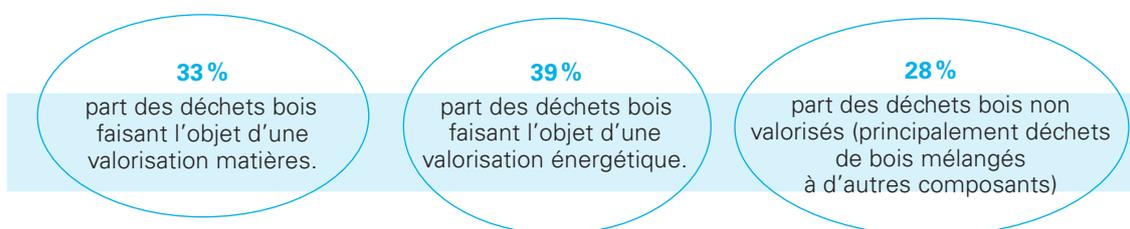


Circularité

La valorisation du bois s'inscrit de longue date dans une logique d'usages en « cascade » de la ressource. Les bois d'industrie et énergie sont souvent des coproduits de l'exploitation des bois d'œuvre et les résidus de la transformation des bois sont généralement valorisés au sein de la filière. Toutefois, le développement du bois énergie en France et en Europe suscite la controverse lorsqu'il court-circuite cette approche : selon certains, prélever du bois dans la forêt pour le brûler directement n'a aucun intérêt lorsqu'il peut être utilisé en tant que matériau, et le bois ne devrait être utilisé pour produire de l'énergie qu'une fois qu'il a été d'abord utilisé, réutilisé puis recyclé en tant que matériau chaque fois que c'est possible.

En aval, les déchets bois (déchets du BTP, meubles, papiers-cartons, etc.) peuvent faire l'objet de boucles de valorisation matière (réutilisation de palettes pour fabriquer un meuble, incorporation de papiers et carton usagés à la fabrication de nouveaux papiers-carton, etc.) ou énergétique (chaufferies biomasse, etc.). La Stratégie Nationale Bas Carbone prévoit de développer la réutilisation, le recyclage et la valorisation énergétique des produits bois en fin de vie.

Bilan du recyclage des déchets bois en 2019



Décarbonation

La Stratégie Nationale Bas Carbone considère **le secteur forêt-bois comme un secteur stratégique pour atteindre la neutralité carbone en tant que puit de carbone**. Les forêts et les usages du bois offrent plusieurs mécanismes de séquestration et de stockage du carbone :

- **Séquestration du carbone de l'atmosphère** (CO₂) grâce à la photosynthèse réalisée par les arbres et stockage dans la biomasse forestière (dont les sols). Ce levier constitue de loin la principale composante du puit de carbone forêt-bois.
- Stockage de carbone dans les produits bois (charpentes, meubles, etc.) : l'utilisation des produits bois permet de prolonger durablement ce stockage tout au long de leur cycle de vie.
- **Substitution matière** : l'utilisation des produits bois en substitution de matériaux plus consommateurs de ressources et d'énergies fossiles permet de réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre (par exemple, substituer du béton par du bois). On estime que pour 1 m³ de bois intégré dans les produits finis à la place de 1 m³ d'un autre produit plus énergivore, on peut éviter en moyenne l'émission de 1,6 tCO₂ d'origine fossile.
- **Substitution énergie** : le bois énergie se substitue aussi directement à l'utilisation d'énergies non renouvelables. Par exemple, remplacer un combustible fossile par un combustible issu du bois.

À travers ces différents mécanismes, **la filière forêt-bois permet de réduire d'environ 25% les émissions annuelles de gaz à effet de serre de la France**. Toutefois, la capacité du puit forestier tend à reculer en raison de la hausse de la mortalité (voir disponibilité de la ressource). **La SNBC prévoit une stabilité du puit de carbone forêt-bois d'ici 2050** autour de 52 millions de tonnes de CO₂ par an), mais elle opère un **changement drastique de sa composition** :

- **Réduction importante du puits forestier *in situ***, qui diminue de plus de 50% et passe de 59 MtCO₂/an en 2015 à 31 MtCO₂/an 1 en 2050, en raison d'une augmentation importante de la récolte de bois (qui contrebalance l'augmentation tendancielle des surfaces forestières).

- **Augmentation très importante du stockage de carbone dans les produits-bois**, grâce à l'augmentation de la récolte et le développement d'usage matériau du bois à longue durée de vie dans la construction. Le puits dans les produits-bois est estimé à 1,9 MtCO₂/an en 2015 2, et atteint 20 MtCO₂/an en 2050, soit une multiplication par plus de 10. Cet objectif est trois à quatre fois supérieur aux niveaux les plus ambitieux projetés dans les études prospectives récentes.

Point de débat : Face aux enjeux d'atténuation et d'adaptation, faut-il amplifier la récolte et le stockage de carbone dans les produits bois ou laisser la forêt se développer et évoluer naturellement ?

L'optimisation du puits de carbone que constituent les forêts opposent deux visions :

- Selon la vision « en flux », qui se fonde sur l'accroissement rapide des arbres durant leurs 50 premières années (pendant lesquels on observe les taux maximums de captation du CO₂), considère que l'exploitation d'arbres jeunes à des fins de bois d'œuvre permettrait de stocker le plus de carbone.
- Selon la vision « en stock », laisser vieillir les arbres serait plus efficace pour stocker du carbone au sein des écosystèmes forestiers : 80 % de la forêt française ayant moins de 100 ans, la capacité maximale de stockage dans la biomasse aérienne et les sols forestiers apparaît loin d'être atteinte. Cette option permet également d'éviter que l'intensification de l'exploitation forestière ne perturbe le stockage du carbone dans les sols.

Il importe également de prendre en compte l'enjeu d'adaptation des forêts au changement climatique qui oppose là aussi deux visions.

- Selon certains, les changements climatiques en cours sont trop massifs et rapides pour que les écosystèmes forestiers français puissent s'y adapter sans intervention humaine, ce qui implique de renouveler les peuplements exploités ou déperissant par des espèces plus adaptées aux conditions climatiques futures.
- Pour d'autres, intensifier la récolte pour accélérer le renouvellement des peuplements n'a pas de justification dans la mesure où les déperissements observés en 2018 et 2019 sont aussi révélateurs de la faiblesse de peuplements fragiles qui n'étaient pas adaptés à la station pédoclimatique. De plus, plus une forêt est ancienne, plus elle est diversifiée, et plus elle est diversifiée, plus elle est capable de surmonter des chocs en s'appuyant sur sa diversité génétique et sur les interactions entre espèces.



Autres impacts environnementaux et sociétaux

Outre sa capacité à séquestrer le carbone et à fournir des ressources, la forêt offre de nombreux services écosystémiques essentiels : régulation de la température et du microclimat local, qualité et disponibilité en eau, qualité de l'air, protection contre les aléas naturels (crues, avalanches, glissements de terrain, etc.) et des littoraux (stabilisation des dunes, de certains traits de côte, etc.), formation et stabilisation des sols.

De plus, les écosystèmes forestiers abritent des communautés animales et végétales riches et diversifiées au sein desquelles se tisse un réseau complexe d'interactions. On note que la diversité des espèces d'arbres présents en France (90 espèces feuillues et 16 résineuses) est stable, ainsi qu'une amélioration ou le maintien de certaines caractéristiques reconnues comme importantes pour les espèces forestières, comme la présence de bois mort ou de très gros arbres vivants, ainsi que la progression de la continuité des surfaces forestières. D'autre part, après une phase d'érosion à la fin des années 1980, l'abondance des oiseaux communs forestiers s'est stabilisée. Toutefois, 24 % des oiseaux forestiers font partie des espèces reconnues comme menacées, et 13 % des reptiles et amphibiens forestiers.

À noter, l'état et l'évolution de la biodiversité forestière dans son ensemble restent encore mal connus.

Par ailleurs, les importations de bois et produits dérivés provenant de pays tropicaux représentent 8% de la déforestation importée de l'UE (derrière le soja, l'huile de palme et la viande de bœuf), ce qui contribue à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (changement d'affectation des sols) et à l'érosion de la biodiversité.



Substituabilité et alternatives

La forêt apparaît difficilement substituable au regard de ses fonctions multiples (en particulier au regard de l'objectif de neutralité carbone), aussi bien au plan écologique qu'économique. La production de bois est au contraire appelée à l'avenir à se substituer à d'autres ressources, en particulier aux énergies fossiles et aux matériaux minéraux (béton, parpaings, etc.).

Par exemple, l'entreprise iséroise Construction Composites Bois a lancé en récemment le produit Lignoroc, un béton de bois à bilan carbone négatif. Selon Les Échos, « un m³ de ce matériau, où les granulats ligneux remplacent le sable et le gravier, présente un bilan négatif de -236 kg de CO₂. Le procédé de fabrication mécanique, très peu transformateur, n'a pas recours à la chimie, car le produit fini n'a besoin d'aucun traitement anti-feu, ni anti fongique, ni anti-termites. »



Innovations

Les enjeux de R&D concernent en large partie la nécessité de clarifier les débats concernant l'orientation à donner à la gestion des forêts pour concilier les objectifs d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, de préservation de la biodiversité, d'augmentation de la récolte de bois pour répondre à la demande domestique. En ce sens, la Feuille de route pour l'adaptation des forêts au changement climatique adopté par le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation en décembre 2020 prévoit de renforcer la recherche sur les nouvelles essences et les ressources génétiques forestières, les nouveaux modèles sylvicoles, sur les mélanges et le comportement des essences en interactions, les diagnostics pédoclimatiques, les nouveaux outils et leviers numériques (télédétection, LiDAR, etc.), les impacts du changement climatique sur les forêts et sur la biodiversité, et sur les conséquences éventuelles sur l'exploitation forestière.

Enjeu territorial / Grand Lyon et AURA

Le devenir de la forêt se pose tout particulièrement en région Auvergne-Rhône-Alpes, 2^e région française en termes de surfaces forestières, 1^{ère} pour le stock de bois sur pied, 2^e pour la récolte de bois d'œuvre, 1^{ère} pour les sciages commercialisés et 1^{ère} pour la valeur ajoutée et le nombre d'emplois dans la filière bois dans son ensemble.

La spécialisation régionale dans le bois d'œuvre – constituant les trois quarts de la récolte commercialisée, contre la moitié en France – constitue un atout et peut s'appuyer sur la complémentarité de ses principaux massifs : sciage pour le Massif central, construction bois pour les Alpes. L'exploitation concerne plus particulièrement les résineux. Les feuillus régionaux, 45% du volume de bois sur pied, représentent seulement 8% des grumes récoltées (27% en France).

Détenue à 81% par des propriétaires privés, la forêt régionale apparaît comme la plus morcelée de France. De plus, l'accessibilité est souvent difficile, notamment dans les Alpes, et de nombreuses zones sont ainsi peu exploitées, moins de la moitié de la production biologique annuelle étant prélevée.

Principales sources utilisées

- Ademe (2022), Bilan National du Recyclage 2010-2019 - Évolutions du recyclage en France de différents matériaux : métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois
- Agreste, Enquête Exploitations forestières et scieries
- Agreste, Direction générale des douanes et droits indirects (DGDDI)
- Bailly Alain (2020), état des lieux de l'amont de la filière forêt-bois en France, FCBA, FCBA info, juillet 2022
- Baylé Nicolas (2019), Les services rendus par les écosystèmes forestiers : une évaluation dans le cadre du programme Évaluation française des écosystèmes et services écosystémique, Fondation pour la recherche sur la biodiversité
- Castro Amélie (2022), Biodiversité et coupes rases en forêt, élevons le débat, La Tribune
- CESE (2021), Face au changement climatique, quelle sylviculture durable pour adapter et valoriser la forêt française ?
- Commissariat Général au Développement Durable (2022), Bilan énergétique de la France pour 2020, Service des données et études statistiques
- Debouzy Ivan, Leurs Yann (2021), Une ressource forestière abondante, de fortes spécialisations locales dans sa valorisation, Insee, Insee Analyses Auvergne-Rhône-Alpes, Juin 2021, n° 123
- Delpont Lea (2021), Lignoroc, le premier béton de bois à bilan carbone négatif, Les Echos, 16 février 2021
- FCBA (2021), Carbone Forêt-Bois : des faits et des chiffres. Édition 2021
- FCBA (2020), Memento 2020
- FCBA et BIPE (2019), Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments
- I4CE (2022), Puits de carbone : l'ambition de la France est-elle réaliste ? Analyse de la Stratégie Nationale Bas-Carbone 2
- IGN Mémento de l'inventaire forestier, 2021
- La Fabrique Ecologique (2019), Quel rôle pour la forêt dans la transition écologique en France ?
- Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020) – Stratégie Nationale Bas-Carbone – Mars 2020
- Ministère de la Transition écologique et solidaire Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2028
- Piton B. (Coordinateur) (2021). État et évolution des forêts françaises métropolitaines : synthèse des indicateurs de gestion durable 2020 - Institut national de l'information géographique et forestière. 33 pp.
- Sergent Arnaud (dir) (2018, La compétitivité des filières locales pour la construction bois : état des lieux, enjeux et perspectives d'évolution, FCBA et IRSTEA
- WWF (2021), Quant ls européens consomment, les forêts se consomment
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bois#>





FIBRES TEXTILES

En résumé – Les fibres textiles sont des substances filamenteuses d'origine naturelle (végétale ou animale) ou chimique (synthétiques ou artificielles). Les premières proviennent en large majorité du coton, dont la culture s'avère très consommatrice d'eau et d'intrants chimiques, tandis que les secondes sont essentiellement issues de la pétrochimie et donc fortement émettrices de gaz à effet de serre. Si la France est le premier producteur mondial de fibre de lin, elle demeure importatrice nette de produits textiles et d'habillement en raison d'une consommation toujours orientée à la hausse. La réduction de la consommation de fibres synthétiques et leur substitution par des fibres biosourcées et/ou recyclées constituent un enjeu de durabilité majeur.



Définition et caractéristiques

Les fibres textiles sont des substances filamenteuses d'origine naturelle – végétale (coton, lin, chanvre, etc) ou animale (laine, soie, etc.) – ou chimique. Cette seconde catégorie distingue les fibres artificielles (viscose, acétate de cellulose, etc.) obtenues par transformation chimique de substances naturelles et les fibres synthétiques (polyester, polyamide, élasthane, etc.) fabriquées à partir de polymères organiques et inorganiques provenant d'hydrocarbures (pétrole, gaz, charbon) ou de plastiques recyclés.

Ces différentes fibres présentent des propriétés spécifiques leur conférant des performances variables en termes de douceur, souplesse, élasticité, résistance, capacité absorbante, isolante, régulation de la chaleur, légèreté, etc. Les fibres naturelles sont réputées pour leur toucher doux et naturel et sont très confortables au quotidien. Elles absorbent très bien l'humidité mais en contrepartie elles s'alourdissent à cause du stockage d'eau et sèchent lentement. Contrairement aux fibres synthétiques, elles sont antistatiques. Les fibres chimiques sont généralement plus solides et plus résistantes à l'usure que les fibres naturelles. Les fibres synthétiques sont peu absorbantes et sèchent rapidement. Elles sont idéales pour les activités sportives car elles permettent d'évacuer facilement la transpiration. Elles sont également résistantes aux tâches ce qui donne des tissus faciles d'entretien.



Procédés de fabrication et principaux usages

Les fibres naturelles proviennent à 95% de la culture de plantes à fibres, et à près de 80% du coton. Cette fibre végétale provient des capsules de fleur de cotonnier, une plante qui s'épanouit dans les régions tropicales et subtropicales caractérisées par un climat chaud et humide. La récolte du coton commence dès que les capsules s'ouvrent et laissent apparaître une boule d'ouate. Après la cueillette ou l'arrachage, les fibres peuvent être séchées naturellement (air ambiant et soleil) ou artificiellement, dans un courant d'air chaud. Il faut ensuite séparer les graines des fibres à l'aide d'une égreneuse avant la mise en balles. Les fibres sont alors classées et étiquetées suivant leur qualité avant d'être expédiées vers la filature où elles seront transformées.

Il convient de mentionner que la France figure parmi les principaux producteurs mondiaux de lin et de chanvre. Plus ancienne fibre du monde, le lin se présente sous l'aspect d'une tige unique qui peut atteindre un mètre de hauteur et sur laquelle se répartissent une centaine de feuilles. Planté au printemps, le lin est arraché en juillet. Les tiges sont ensuite déposées au sol en andains (nappe de lin d'une largeur de 1 m). Vient ensuite le « rouissage », phase naturelle de transformation de la plante en fibre via l'alternance de pluie et de soleil. Grâce à l'action des micro-organismes et des bactéries présents sur le sol, le rouissage élimine la pectose qui soude les fibres textiles à la partie ligneuse de la plante.

Les fibres artificielles sont issues quant à elles de procédés de transformation chimique de substances naturelles, généralement à partir de cellulose, un biopolymère d'origine végétale. Suivant le procédé de fabrication, cette cellulose est régénérée (viscose) ou transformée (acétate, triacétate). **Les fibres synthétiques** quant à elles sont obtenues par réaction chimique complexe d'hydrocarbures appelée polymérisation.



Les domaines d'application des fibres textiles sont multiples. Si l'habillement (vêtements, chaussures) et la maison (linge, rideaux, etc.) sont les plus connus, le textile est utilisé dans la quasi-totalité des secteurs industriels : véhicules de transport, agriculture (protection des cultures), sport, bâtiment (toitures tendues, voiles géotextile, etc.), etc.

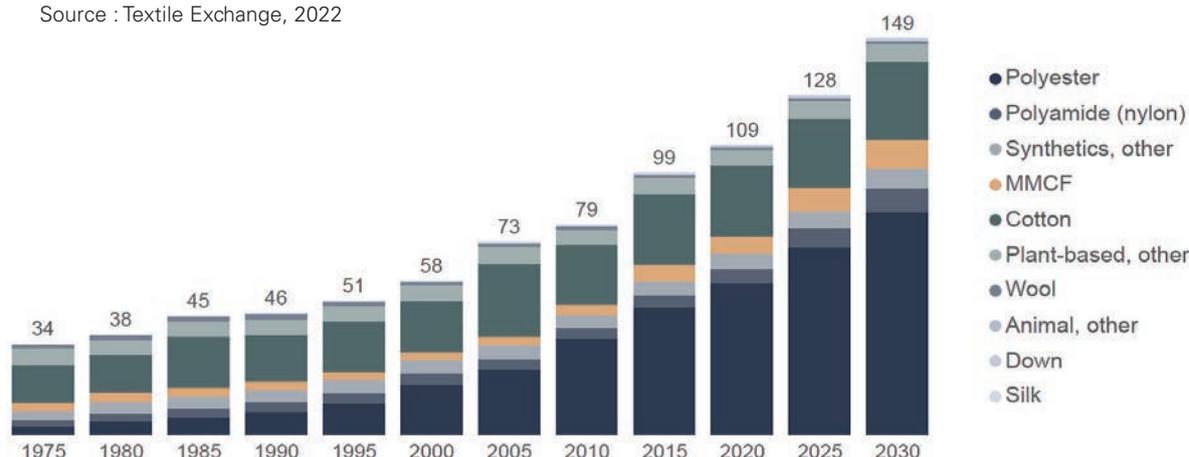
<https://textileaddict.me/quelle-est-la-difference-entre-une-fibre-et-un-filament/>



Tendances de consommation, production et importations

Production mondiale de fibres (en millions de tonnes)

Source : Textile Exchange, 2022



La production mondiale de fibres a battu un nouveau record en 2021 en atteignant 113 millions de tonnes, soit une multiplication par deux en 20 ans. Rapportée à la population, elle est passée de 8,4 kg par personne en 1975 à 14,3 kg en 2021. La poursuite des tendances de consommation pourrait conduire à une production mondiale de 149 millions de tonnes en 2030. Les fibres synthétiques dominent le marché depuis le milieu des années 1990 et représentent aujourd'hui 64% de la production mondiale (54% pour le seul polyester), contre 28% pour les fibres végétales (22% pour le coton), 6,4% pour les fibres artificielles et 1,7% pour les fibres animales. La Chine domine de manière écrasante la production de fibres synthétiques, tandis que l'Inde et la Chine représentent à elles seules près de la moitié de la production mondiale de coton.

En France, on observe un fléchissement de la consommation finale (en valeur) de produits textile et d'habillement depuis la crise économique de 2008. Toutefois, les volumes de textile (et chaussures) mis en marché continuent de progresser entre 2019 (648 000 tonnes, 9,7 kg par habitant) et 2021 (715 000 tonnes, 10,5 par habitant). La croissance de la consommation en volume est tirée notamment par l'essor de la « fast fashion » (ou mode éphémère) qui se caractérise par un renouvellement très rapide des vêtements proposés à la vente (plusieurs fois par saison) afin de pousser le consommateur à acheter davantage de produits à bas prix pour suivre la dernière mode.

Du point de vue de la production de plantes à fibre, celle-ci s'élève à près de 850 000 tonnes en France en 2020, en progression de 44 % au cours des 5 dernières années (les fibres ne représentent cependant qu'une partie de la matière récoltée). L'hexagone est le 1^{er} producteur mondial de lin – qui représente 88 % de la production nationale – et le 2^e pour le chanvre – 9% de la production. La production de lin se concentre en Normandie et dans les Hauts-de-France, tandis la région Grand-Est domine celle de chanvre. Toutefois, la plus grande partie du lin teillé est exportée en Chine pour être filée et tissée, puis réimportée sous forme de tissu ou de produits confectionnés. Le chanvre quant à lui est essentiellement utilisé pour des usages hors textile.



<https://choisir.lanormandie.fr/wp-content/uploads/2020/05/la-normandie-terre-de-lin3.jpg>

L'hexagone apparaît ainsi comme un pays exportateur net de fibres textiles (+383 millions d'euros, +250 000 tonnes) grâce à ses exportations de fibres de lin. Néanmoins, si l'on prend en compte l'ensemble des produits textile et d'habillement, quel que soit le niveau de transformation des matières, les échanges extérieurs de la France apparaissent nettement déficitaires (-9,5 milliards d'euros, -853 000 tonnes en 2021).



Disponibilité de la ressource

La majeure partie de la production mondiale de fibres étant constituée de fibres synthétiques, les principales limites qui pourraient être rencontrées à l'avenir concernent l'usage des combustibles fossiles. Ressources non renouvelables, ces dernières soulèvent un risque de raréfaction à moyen terme. Surtout, l'objectif de neutralité carbone adopté par un nombre croissant de pays implique une décarbonation de la filière textile. Selon différentes études, cette dernière passe par un recul de l'usage de fibres synthétiques, dont la fabrication est fortement consommatrice d'énergie et émettrice de gaz à effet de serre (voir décarbonation). Se passer des fibres d'origine fossile constitue un défi de taille pour la filière textile au regard de leur rôle dans l'essor de la fast fashion.

Maintenir la production de fibre textile, tout en faisant reculer celle de fibres synthétiques, pose la question du potentiel de développement des fibres d'origine végétale. S'agissant du coton, si les surfaces cultivées demeurent stables au cours des dernières décennies (autour de 30 millions d'hectares), la forte progression des rendements a permis une multiplication par trois de la production depuis les années 1950. Bien que cette progression ait nettement ralenti depuis la fin des années 2000, les dernières projections de la FAO tablent sur une croissance de la production dans les prochaines années (+1,6% par an), qui passerait de 27 millions de tonnes environ aujourd'hui à près de 32 millions en 2031. Au total, le coton peut difficilement prendre le relais des fibres synthétiques, d'autant plus dans un contexte où la demande poursuivrait sa croissance.

Dans le contexte français, le développement des surfaces et de la production de fibres de lin et de chanvre constitue un atout. Toutefois cette progression pourrait rencontrer deux limites : d'une part, la culture du lin demande des conditions pédoclimatiques (conditions au niveau du sol qui affectent les plantes) spécifiques que l'on ne rencontre que dans certaines régions françaises ; d'autre part, bien que cultivées en rotation (en alternances avec d'autres cultures), les surfaces consacrées au lin et au chanvre pourraient

entrer en conflit avec des cultures à usage alimentaire. *In fine*, là aussi le potentiel de production de fibres de lin apparaît en deçà des volumes de produits textiles consommés ou importés en France.

Enfin, une autre alternative réside dans le développement de la production de fibres recyclées (voir circularité).



Circularité

Face aux enjeux de disponibilité de la ressource et d'émissions de gaz à effet liées à la fabrication de fibres synthétiques, la circularisation des déchets textile apparaît comme un levier majeur pour assurer la soutenabilité des fibres textile en tant que matériau. Il faut dire que le gisement, et donc les marges de progrès, sont colossales. En France, 244 448 tonnes de textile et chaussures ont été collectées en 2021, soit environ 3,6 kg par habitant. Toutefois ces flux collectés ne représentent qu'une partie des produits jetés : à l'échelle de l'UE, 67 % des déchets textiles ne sont pas collectés et sont incinérés ou enfouis

La circularisation des déchets textiles peut permettre de réduire les besoins de matières premières (fibres naturelles et chimiques) et les impacts associés, ainsi que les déchets ultimes rejetés dans l'environnement (voir autres impacts environnementaux). Celle-ci s'organise dans le cadre de la filière REP (Responsabilité Élargie du Producteur) pilotée par l'éco-organisme Re-fashion..

Elle passe notamment par le développement du **recyclage des produits textile non réutilisables afin de fournir à la filière textile des fibres recyclées**. À l'heure actuelle, seule une infime partie (<1%) des matières recyclées est valorisée sous forme de fibres réincorporées à la production textile, l'essentiel étant orienté vers d'autres usages (fabrication de plastiques, isolants, etc.). Le recyclage en boucle fermée bute en effet sur plusieurs freins : exportation d'une large partie des flux de déchets collectés, baisse de qualité des

textiles collectés (dont une part décroissante peut faire l'objet d'un recyclage « textile to textile »), capacité et qualité du tri des matières insuffisantes, freins à l'industrialisation des procédés de récupération des fibres (défibrage, effilochage, régénération chimique, etc.), diversité et complexité des textiles mis en vente (mélange de fibres notamment), etc. De ce fait, la plupart des engagements d'incorporation de matériaux recyclés des marques textile, en particulier pour le polyester, sont satisfaits avec des matériaux provenant d'autres flux de déchets, tels que des bouteilles d'eau en plastique.

La circularisation des fibres textile implique tout d'abord un enjeu d'amélioration et d'amplification des capacités de collecte afin d'éviter la perte de matières textiles dans les ordures ménagères et les déchets résiduels. Si la quantité de textile collectée a fortement augmenté ces dernières années, la sensibilisation du

La deuxième vie des textiles et des chaussures

Réutilisation



Recyclage



Combustible solide de récupération



Valorisation énergétique



Résultat du tri dans les 66 centres de tri en France et en Europe

Élimination



Source : Re_Fashion

consommateur et le maillage territorial des points de récupération ne sont pas encore optimal (enjeu de développer par exemple la collecte en magasins) et l'on observe des écarts importants de volume collecté entre départements. D'autant plus que le gisement potentiel devrait s'accroître sous l'effet de la loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire de 2020 (loi AGEC) : depuis le 1^{er} janvier 2022, il est interdit de détruire les produits textiles invendus, et obligatoire de recourir systématiquement au réemploi et au recyclage. À partir de 2025, les entreprises, administrations et collectivités auront l'obligation de trier à la source leurs déchets textiles.



Décarbonation

L'industrie mondiale de l'habillement génère plus de 3 milliards de tonnes d'émissions de gaz à effet de serre par an, soit près de 7% des émissions totales. En raison d'une intensité énergétique nettement supérieure et de ses intrants d'origine fossiles, la fabrication de fibres synthétiques présente une empreinte carbone (par tonne produite) nettement plus élevée que celle de la production de fibres coton. Toutefois la culture de coton n'est pas exempte d'émissions de gaz à effet de serre dans la mesure où elle implique l'usage massif d'intrants chimique (voir autre impacts environnementaux) dont la fabrication et l'usage en émettent.

La décarbonation de la filière textile nécessite de combiner différents leviers. Au stade de la fabrication des fibres, l'un des principaux leviers consiste à enrayer la croissance de l'usage de fibres synthétiques. Or, comme indiqué plus haut (disponibilité de la ressource), les fibres alternatives (biosourcées ou recyclées) ne sont pas en mesure de prendre le relais quantitativement. La réduction de la production de fibres synthétiques implique nécessairement une réduction de la consommation de produits textiles.



Autres impacts environnementaux et sociétaux

La culture du coton entraîne des impacts environnementaux majeurs. Pour se développer, le cotonnier a besoin de beaucoup d'eau, puis d'un temps sec pour favoriser l'ouverture de ses capsules. Environ 60% des régions productrices de coton s'appuient sur une culture pluviale. Dans les régions de la planète au climat plus aride, les champs de coton doivent être irrigués pour compenser le manque de précipitations. Ces régions représentent moins de la moitié des surfaces cultivées, mais assurent 75% de la production mondiale. Par ailleurs, les plantations de coton résistent mal à certaines maladies (virus, bactéries, champignons, insectes...), elles nécessitent l'emploi de grandes quantités d'engrais, insecticides, pesticides et herbicides, polluant potentiellement les eaux de surface et souterraines par le ruissellement et impactant la biodiversité..

Pour réduire l'utilisation de ces produits et augmenter le rendement des exploitations (+ 50% en 20 ans), certaines variétés de coton transgénique particulièrement résistantes sont sélectionnées. Actuellement, on estime que le coton génétiquement modifié représente environ 80% des superficies cotonnières dans le monde. La production durable de coton implique une utilisation plus efficace de l'eau, une réduction du recours aux produits chimiques toxiques et la mise en œuvre de techniques agricoles qui préservent les sols. À l'heure actuelle, 19% de la production mondiale de coton est couverte par l'une des quatre principales certifications de production durable (Better Cotton Initiative, Certified organic, Fairtrade, Cotton made in Africa).

Un autre impact environnemental majeur à souligner est celui des pollutions de l'eau, des sols et des écosystèmes induit par le rejet dans l'environnement de textiles usagés. À l'échelle mondiale, 70% des déchets textile non collectés sont mis en décharge ou rejetés dans l'environnement. Principalement constitués de fibres synthétiques, ces déchets entraînent des pollutions des sols, de l'eau et des écosystèmes pendant des centaines d'années : leur lessivage et leur décomposition entraîne la libération de microfibres et des produits chimiques toxiques dans le sol et les eaux souterraines, ainsi que l'émission de méthane dans l'atmosphère. Du reste, la pollution par les microfibres intervient dès le lavage et l'utilisation des produits textiles. On estime qu'environ un demi-million de tonnes de microfibres libérées des textiles synthétiques finissent dans l'océan chaque année. L'incinération des déchets textiles – ainsi que nombre d'invendus – entraîne également des émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants atmosphériques.

La production de lin présente en revanche de multiples avantages. Cette culture n'a pas besoin d'arrosage, nécessite 10 fois moins de traitements phytosanitaires que le coton et améliore la qualité des sols. De plus l'ensemble des parties de la plante sont valorisables :

- Les **graines** peuvent être utilisées pour la production de semences, la fabrication d'huile alimentaire et cosmétique, de solvants, de tourteaux, etc.
- Les **fibres** sont peignées, filées et tissées, puis utilisées pour des usages textiles et techniques (matériaux composites, isolants, produits de papeterie, corderie, etc.).
- Les **pailles** sont utilisées sous forme de paillis, litière, combustible, ainsi que pour la fabrication de panneaux agglomérés, isolants, béton végétal, etc.



Substituabilité et alternatives

Le principal enjeu de substitution concerne la réduction de la production de fibres synthétiques et leur remplacement par des fibres naturelles durables et/ou recyclées.

Ceci pose la question de la disponibilité quantitative des substituts ainsi que celle de leur qualité et performance au regard de celles des fibres synthétiques. Concernant le recyclage des textiles, on constate un écart important entre les volumes mis sur le marché et les volumes de produits usagés collectés chaque année, ce qui limite de fait la part que pourrait représenter les fibres recyclées dans les produits neufs.



Innovations

La production de fibres textiles soulève deux grands enjeux d'innovation. Le premier concerne le développement et l'industrialisation des procédés de tri (composition, couleur, etc.) et de recyclage (défilage, effilochage, etc.) des textiles non réutilisables en vue d'une valorisation matière. L'automatisation de ces étapes apparaît indispensable à la construction d'une filière de recyclage d'envergure et économiquement viable. Les capacités et la qualité du tri matière constituent en effet le principal goulot d'étranglement du recyclage textile. On distingue aujourd'hui quatre procédés de recyclage – mécanique, thermique, chimique et en mélange – qui entraînent différents besoins de R&D :

- L'amélioration des connaissances sur les possibilités et limites de l'usage des fibres recyclées ;
- Le développement de techniques de tri avancées afin de massifier et améliorer la qualité du matériau d'entrée ;
- Les solutions technologiques permettant d'éliminer, purifier et récupérer les additifs et les colorants des fibres textiles recyclées ;
- L'augmentation de la quantité et de la qualité des fibres issues des processus de recyclage.

Le second porte sur la mise au point de nouveaux matériaux biosourcés. Par exemple, la start-up Bysco basée à Nantes valorise les déchets issus de la production de moules en transformant le byssus – ces filaments qui permettent aux mollusques de s'accrocher aux rochers, en fibres textiles. L'entreprise a prévu de produire 35 000 mètres carrés de matériaux textiles commercialisés auprès des industriels dans toute l'Europe à l'horizon 2024. Autre exemple, l'entreprise américaine Ecovative, entreprise pionnière dans la culture et le développement de matériaux en Mycélium (filaments de champignons) cultivé dans des fermes verticales et disponible à grande échelle comme un textile alternatif aux matières animales et pétrochimiques.

À noter, le pôle de compétitivité Techtera lance un groupe de travail avec le secteur agricole pour développer des additifs chimiques (par exemple des colorants) à partir de déchets agricoles ou alimentaires.

Enjeu territorial / Grand Lyon et AURA

L'industrie textile est présente de longue date en Auvergne-Rhône-Alpes, première région textile de France, représentant un peu plus du quart des entreprises, des emplois et du chiffre d'affaires national. La région présente une forte spécialisation dans le tissage, le tricotage et l'ennoblissement, tournée principalement vers les marchés des textiles techniques, des vêtements de travail et du luxe.

S'agissant de la production de fibres textiles, la production de fibres naturelles ou synthétiques est quasi-inexistante en région Auvergne-Rhône-Alpes. En aval, le recyclage des textiles constitue une préoccupation forte des acteurs de la filière, en particulier du pôle Techtera qui a mis en place le club RECIT (Recyclage et Economie Circulaire dans l'Industrie Textile) afin de contribuer à la structuration d'une filière de valorisation des déchets textiles à fort ancrage territorial. Techtera soutient également plusieurs projets de R&D sur le sujet. Dans le cadre du Contrat stratégique de filière Mode et luxe, il pilote en particulier un projet partenarial de démonstrateur de recyclage chimique des textiles en fin de vie dans la vallée de la chimie (budget estimatif : 20 M€). Il s'agit plus précisément de développer une technologie chimique pour retransformer et récupérer un polyester blanchi, de grande qualité, sous formes de granulats, prêts à être fondus et refilés en France. Ce projet s'appuie sur un procédé innovant breveté par l'entreprise japonaise Jeplan offrant plusieurs avantages : recyclage de vêtements multi-matières, suppression de l'étape du démantèlement et de la suppression des points durs (boutonniers, boutons, fermetures-éclair...) par dissolution des matières par procédé chimique ; production d'une matière fiable au niveau de qualité requis pour l'industrie de l'habillement (le procédé de filage exigeant un niveau de pureté difficile à atteindre avec les solutions existantes).

La filière circulaire peut s'appuyer notamment sur 4 centres de tri conventionnés avec Re-Fashion et en capacité de traiter de gros volumes : EVIRA (Isère), Alpes TLC (Savoie), Le relais 42 (Loire), Le tri d'Emma (Loire). D'autres initiatives sont également notables en matière de recyclage : participation de l'entreprise Tissages de Charlieu (Loire) au développement de la plateforme de recyclage Renaissance Textile, fabrication de couvertures de déménagement à partir des fibres et déchets textiles industriels par l'entreprise Les Nouveaux Textiles (Rhône).

Principales sources utilisées :

- Agence d'urbanisme de l'aire métropolitaine lyonnaise (2022), Textile, habillement et cuir en région lyonnaise. Des industries historiques porteuses d'innovation et de renouveau, Janvier 2022
- Ademe (2022), Le revers de mon look
- CESER (2022), Le lin en Normandie. La filière de l'après-demain ?
- Chaire BALI (2020), Les leviers technologiques pour mettre en œuvre une mode circulaire
- Cook Gary, Rommwatt Maya (2020), Fashion forward : A Roadmap to Fossil Free Fashion, Stand.earth
- CRESS Auvergne-Rhône-Alpes (2022), Note d'opportunité : textile, ess et réemploi, mars 2022
- Euratex (2022), Facts & key figures 2022 of the european textile and clothing industry
- European Commission (2021), Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling
- European Environment Agency (2019), Textiles and the environment in a circular economy
- FAO (2022), Tendances et perspectives récentes du marché mondial du coton et évolution des politiques
- Insee, Comptes nationaux 2021
- International Energy Agency (2018) The future of petrochemicals
- McKinsey, Global Fashion Agenda (2020), Fashion on climate
- OECD-FAO (2022), Agricultural Outlook 2022–2031
- Quantis (2018), Measuring fashion. Environmental Impact of the Global Apparel and Footwear Industries Study
- Refashion (2022), Cartographie des produits issus du recyclage des textiles usagés
- Refashion (2021), Rapport d'activité 2021
- Textile Exchange (2022), Preferred Fiber & Materials Market Report 2022
- <http://news.europeanflax.com/>
- <https://textileaddict.me/fibres-textiles-comment-les-choisir/>
- <https://textileaddict.me/les-fibres-artificielles/>
- <https://textileaddict.me/les-fibres-synthetiques/>
- <https://textileaddict.me/le-lin-textile-en-6-questions/>
- <https://textileaddict.me/la-fibre-de-chanvre-textile/>
- <https://www.unitex.fr/filiere-textile/chiffres-cles/>





CAOUTCHOUC

En résumé – Matériau élastique et imperméable, le caoutchouc est produit à partir de ressources renouvelables (hévéa) ou de combustible fossile. Génératrice d'impacts sociaux, environnementaux et climatiques importants, la filière cherche à innover sur l'ensemble du cycle de vie. Si la circularité de la gestion des déchets pneumatiques est à mettre en avant, des innovations pour améliorer la durabilité de la filière caoutchouc sont à l'étude.



Définition et caractéristiques

Le caoutchouc est une substance élastique et imperméable provenant du latex de plantes tropicales ou obtenue à partir d'hydrocarbures fossiles.

Le caoutchouc naturel présente une résistance élevée à la traction, à la déchirure, à l'usure et l'exposition à l'eau et à certains produits chimiques. Il offre également une excellente adhérence à d'autres matériaux et une faible résistance au roulement.

Le caoutchouc synthétique partage bon nombre des qualités les plus recherchées du caoutchouc naturel. Il est également plus résistant à l'abrasion, à la graisse, à l'huile et à la chaleur que le caoutchouc naturel (certaines variétés de caoutchouc synthétique sont même ignifuges). Comme le caoutchouc naturel, le caoutchouc synthétique est très flexible, mais le synthétique conserve cette flexibilité même à basse température.



Procédés de fabrication et principaux usages



La majeure partie de la production de caoutchouc naturel provient de la récolte du latex issu de plantation d'hévéa. Naturellement sécrété par les arbres, le latex est un liquide blanc laiteux collecté par incision de l'écorce des troncs de manière à ce qu'il s'écoule dans des godets placés juste au-dessous, jusqu'à ce qu'il commence à coaguler et que l'écoulement cesse. Le latex fraîchement récolté est filtré et conditionné en fûts. Ce fluide grumeleux est roulé en feuilles dans un moulin afin d'éliminer l'eau. Les feuilles de latex sont ensuite traitées avec des produits chimiques et séchées dans des «fumoirs» afin d'obtenir des balles de caoutchouc. Des stabilisants et d'autres ingrédients peuvent être introduits à ce stade, en fonction des propriétés finales souhaitées du caoutchouc. À noter, pour palier certains inconvénients du latex sous sa forme naturelle – il devient collant et fond à la chaleur, casse au froid et se coagule et brunit à l'air libre – l'étape de vulcanisation consiste à chauffer le caoutchouc brut et y incorporer un agent vulcanisant, généralement du soufre, afin de relier entre elles les chaînes de macromolécules. Le matériau obtenu n'est plus affecté par la température et conserve son élasticité.

Mise au point au début du 20^e siècle, la fabrication de caoutchouc synthétique débute par un mélange d'hydrocarbures, généralement à partir de pétrole ou de charbon, qui est raffiné pour produire du naphta, une huile inflammable. Le naphta est combiné avec du gaz naturel pour créer des monomères, tels que le butadiène, le styrène, l'isoprène, le chloroprène, l'éthylène et le propylène. Cette substance est ensuite polymérisée à l'aide d'un catalyseur et de vapeur de traitement, formant des chaînes de polymères pour créer du caoutchouc. À ce stade, les caoutchoucs synthétiques peuvent être davantage vulcanisés si nécessaire.

Mise au point au début du 20^e siècle, la fabrication de caoutchouc synthétique débute par un mélange d'hydrocarbures, généralement à partir de pétrole ou de charbon, qui est raffiné pour produire du naphta, une huile inflammable. Le naphta est combiné avec du gaz naturel pour créer des monomères, tels que le butadiène, le styrène, l'isoprène, le chloroprène, l'éthylène et le propylène. Cette substance est ensuite polymérisée à l'aide d'un catalyseur et de vapeur de traitement, formant des chaînes de polymères pour créer du caoutchouc. À ce stade, les caoutchoucs synthétiques peuvent être davantage vulcanisés si nécessaire.

Plus largement, les caoutchoucs sont des produits formulés dont la composition ne contient en moyenne qu'environ 50% de polymère, ce qui est peu en comparaison des plastiques qui sont composés essentiellement de polymère. Un objet en caoutchouc contient donc également des charges avec un effet renforçant, des plastifiants (d'origine pétrolière ou végétale), etc.

Côté usage, la majeure partie de la production mondiale de caoutchouc est destinée à la fabrication de pneus. Le caoutchouc a également de nombreux usages dans l'industrie, par exemple dans les courroies, flexibles, supports antichocs, isolateurs de vibrations, joints et gaines de câbles informatiques, ou la fabrication de jouets, équipements de sport et chaussures. Le latex est quant à lui très utilisé pour des applications médicales (gants).



Tendances de consommation, production et importations

La production mondiale de caoutchouc est estimée à environ 30 millions de tonnes en 2021, se répartissant presque à part égale entre caoutchouc naturel et caoutchouc synthétique. Le premier connaît une croissance exponentielle : sa production double entre 2000 et 2021, passant de 7 à 14 millions de tonnes. Bien qu'originaires d'Amérique du Sud, la culture de l'hévéa s'est fortement développée dans le Sud-Est asiatique : la Thaïlande et l'Indonésie représentent à elles seules environ 60% de la production mondiale. Ayant connu elle aussi une croissance constante au cours des dernières décennies, la production de caoutchouc synthétique se stabilise autour de 15 millions de tonnes ces dernières années. La Chine en est le principal pourvoyeur (22% de la production mondiale) suivie par l'Europe (15%) et les États-Unis (13%).

Du côté de la consommation, l'Europe représente 8% de la consommation mondiale de caoutchouc naturel et 14% de celle de caoutchouc synthétique, en deuxième position derrière la Chine (respectivement 43% et 31%). La consommation française de caoutchouc représente 257 000 tonnes en 2021, dont 81 000 pour le naturel et 176 000 pour le synthétique (Centre français du caoutchouc et des polymères). Elle répond pour l'essentiel aux besoins des industries de transformation en aval.

La production française de caoutchouc synthétique s'élève à 424 000 tonnes en 2021 (Centre français du caoutchouc et des polymères), dont une part significative est exportée. À partir de la production de caoutchouc synthétique et des caoutchoucs importés, l'industrie française de transformation du caoutchouc a produit 330 000 tonnes de pneumatiques (à 57% pour les véhicules de tourisme) et 315 000 tonnes de caoutchoucs industriels en 2019 (European Tyre & Rubber Manufacturers' Association).

À noter : la fabrication de pneumatiques et autres produits en caoutchouc intègre également d'autres matières premières (polyester, résines, etc.).

Du point de vue des échanges extérieurs, la France présente cependant un net déficit extérieur concernant les produits en caoutchouc brut et produits transformés, respectivement -600 000 tonnes et -1,7 milliard d'euros en 2021.

En tendance, on observe une croissance du tonnage de pneumatiques mis sur le marché en France sur la dernière période (564 000 tonnes en 2019 contre 504 000 tonnes en 2016) alors que la production française est en net recul (-57% entre 2007 et 2019).



Disponibilité de la ressource

La poursuite de la croissance de la production mondiale de caoutchouc naturel ne va pas de soi. Elle est menacée par la propagation possible en Asie du Sud-Est de maladies touchant la culture de l'hévéa, qui ont par le passé rendu presque impossible toute culture à grande échelle en Amérique latine. En plus de cette menace, il faut ajouter celle du changement climatique et la multiplication des phénomènes extrêmes qu'il induit (épisodes de sécheresse et inondation en particulier). Une autre limite est la disponibilité des surfaces pour les plantations d'hévéa, dont l'extension par le passé s'est faite en large partie au détriment des forêts (voir le paragraphe Autres impacts environnementaux et sociétaux).

Il y a peu de secteurs qui ne soient pas dépendants du caoutchouc naturel sous une forme ou une autre. C'est la raison pour laquelle la Commission Européenne a intégré

en 2017 le caoutchouc naturel à sa liste des matières premières critiques. Celui-ci figure même parmi les matières présentant l'importance économique la plus forte.

À l'instar de la production de fibres synthétiques (voir fiche dédiée), la fabrication de caoutchouc synthétique pourrait buter à l'avenir sur les contraintes qui pèsent sur l'usage des combustibles fossiles. Ressources non renouvelables, ces dernières soulèvent un risque de raréfaction à moyen terme. Surtout, l'objectif de neutralité carbone adopté par un nombre croissant de pays implique une décarbonation de la filière caoutchouc (voir paragraphe Décarbonation).



Circularité

Pour ce qui concerne les pneumatiques, on observe un taux de collecte élevé en France (93% des pneus usagés en 2019). Si une baisse de ce pourcentage s'est certes fait ressentir en 2020 (85%) du fait de l'impact de la pandémie de Covid-19 sur l'économie française, ces chiffres montrent une bonne structuration de la filière sur l'enjeu de la circularité.

La collecte et le traitement des pneumatiques sont très majoritairement couverts par la filière responsabilité élargie du producteur (REP). Ces actions impliquent éco-organismes tels qu'Aliapur ou GIE-FRP, et des initiatives issues d'accords entre les pouvoirs publics et les producteurs de pneumatiques (exemple : la collecte et le traitement des pneus d'ensilage usagés, géré par l'association ENSIVALOR). Soulignons également que le Code de la commande publique a été complété d'un article (L.2172-6) statuant que les achats de pneumatiques de l'État, des collectivités territoriales et leurs opérateurs doivent porter sur des pneus rechapés.



Les principaux débouchés à l'issue de la collecte sont la réutilisation des pneus (16%), ou le recyclage. Ce recyclage comprend la valorisation énergétique (44% des pneus usagés) et le recyclage matière (37%), le plus souvent sous forme de granulats. Cependant, si la circularité des pneumatiques est développée, il faut noter que 44% des pneumatiques traités le sont hors de France. Cela concerne surtout le recyclage, la réutilisation étant réalisée à 99% sur le territoire national.

Hors pneumatiques, la réutilisation et le recyclage du caoutchouc est moins documentée, ce qui est probablement dû à la présence de ce matériau dans une grande variété de produits et de secteurs économiques. Un enjeu pour ces volumes de caoutchouc serait d'avoir des filières de collecte et de traitement structurées, à l'image de ce qui se fait pour les déchets pneumatiques.

Du fait des matières premières utilisées (hévéa et combustibles fossiles) et des aspects stratégiques associés à celles-ci (voir Disponibilité de la ressource), la circularité du caoutchouc est un levier important pour limiter les impacts environnementaux, sociaux et climatiques associés à leur exploitation (voir Décarbonation et Autres impacts environnementaux et sociétaux). Nous pouvons également souligner l'enjeu de souveraineté économique lié à ces matières premières (voir Substituabilité et alternatives)



Décarbonation

L'enjeu de décarbonation pour les produits à base de caoutchouc se situe à la fois au niveau des matières premières (déforestation due aux cultures, utilisation de combustible fossile), et lors des étapes de fabrication du produit fini.

La culture de l'hévéa est en effet une cause de déforestation, mettant en danger des puits de carbone qui ne seront pas remplacés par le stockage dans les hévéas (durée de vie de moins de 50 ans, saignées régulières). Ensuite, il faut considérer l'impact lié au transport depuis les cultures vers les usines de transformation. Ici une piste consiste en des cultures alternatives (voir le paragraphe Substituabilité et alternatives). Concernant le caoutchouc synthétique, se pose la question de faire reculer le recours au pétrole ou au charbon pour la production.

En plus de ces enjeux associés aux matières premières, la décarbonation des étapes de transformation est un levier d'action important. Les pistes d'action sont partagées par

l'ensemble de l'industrie chimique : diminuer la consommation d'énergie (ou son intensité carbone) utilisée lors des procédés, et réduire les émissions de gaz à effet de serre lors des étapes de transformation. Notons qu'une source importante d'émissions carbone de l'industrie chimique, le vapocraquage, est une étape impliquée dans la fabrication du caoutchouc synthétique.

Enfin le dernier levier est d'étendre la durée de vie des produits, ou de développer leur recyclage et leur réutilisation, permettant de limiter le besoin en production de caoutchouc.



Autres impacts environnementaux et sociétaux

Les importations de caoutchouc naturel figurent parmi les importations de l'UE contribuant le plus à la déforestation dans les pays tropicaux, et donc à l'érosion de la biodiversité dans ces régions. En effet, entre 2003 et 2014, près de 75 000 km² de terres ont été convertis à la culture d'hévéa au Vietnam, Laos, Birmanie, Cambodge et en Thaïlande, et 70 % de cette expansion s'est faite sur des surfaces forestières.

Face à ce phénomène, l'Union européenne a scellé un accord historique en décembre 2022 pour mettre fin à l'importation de produits issus de la déforestation sur le continent. Le cacao, le café, le soja, l'huile de palme, le bois, la viande bovine mais aussi le caoutchouc sont concernés, ainsi que plusieurs matières associées (cuir, ameublement, papier imprimé, charbon de bois, pneus, cosmétiques, etc.). Concrètement, l'importation dans l'UE de ces produits sera interdite s'ils sont issus de terres déboisées après décembre 2020. Les entreprises importatrices, responsables de leur chaîne d'approvisionnement, devront prouver la traçabilité via des données de géolocalisation des cultures, qui pourront être associées à des photos satellitaires. Notons qu'au-delà de la déforestation, cette filière est polluante du fait de l'utilisation importante d'intrants chimiques.

Les importateurs devront aussi « vérifier la conformité avec la législation du pays de production en matière de droits de l'homme ». En effet, la majorité du caoutchouc naturel provient de petits producteurs, qui sont exposés à divers risques relatifs à leurs revenus et leur santé, notamment via utilisation d'intrants chimiques nocifs. L'exploitation d'enfants et l'importance des volumes de travail sont également existants, et sont cités par le milieu associatif comme des enjeux de durabilité de la filière du caoutchouc naturel.



Substituabilité et alternatives

Selon certains observateurs, il importe désormais de s'orienter vers des sources alternatives de matière première (latex ou pétrole) pour pallier les impacts associés à la culture de l'hévéa et à la raréfaction du pétrole.

Outre le recyclage, deux plantes, le pissenlit russe et le guayule, sont identifiés depuis longtemps comme capables de fournir un caoutchouc de qualité équivalente. De plus, le pissenlit russe peut être cultivé en Europe. Elles font l'objet de plusieurs expérimentations aux États-Unis et en Europe (voir paragraphe Innovation). Certains produits commercialisés contiennent du caoutchouc de pissenlit, comme les baskets ZEROØGRAND II, et le guayule est déjà utilisé pour la production de latex.

L'enjeu d'aujourd'hui semble donc être d'étendre et de pérenniser l'utilisation de ces composés dans la fabrication de pneumatiques qui est le débouché principal du caoutchouc.



Innovations

Au sujet des innovations pour la filière du caoutchouc, nous pouvons identifier deux principaux axes : le choix d'alternatives à l'hévéa pour le produit naturel, et la régénération du produit vulcanisé.

S'agissant de la production de caoutchouc naturel à partir de plantes alternatives, Bridgestone a fabriqué les premiers pneus 100% caoutchouc de guayule en 2015. Toutefois les différences de prix avec le caoutchouc issu de l'hévéa freinent la percée de ces solutions. Nous pouvons également citer Continental qui mise sur le pissenlit russe, et sur le Taraxagum produit par le végétal pour remplacer le latex de l'hévéa. Ces pistes permettraient de réduire certains impacts associés à la culture de l'hévéa sur les plans environnementaux et sociaux, et de cultiver la matière première en Europe.

L'autre axe d'innovation concerne le recyclage des pneus. En effet, une fois vulcanisé, le caoutchouc est «figé», limitant son recyclage. La régénération consiste à rompre les chaînes moléculaires pour retrouver un état plus brut. Ce procédé est encore en cours d'expérimentation, mais permettrait d'élargir les possibilités de recyclage du caoutchouc. Plusieurs initiatives ont lieu au niveau national et européen. Il s'agit notamment du projet BlackCycle porté par un consortium européen coordonné par Michelin. Il vise à concevoir l'un des tous premiers procédés de production de nouveaux pneus à partir de pneus usagés. Des recherches sont également effectuées dans des laboratoires spécialisés, par exemple au Laboratoire de recherches et de contrôle du caoutchouc et des plastiques à Vitry-sur-Seine.

Enjeu territorial / Grand Lyon et AURA

Les enjeux de disponibilité, de circularité et de décarbonation du matériau caoutchouc ne sont pas anodins dans une région comptant la présence d'un des leaders mondiaux de la fabrication de pneumatiques : Michelin. À noter également, la présence de Goodyear à Montluçon et Riom.

Michelin est impliquée dans plusieurs projets de R&D sur ces sujets, dont certains cités dans le paragraphe précédent. L'ensemble de la filière est couvert : du choix de la matière première au recyclage du produit usagé.

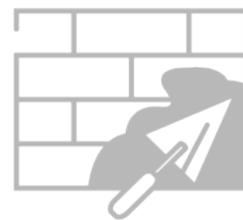
La région regroupe également de nombreuses compétences liées à la filière caoutchouc à travers le pôle de compétitivité POLYMERIS, dont le siège se situe à Bellignat, dans l'Ain. Il anime un réseau de 380 adhérents et un écosystème de 65 organismes partenaires dans la recherche, la formation, les laboratoires et les centres techniques industriels (CTI). Polymeris a structuré sa stratégie de Recherche et Développement autour de l'économie circulaire et de l'industrie du futur avec les piliers socles du pôle : les matériaux, les procédés et les produits fonctionnalisés. L'un des projets labellisés portent sur l'analyse du potentiel de valorisation des caoutchoucs à recycler.

Principales sources utilisées :

- Ademe (2021), Pneumatiques – Données 2020 – Rapport annuel
- Aliapur, Rapport d'activité 2021 (<https://www.aliapur.fr/uploads/pdfs/essentiel-aliapur-2021.pdf>)
- European Commission (2020), Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report
- European Tyre & Rubber Manufacturers' Association (2021), European Tyre and Rubber Industry Statistics 2021
- Gauthier Vincent (2022), Caoutchouc, chauffe qui pneu, Socialter n°50, Février-Mars 2022
- In Extenso Innovation Croissance, Venice Graf, Sarah Pérennès. Ademe, Thomas Grandin. Septembre 2021. Pneumatiques – Données 2020 – Rapport annuel - 58 pages.
- Insee, comptes nationaux
- Novethic (2022), Café, cacao, soja, huile de palme... Les produits issus de la déforestation vont être bannis de l'Union européenne, Publié le 06 décembre 2022
- The Shift Project (2022), Décarboner la chimie française, Janvier 2022
- Rubber World (2022), International Rubber Studies Group release latest industry outlook
- WWF (2021), Quand les européens consomment, les forêts se consomment
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Caoutchouc_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Caoutchouc_(mat%C3%A9riau))
- <https://www.ace-laboratories.com/how-rubber-is-made-for-industrial-uses/>
- <http://www.industrialrubbergoods.com/>
- <https://scienceagri.com/10-worlds-largest-natural-rubber-producers/>
- <https://www.syndicatdupneu.org/marche-pneumatique/>
- <https://lelementarium.fr/product/caoutchoucs-elastomeres-resines-styreniques/>
- <https://www.ecologie.gouv.fr/pneumatiques>
- <https://www.worldwildlife.org/projects/transforming-the-global-rubber-market>



CIMENT



En résumé – Le ciment est un liant hydraulique fabriqué à partir de calcaire et d'argile chauffés à haute température pour produire le clinker, matière première principale du ciment traditionnel. Associé à différentes matières minérales – gravats, sable – il forme le béton. Alors que sa production a baissé de moitié en France depuis cinquante ans, la consommation mondiale de ciment a quant à elle considérablement augmenté du fait de l'urbanisation des pays émergents. Très émettrice de CO₂, la production de ciment doit considérablement réduire ses émissions pour devenir compatible avec les exigences climatiques. Cela passe par des innovations de procédés, mais sans doute aussi par une modération de son utilisation.



Définition et caractéristiques

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre sèche, majoritairement préparée à partir de calcaire et d'argile. Une fois hydraté, le ciment prend alors la forme d'une pâte qui est généralement mélangée à des matières minérales comme le sable ou le gravier, auxquelles il va servir de liant en se solidifiant, afin de constituer une sorte de roche artificielle : le béton.

Du fait de sa solidité, de sa praticité, de sa capacité à se marier avec plusieurs matériaux (minerais, acier) et à épouser de nombreuses formes, le ciment est devenu l'un des matériaux les plus couramment utilisés dans la construction de bâtiments et d'infrastructures (ponts, routes, etc.).



Procédés de fabrication et principaux usages

Le ciment est constitué majoritairement de calcaire et d'argile. Ces deux éléments, très abondants dans la croûte terrestre, sont extraits dans des carrières puis transformés dans des cimenteries. Plusieurs procédés peuvent être utilisés, par voie sèche ou humide, afin de broyer la matière première puis l'homogénéiser, avant de la mettre à cuire dans un four rotatif. La température d'environ 1500°C va provoquer une série de réactions chimiques, dont une décarbonation (très émettrice de CO₂). Au cours de la cuisson, la matière se transforme en grains solides de clinker qui, une fois refroidis, seront broyés afin d'obtenir une poudre qui est la principale composante des ciments communs.



Nodules de clinker incandescent à la sortie du four- [Hot_Clinker.jpg](#).
Macau500derivative work: Addicted04.
Public domain, via Wikimedia Commons

D'autres éléments peuvent être additionnés au clinker, selon les caractéristiques mécaniques désirées : gypse, silices, schistes, cendres, etc. On distingue plusieurs familles de ciment :

- Le ciment Portland contient au moins 95% de clinker, additionné de gypse (sulfate de calcium) afin de régulariser la prise. Il s'agit du ciment généralement utilisé pour produire du béton armé ou du béton précontraint.
- Le ciment Portland composé contient quant à lui au moins 65% de clinker, auquel sont ajoutés des composés divers, notamment des sous-produits de l'industrie comme les laitiers (résidus vitreux : silicate, aluminate et chaux) issus de haut fourneau, les cendres volantes ou la fumée de silice. Ces ciments sont en général adaptés à la plupart des travaux de maçonnerie.
- Le ciment de haut fourneau, qui est constitué majoritairement de laitiers de haut fourneau et minoritairement de clinker. Offrant une bonne résistance à l'eau, il est utilisé pour les travaux hydrauliques, les fondations, les ouvrages massifs, les barrages, les ouvrages de stockage, etc.

D'autres ciments spéciaux sont produits pour répondre à des usages spécifiques, intégrant plus ou moins de clinker et d'autres matériaux (Pouzzolane, cendres), ou utilisant des matériaux plus raffinés (pour le ciment blanc, par exemple, qui peut ainsi être teinté dans la masse).



Tendances, disponibilité et dépendances

En 2021, la production mondiale de ciment dépassait les 4,4 milliards de tonnes par an, soit environ 550 kg/hab/an. La Chine représente plus de la moitié de la production mondiale, et l'Europe seulement 3 à 4% (avec 171 millions de tonnes en 2021, soit un peu moins de 400 kg/hab/an).

Une production mondiale qui croît, tirée par les pays émergents

La production mondiale a constamment augmenté au cours du 20^e siècle, mais cette croissance a connu un ralentissement depuis une dizaine d'années. Cette production est très liée à l'évolution des secteurs du bâtiment et des infrastructures, et elle a été particulièrement portée au cours des dernières années par le dynamisme de la Chine. Les projections pour les années à venir sont délicates, car la consommation de ciment semble caractérisée dans beaucoup de pays industrialisés par un pic, suivi d'un déclin. La Chine pourrait atteindre un pic similaire dans les années à venir, mais celui-ci pourrait être compensé par la montée en puissance d'autres pays émergents, comme l'Inde, si bien qu'il est difficile de savoir quand le pic de production mondial aura lieu. Par ailleurs, même si les projections économiques sont optimistes quant à la croissance du marché mondial du ciment, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) rappelle que les exigences climatiques supposent une stagnation de la production mondiale dans la décennie 2020.

Une production nationale et déclin, et peu soumise aux échanges internationaux

En France, le pic de production de ciment a été atteint en 1974 avec 33 millions de tonnes, soit un niveau deux fois supérieur à la production actuelle (environ 16 millions de tonnes de ciment par an). Cette tendance à la baisse est appelée à se poursuivre à l'avenir pour répondre aux objectifs de la Stratégie Nationale Bas Carbone (voir décarbonation). Le scénario de référence de la SNBC prévoit en effet une réduction de la taille du marché avec une baisse du nombre de m² de bâtiments résidentiels et non résidentiels construits chaque année, combinée à un recul de la part de marché des matériaux les plus carbonés (dont le béton) au profit de la construction bois. Du reste, d'autres travaux (Ademe, The Shift Project) estiment également indispensables une réduction en valeur absolue de l'usage de ciment/béton pour atteindre la neutralité carbone en 2050.

La France, comme la plupart des pays européens, dispose de nombreux sites industriels qui sont généralement situés à proximité des carrières. Ces centres de broyage et cimenteries sont répartis de manière assez uniforme, à l'exception de régions comme la Bretagne, qui est sous équipée pour des raisons géologiques (absence de minerais appropriés, et donc de carrières). Une cinquantaine de cimenteries et de sites de broyage, et environ 2000 centrales de fabrication de béton prêt à l'emploi, sont présents sur le territoire. La production étant généralement proche des lieux de consommation, les échanges internationaux sont modestes et se limitent aux pays limitrophes. En 2016, la France avait par exemple une balance commerciale légèrement déficitaire, avec des importations provenant surtout de Belgique et d'Espagne.

On notera enfin que l'industrie du ciment en France est très concentrée : 95% de la production nationale est le fruit de cinq cimentiers (Ciments Calcia, Vicat, Eqiom, Holcim/Lafarge et Imerys).

Un matériau reposant sur des ressources abondantes, des procédés simples... mais énergivores

La raréfaction des matières premières nécessaires à la production de ciment ne semble pas être un enjeu au niveau mondial, le calcaire et l'argile étant abondants et faciles d'accès, et les technologies de transformation en clinker s'avérant techniquement et économiquement abordables. En revanche, il s'agit d'une ressource énergivore, dont les prix sont sensibles à ceux de l'énergie.



Circularité

L'industrie du ciment participe de longue date à la valorisation énergétique de certains déchets, qui peuvent être utilisés comme complément de carburant pour alimenter les fours des cimenteries : huiles usagées, déchets de bois, farines animales, pneus, etc. Ces déchets représentent en 2020 plus de 40 % des combustibles utilisés en France (contre 29 % en 2010).

Le BTP représente de loin le premier secteur producteur des déchets en France : environ 213 millions de tonnes en 2020, soit 69 % du total. Plus de 80 % des déchets du BTP proviennent des travaux publics, le reste du bâtiment. Le béton représente quant à lui moins de 10 % des déchets du BTP, mais près de 25 % des déchets des activités de gros œuvre. Si on en croit les filières professionnelles, 80 % des bétons de déconstruction collectés seraient valorisés : ils sont récupérés et traités dans des installations dédiées où ils sont concassés et triés, avant d'être utilisés en remblaiement ou dans les sous-couches des chaussées routières. Le reste, soit environ 20 % des bétons de déconstruction collectés, termine dans des installations de stockage de déchets inertes.

Le taux de recyclage en matériaux de construction nobles est en revanche très faible – la valorisation se faisant essentiellement en remblais. Un défi important des années à venir consiste à améliorer la recyclabilité du béton. Les normes NF granulats et béton ont par exemple été révisées afin de permettre une meilleure incorporation des résidus de béton concassé dans les nouveaux bétons, en substitution des granulats vierges. Plusieurs travaux sont également en cours pour permettre la fabrication de ciment recyclé, ce qui pourrait participer à économiser des ressources et, plus encore, à réduire l'empreinte carbone du ciment.



Décarbonation

La production de béton est un contributeur important au changement climatique puisqu'elle est responsable de 7 à 8 % des émissions de CO₂ dans le monde (et 2 à 3 % des gaz à effet de serre en France, mais 12 % des émissions du secteur industriel). Ces émissions sont très majoritairement liées à la production de clinker : d'abord lors de la réaction chimique produisant le clinker, ensuite du fait de la combustion d'énergies fossiles nécessaires pour cette réaction (fours de cimenteries). Plus marginalement, des émissions ont également lieu en aval de la production de clinker (transports, transformation, etc.). Selon les procédés utilisés (voie sèche ou humide) et selon les énergies utilisées dans les fours (charbon, houille, déchets, etc.) le bilan carbone du ciment peut varier. On estime qu'au niveau mondial, la production d'un kilogramme de ciment émet environ 1 kg de CO₂. En France, l'Ademe annonce un bilan carbone de 0,86 kg de CO₂ pour 1 kg de ciment Portland.

En France, pour un bâtiment à structure conçue en béton, les produits et solutions béton (utilisés en infrastructure et superstructure) contribuent en moyenne à hauteur de 30 à 40 % (et parfois jusqu'à 45 %) de l'impact en gaz à effet de serre des composants de construction. La trajectoire fixée par la RE2020 qui concerne uniquement les bâtiments neufs nécessite donc de décarboner l'industrie du ciment/béton.

La filière française s'est engagée à réduire de 24 % ses émissions à l'horizon 2030 et de 80 % en 2050 (par rapport à 2015). Le plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière prévoit de réduire l'intensité carbone de la production de ciment d'un facteur supérieur à 5, dans un scénario de demande constante. Plusieurs leviers d'action sont proposés pour y parvenir :

- La mise sur le marché de nouveaux ciments à plus faible teneur en clinker et de ciments alternatifs (voir innovation)
- L'intégration de sources d'énergies alternatives (biomasse, déchets de la chimie, combustibles solides de récupération).
- L'électrification des fours nécessaires à la formation du clinker.
- Le recours aux technologies de capture du carbone, qui apparaissent incontournables pour atteindre l'objectif à l'horizon 2050, mais qui sont aujourd'hui encore très hypothétiques – les technologies permettant de capter puis de séquestrer le CO₂ lié à la combustion des fours et au procédé de décarbonation du calcaire étant encore loin d'être opérationnelles.



Autres impacts environnementaux et sociétaux

En plus du ciment, la production de béton mobilise des quantités considérables de minerais non métalliques : roche, sable, granulats, etc. Les minerais non métalliques représentent en masse près de la moitié de l’empreinte matérielle française, soit 381 millions de tonnes en 2018 (5,7 t./hab). Les minerais de construction et d’aménagement représentent plus de 90% de ces masses, loin devant les minerais industriels. Même si ces minerais ne présentent pas d’enjeu de raréfaction à court terme, leur exploitation a toutefois un impact local non négligeable (paysage, qualité de l’air, nuisances sonores, etc.).

Le ciment et le béton sont par ailleurs souvent associés à l’urbanisation, à l’artificialisation des sols et au mitage des paysages. Comparativement au logement collectif, la maison individuelle est en effet particulièrement consommatrice de ciment.



Substituabilité et alternatives

Dans le contexte de la SNBC, l’objectif de neutralité carbone soulève un enjeu important de substitution des solutions ciment/béton par des matériaux bas-carbone à base de bois et autres matières biosourcés (voir fiche bois). Le recours à ces derniers peut permettre en effet non seulement d’éviter les émissions de gaz à effet de serre liés à la fabrication des matériaux à base de ciment, mais de stocker du carbone dans les bâtiments.

Un autre enjeu ici concerne la substitution des ciments/bétons classiques par des bétons bas carbone (voir innovations).



Innovations

L’effort d’innovation de la filière porte notamment sur la mise sur le marché de ciments à faible empreinte carbone. Pour ce faire, une première piste consiste à développer des ciments à plus faible teneur en clinker. Le principal frein technique réside ici dans la disponibilité en constituants secondaires pouvant se substituer à ce dernier. Les professionnels constatent en effet une tension croissante sur l’approvisionnement en laitier de haut-fourneau et en cendres volantes notamment du fait de la pression des politiques climatiques qui touchent également ces secteurs. À ce jour, un des principaux constituants envisagés pour poursuivre la baisse du taux de clinker sont les argiles calcinées (illustration d’argile calciné) qui ne génèrent pas d’émissions de process contrairement au clinker. Leur utilisation dans certains ciments (notamment les ciments LC3) est encore à l’étude et en cours de normalisation au niveau européen. On peut citer ici le procédé de fabrication de ciment sans clinker et à froid développé par l’entreprise Hoffmann Green Cement Technologies ; celui-ci permet une réduction de 75% des émissions de carbone par rapport au ciment Portland.

Une deuxième piste concerne le développement de ciments alternatifs comprenant de nouveaux clinkers (hydrosilicate de calcium, alcali-activé, etc.) obtenus avec des températures de cuisson inférieures au clinker actuel. En région Auvergne-Rhône-Alpes, l’entreprise Vicat projette par exemple de produire du ciment incorporant de la bauxite, avec un procédé nécessitant une température de chauffe moindre et générant moins de décarbonation, pour des économies de gaz carbonique de l’ordre de 30%. Toutefois, selon la feuille de route de l’European Cement Association, le développement des ciments alternatifs ne représente pas un gros potentiel de décarbonation dans la mesure où leurs propriétés physico-chimiques les cantonnent souvent à des applications spécifiques ce qui en fait un marché de niche.

Troisième piste, celle des « bétons biosourcés » (ou « végétaux »), obtenus par mélange de particules végétales (chanvre, lin, bois, miscanthus...), avec du liant, de l’eau et parfois des adjuvants. L’entreprise Construction Composites Bois développe par exemple des panneaux préfabriqués biosourcés en béton de bois (pour murs porteurs, murs de remplissage, planchers, etc.) avec des caractéristiques techniques fortes et un très grand confort thermique. En tant que matériaux biosourcés, ils permettent le stockage du carbone et présentent également l’avantage d’être plus léger qu’un béton classique et d’offrir d’excellentes propriétés d’isolation thermique et acoustique. *A contrario*, les performances mécaniques des produits sont généralement faibles : les particules végétales ont notamment une résistance à la compression intrinsèquement plus faible, alors même que cette

caractéristique est déterminante dans certains usages du béton (résistance au poids des structures : point, immeubles, etc.).

Un autre chantier en matière de R&D concerne l'électrification des fours. Le processus de formation du clinker nécessite des températures élevées qui sont généralement atteintes avec des combustibles fossiles. L'électrification du four rotatif permettrait de fournir la chaleur nécessaire en se substituant aux sources fossiles. Pour cela, plusieurs technologies sont à l'étude notamment le chauffage par résistance ou par torche plasma (qui peut atteindre des températures entre 3 000 et 5 000°C. D'après l'AIE, l'électrification des fours cimentiers se situerait à un niveau de maturité de 4 sur 9. Celle-ci fait l'objet de plusieurs projets de recherche, en Suède notamment.

On peut enfin mentionner les projets de R&D portant sur le processus de recarbonatation du béton. En effet, les matériaux cimentaires piègent chimiquement du CO₂ atmosphérique au cours de leur durée de vie : une étude a estimé que près de 43% du CO₂ émis lors du processus de calcination du calcaire était compensé par la recarbonatation naturelle. Cette recarbonatation peut être accélérée en broyant finement les matières premières à carbonater pour maximiser la surface d'exposition et en jouant sur certains paramètres comme la pression et la température. C'est l'objet du projet Fast-Carb lancé en 2018 qui vise à étudier la carbonatation accélérée des Granulats de Béton Recyclés (GBR) pour piéger le CO₂. Le second intérêt de la recarbonatation accélérée est d'améliorer la qualité des GBR par le colmatage de leur porosité pour une réutilisation dans le béton et ainsi réduire la quantité de liant nécessaire.

Enjeu territorial / Grand Lyon et AURA

La filière du béton et du ciment est historiquement bien implantée dans la région Auvergne-Rhône-Alpes, qui dispose de ressources et d'entreprises de transformation bien réparties sur le territoire, allant des carrières jusqu'aux centrales de production de béton, en passant par les cimenteries et les centres de distribution de ciment. La région Auvergne-Rhône-Alpes est la première région productrice de ciment en France. Le groupe Vicat, qui possède son siège administratif à L'Isle d'Abeau (Isère), est particulièrement présent avec plusieurs carrières dans la région (Sassenage, Chambéry, Les Houches, Montalieu, Créchy) et plusieurs cimenteries (Saint-Laurent-du-Pont, Voreppe, Saint-Égrève, Créchy).

Face aux enjeux de décarbonation de la filière, Vicat s'illustre à travers différents projets. En partenariat avec Hynamics, filiale du Groupe EDF spécialisée dans la production d'hydrogène, Vicat développe une solution intégrée visant à capturer le carbone émis par ses cimenteries en vue de le combiner à l'hydrogène bas carbone produit par Hynamics pour fabriquer du méthanol décarboné. Par ailleurs, Vicat a prévu de débiter la production de ciment ternaire à partir de 2023. Autorisés à la vente depuis 2021 ces ciments présentent une composition permettant de réduire les émissions de CO₂ de moitié (voir innovation). Enfin, Vicat compte également porter à 100% d'ici 2025 (contre 55% en 2021) la part de déchets dans les combustibles de ses fours.

Principales sources utilisées :

- ADEME, 2021. «Les Plans de Transition Sectoriels pour décarboner l'industrie lourde française à l'horizon 2050», ADEME, mis en ligne le 3 décembre 2021. - <https://agirpoulatransition.ademe.fr/entreprises/demarche-decarbonation-industrie/actualites/plans-transition-sectoriels-decarboner-lindustrie>
- ADEME, 2021. *Plans de Transition Sectoriels - Ciment*. Synthèse mise en ligne sur le site de l'Ademe, mars 2021. - <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4727-ciment-memo-d-analyse-des-enjeux-de-decarbonation-du-secteur.html>
- ADEME, 2021. *Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière en France : Rapport final*, décembre 2021
- ADEME, 2022, *Déchets chiffres-clés. L'essentiel 2021*
- Anonyme, 2011. "Cement 101 – An introduction to the World's most important building material", Global Cement Magazine, mis en ligne le 11 août 2011. - <https://www.globalcement.com/magazine/articles/490-cement-101-an-introduction-to-the-worlds-most-important-building-material>
- Catalayud P., Mohkam K., 2018. *L'empreinte matières, un indicateur révélant notre consommation réelle de matières premières*. Commissariat Général au développement Durable, Paris. - <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/datalab-essentiel-142-empreinte-matiere-avril2018b.pdf>
- Chauvot M. 2021, *Le ciment franchit une étape cruciale vers le bas carbone*, Les Échos, 25 oct. 2021
- Guiraud P., 2005.«Caractéristiques et emplois des ciments», InfoCiments, mis en ligne en septembre 2005. - <https://www.infociments.fr/ciments/caracteristiques-et-emplois-des-ciments>
- IEA – International Energy Agency, 2022. *Cement*. IEA, Paris, mis en ligne en 2022. - <https://www.iea.org/reports/cement>
- InfoCiments,, 2018. «Le béton, un matériau recyclable... et recyclé», InfoCiments, mis en ligne en avril 2018. - <https://www.infociments.fr/favoriser-leconomie-circulaire/le-beton-un-materiau-recyclable-et-recycle>
- InfoCiments, 2021. «InfoCiments 2021 : l'essentiel», InfoCiments, mise en ligne non datée - <https://www.infociments.fr/chiffres-cles>
- InfoCiments, 2019. *Bétons biosourcés : composants, formulations et usages*, InfoCiments, mis en ligne en juillet 2019. - <https://www.infociments.fr/betons/betons-biosources-composants-formulations-et-usages>
- Karasu A., 2018. «Émissions de CO₂ : L'industrie cimentière mobilisée pour une diminution de 80 % d'ici 2050», Techniques de l'Ingénieur, mis en ligne le 4 décembre 2018. - <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/emission-de-co2-lindustrie-cimentiere-mobilisee-pour-une-diminution-de-80-dici-2050-61299/>



PLÂTRE ET TERRE CUITE



En résumé – Les terres cuites et plâtres sont des matériaux de construction produits à partir de ressources majoritairement locales et que l'on trouve en abondance sur le territoire. 95% de ces matériaux sont issus des gisements nationaux. Ces matériaux sont produits en circuit court avec peu de transports du site de production vers le chantier. Les gisements naturels sont toutefois sensibles et la filière souhaite opter pour une gestion raisonnée de ces derniers. La recherche d'alternatives est un enjeu qui touche de près le secteur de la construction/rénovation de bâtiments. Les filières terres cuites et plâtres se sont organisées pour accroître le recyclage de leurs produits. En parallèle, des voies de substituabilité aux terres cuites ont été amorcées (recherche de nouveaux lieux d'atterrissements argileux et accompagnement de la filière des terres crues).

Définition et caractéristiques



Les terres cuites et plâtres sont des matériaux issus de l'extraction de roches.

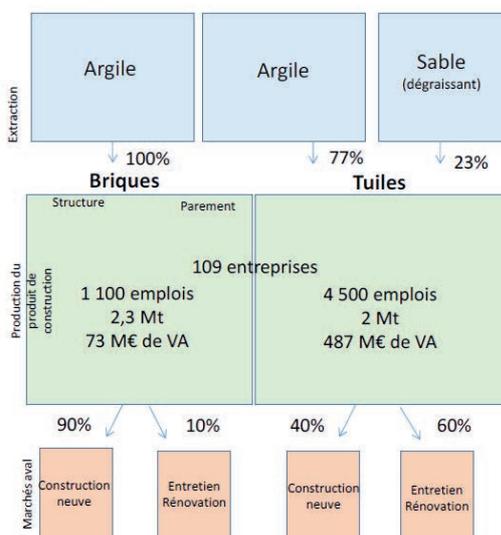
Les terres cuites sont fabriquées à partir d'argiles résultant de la décomposition de roches anciennes riches en feldspath, un minéral abondant dans la croûte terrestre. Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable que l'on nomme aussi « terre glaise ». Les argiles ont la propriété naturelle d'absorber et de restituer l'humidité. Chaque type d'argile présente des propriétés propres nécessitant d'opérer des ajouts suivant les cas de figures (mélanges d'argiles, ajout de sable, de quartz, de chamotte, etc.). Une fois transformées, les terres cuites offrent de multiples capacités : résistance mécanique, isolation thermique et sonore, étanchéité, résistance au feu et longévité. Enfin, les terres cuites ne développent pas de moisissures et ne portent pas atteinte à la qualité de l'air intérieur.

Le plâtre peut, quant à lui, être à la fois un liant (cimenterie) et un matériau de construction (voir ci-après). Ce matériau est obtenu à partir du gypse, une roche sédimentaire formée en couches épaisses, issue de l'évaporation de la mer. L'extraction du gypse est destinée à 80% à l'industrie du plâtre. Ce matériau est un excellent régulateur hygrométrique qui permet également de limiter la propagation du feu.

Procédés de fabrication et principaux usages



Les terres cuites et le plâtre sont principalement utilisés dans les activités de construction de second œuvre et parfois de gros œuvre.



Les terres cuites

Les trois principaux usages des terres cuites sont les tuiles, les briques de structures et les briques de parement. Mais ce matériau peut également servir à la fabrication de carrelages et d'enduits. La production de tuiles dessert à 60% le marché de l'entretien-rénovation et à 40% celui de la construction neuve. Les briques fournissent, quant à elles, 90% du marché de la construction neuve et 10% de la rénovation. En raison de ses performances thermiques, la brique est aujourd'hui utilisée pour la construction d'un logement neuf sur trois. Ses parts de marché ont ainsi été multipliées par quatre en 10 ans. De leur côté, les tuiles en terre cuites recouvrent deux toits sur trois en maisons individuelles neuves.

Source : DGE, 2016

→ Procédé de transformation de l'argile vers les briques et tuiles

Éléments de définition

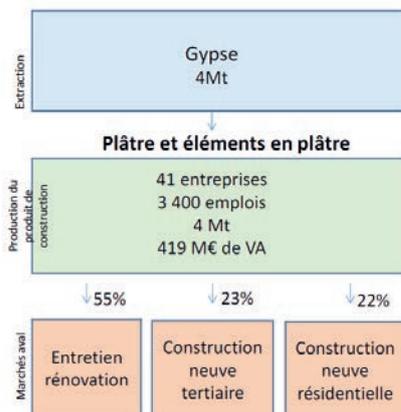


© Simulaterre

Tuiles (plates, canal ou à emboîtement)	Elles servent à réaliser des toitures et bardages.
Briques de structure : de perforation horizontale ou verticale	Il s'agit de briques de mur ou de cloisons.
Briques de parement : de petite taille, pleine ou partiellement perforée	Elles sont utilisées en doublage extérieur ou intérieur pour apporter une finition esthétique.

L'argile est extraite dans des carrières puis déposée dans des trémies. Elle est ensuite broyée et malaxée pour la rendre homogène et lui conférer sa plasticité. La préparation est alors dosée et mélangée à divers ingrédients comme le sable, la sciure de bois ou des résidus de l'industrie papetière. La pâte obtenue est stockée dans des « caves à terre », en milieu humide. Ce mélange argileux est ensuite façonné par extrusion et découpé puis séché avant d'être cuit entre 900°C et 1200°C. Cette étape représente 96% de la consommation énergétique du circuit de fabrication et est peu polluante. Le combustible le plus utilisé est le gaz naturel.

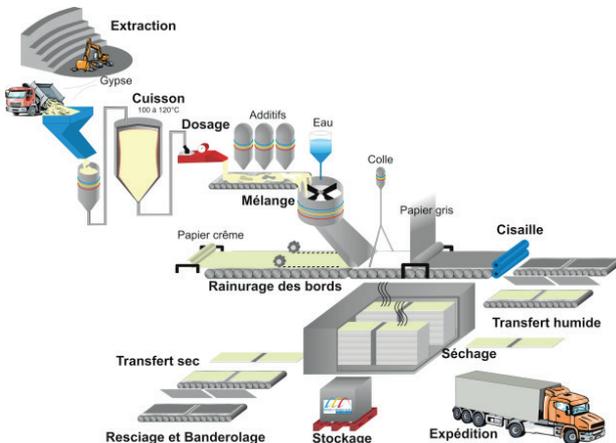
→ Le plâtre



Source : DGE, 2016

La transformation du gypse permet de produire une poudre de plâtre servant à fabriquer des carreaux et plaques ainsi que des enduits, du staff (plâtre armé de fibre végétale, de fibres de verre ou autres) et du stuc (marbre artificiel composé de plâtre, gélatine et colorants). De nos jours, l'utilisation de carreaux de plâtre décroît alors que les plaques se sont fortement développées, jusqu'à représenter 85% de la production. Cette dernière est toutefois orientée à la baisse depuis 2008. Les plaques sont propices à de nombreux usages : cloisons, plafonds, isolations, etc. Le marché du plâtre s'adresse à 55% à l'entretien-rénovation, à 23% à la construction neuve tertiaire et à 22% à la construction neuve résidentielle.

→ Procédé de transformation du gypse vers le plâtre



Source : DGE, 2016

L'extraction du gypse dépend de la structure du gisement (nombre de couches de gypse et profondeur d'enfouissement). Lorsque la première couche n'est pas trop profonde, une exploitation à ciel ouvert permet de limiter les pertes de matière. Dans ce cas, les couches de terre en surface sont décapées et le gypse est extrait à l'aide d'explosifs ou de machines. Dans le second cas, des galeries sont creusées à l'aide d'explosifs. La transformation se fait ensuite soit en usine (carreaux et plaques), soit directement sur le chantier (enduits, staff et stuc). Dans les deux cas, le gypse est d'abord transformé en poudre par broyage et cuisson à 150°C. Pour les plaques, cette poudre est ensuite mélangée à de l'eau et d'autres éléments

puis injectée entre deux feuilles de carton. Les enduits sont fabriqués en mélangeant cette poudre à de l'eau et d'autres matériaux (chaux, poudre de marbre, fibres, etc.)

Remarques : Les plâtres peuvent également être synthétiques. Ils sont alors issus du lavage des fumées acides des centrales thermiques par la chaux ou de l'attaque sulfurique des phosphates.



Tendances, disponibilité et dépendances

Les terres cuites

Le volume total de production s'élève en 2021 à 4,3 millions de tonnes, un volume qui n'avait plus été atteint depuis 2013. À titre indicatif, 1 tonne de produits en terres cuites nécessite d'extraire 1,2 tonne d'argile. Afin de sécuriser leurs productions, la plupart des industriels du secteur sont devenus propriétaires de leurs propres carrières.

TOTAL DES PRODUCTIONS (en Kilotonnes)

Année	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Tuiles (avec accessoires)	2 109	2 091	2 093	2 152	2 012	2 330
Briques de structure	1 649	1 816	1 872	1 782	1 634	1 828
Briques apparentes	124	122	128	126	106	105
Autres produits	57	43	44	33	39	42
TOTAL	3 939	4 072	4 137	4 093	3 791	4 305

Source : Fédération française Tuiles & Briques, 2021

Détenant 15% de la production européenne, la France est le deuxième producteur de terres cuites en Europe, derrière l'Allemagne.

Ce matériau est fragile et son transport est coûteux. De plus, en raison de différences de normes et des spécificités régionales, les échanges commerciaux sont peu répandus et s'effectuent majoritairement avec les pays transfrontaliers. Ces échanges permettent tout de même au pays d'exporter 8% de sa production, ce qui représente 73 millions d'euros. Ses principaux clients sont la Belgique et le Royaume-Uni. Plus précisément, la France est le leader des exportations mondiales de tuiles. Les importations françaises de briques, tuiles et produits de construction en terre cuite s'élèvent, quant à elles, à 52 millions d'euros. Elles proviennent à 85% de trois pays : la Belgique, l'Espagne et l'Allemagne. À ce jour, 95% des produits en terre cuite sont issus des gisements nationaux. Selon l'enquête réalisée par la DGE (2016), en 2013, l'Insee recensait 203 sites industriels sur le territoire national. Ces matériaux voyagent peu et les sites de production sont localisés à proximité des gisements. Toutefois, sa matière première, l'argile, est considérée comme une ressource non-renouvelable car elle est prélevée dans des formations géologiques fossiles. En 2015, une thèse (Haurine, 2015) a mis en évidence le potentiel de renouvellement de la ressource par utilisation des sédiments de dragage⁴. En effet, chaque année, près de 20 millions de m³ sont déposés sur les rives des fleuves et des rivières, dans les barrages et estuaires et l'industrie des terres cuites en consomme moins de 3,5 millions de m³/an. Les travaux réalisés par Haurine ont permis de définir qu'en partie des sédiments de dragage (environ 5 m³) seraient potentiellement utilisables dans la fabrication de produits en terre cuite. Porté par le Grand Port Maritime du Havre, le projet Sedibric pose les jalons de l'utilisation de ces argiles comme alternative viable aux exploitations de carrières. Achievé en juillet 2021, le projet se poursuit désormais via l'élaboration d'une cartographie des lieux d'atterrissement argileux, caractéristiques, volumes et potentiels d'exploitation par les industriels à proximité des sites concernés.

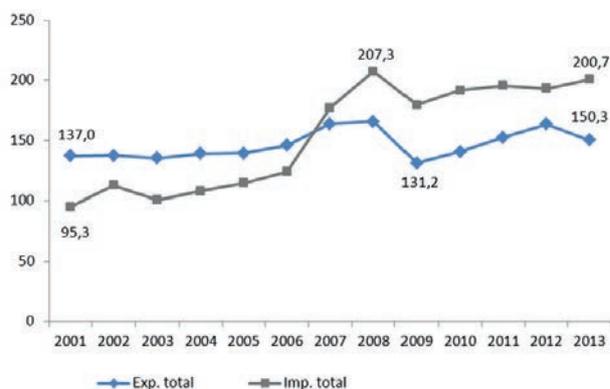
4. Extraction de matériaux situés sur le fond d'un plan d'eau.

Le plâtre

80% de la matière extraite est destinée à l'industrie du plâtre et 15% à la cimenterie. Le reste trouve des débouchés vers les engrais, le verre et la chimie. La France est l'un des premiers pays européens de fabrication de produits en plâtre. Les gisements de gypse naturel sont abondants, majoritairement présents en Île-de-France et leur volume est estimé à 350 millions de tonnes. Ils permettent chaque année d'extraire 4,5 millions de tonnes de gypse. Par conséquent, 95% du plâtre consommé en France est issu d'une production nationale.

Le Syndicat National des Industries du Plâtre (SNIP) recommande une gestion raisonnée de ces bassins et souligne l'importance de recourir à une matière première dite secondaire en tirant parti du recyclage des matériaux. C'est pourquoi, l'organisme s'est doté en 2008 d'une charte de gestion des déchets de plâtre propres (ni souillés, ni contaminés).

Comme mentionné précédemment, la majorité de cette production est imputée à la fabrication de plaques de plâtre, soit une production annuelle de 280 millions de m² de plaques (représentant 4,5 m² par habitant). En comparaison, l'Europe produit 1,6 milliard de m² de plaques par an.



©Douanes (RDC Environnement, Crédoc, BRGM, 2016) - Montant des échanges de la France dans le secteur de la fabrication de plâtre, chaux et éléments en plâtre dans la construction, en millions d'euros.

Les échanges commerciaux avec la France concernent principalement les pays frontaliers (Belgique, Espagne, Allemagne et Italie). En effet, le plâtre est un produit difficilement transportable. Les flux de marchandises sont donc relativement limités au profit d'implantations d'entreprises à proximité des carrières d'extraction étrangères. Ainsi, en 2013, le taux d'exportation de produits en plâtre s'élève à 9% et représente, en volume, 150 millions d'euros. Ces produits sont principalement destinés aux pays du Nord de l'Europe et, pour les plaques de plâtre, à la Belgique, aux Pays-Bas ou encore, au Royaume-Uni.

Les importations de plâtre tendent, quant à elles, à croître pour atteindre 200 millions d'euros (en volume) en 2013.

Les fabricants de plâtre alimentent un marché fortement exportateur. En 2013, ces entreprises ont réalisé 133 millions d'euros à l'export pour un solde positif de 55 millions d'euros. À l'inverse, les éléments en plâtre génèrent, de leur côté, de plus faibles échanges, soit 17,5 millions d'euros en 2013 pour un solde négatif de 105 millions d'euros.



Circularité

Les terres cuites

Les terres cuites répondent à de nombreux critères de circularité dans la construction. En effet, la présence des sites de production à proximité des chantiers est déjà un atout pour limiter les impacts des transports. Les déchets de la production des briques et tuiles sont pour leur part réduits en chamotte et couramment employés pour fabriquer de nouvelles briques et tuiles. Et lorsque ces produits arrivent en fin de vie, ils peuvent être presque entièrement revalorisés. En effet, les terres cuites représentent 8% des déchets liés à la démolition des bâtiments, soit 4 millions de tonnes de produits en terre cuite qui, chaque année, peuvent être revalorisés. 55% de ces déchets servent à combler et stabiliser des routes ou des terrains de tennis et 39% sont recyclés ou réemployés pour la restauration de monuments ou d'édifices patrimoniaux. Ces déchets peuvent également servir de substrats ou de compost pour la culture de plantes, la stabilisation des sols et l'aération des racines dans le but de favoriser la croissance des arbres. Mais outre la démolition des bâtiments, la longévité de ce matériau rend également possible une reconversion des sites (par exemple, pour transformer un site industriel en logements).

Les plâtres

Le plâtre est un matériau 100 % recyclable pouvant être réintroduit dans la fabrication de nouvelles plaques. Afin d'assurer une gestion raisonnable des gisements naturels, une charte de gestion des déchets du plâtre, qui représente 600 000 tonnes par an, a été signée en 2008 par les Industries du plâtre. Cette charte concerne la gestion des déchets purement composés de plâtre, c'est-à-dire issus de la découpe de plaques neuves sur les chantiers de construction ou de bâtiments existants rénovés, démolis ou déconstruits. Dans ce second cas de figure, une partie des déchets ne peut entrer dans la boucle de recyclage du fait, par exemple, de la présence de corps étrangers (bois, plastiques) ou encore, de déchets dangereux. Depuis sa signature, la filière a considérablement amélioré ses capacités de recyclage, passant de 10 000 tonnes de plâtre recyclé en 2008 à 107 000 tonnes en 2019. Mais seuls 35 % à 40 % des produits en plâtre font l'objet d'une revalorisation alors que la loi sur la transition énergétique du 17 août 2015 prévoyait à horizon 2020 un recyclage de 70 % du gisement. Des progrès, notamment en termes de sensibilisation sur les chantiers et auprès du maître d'ouvrage, ont été réalisés. Lancée fin 2014, à l'initiative de l'Ademe et d'Ecosystem, la plateforme collaborative Démoclès est devenue le centre d'impulsion de nouvelles pratiques.



Décarbonation

La terre cuite

L'industrie française de la terre cuite s'inscrit dans la Stratégie nationale Bas-Carbone en améliorant continuellement ses procédés. En 2019, cette industrie représentait moins de 0,2 % des émissions de gaz à effet de serre en France. Ses efforts lui ont permis de réduire de 34 % ses émissions de CO₂ et de 17 % sa consommation d'énergie sur la période 2000-2021. Les principaux leviers de réduction du bilan carbone sont la cuisson et le séchage des produits (qui représentent 80 % des émissions) mais aussi les matières premières elles-mêmes (décarbonation lors de la cuisson et utilisation de filtres à gravier calcaire pour l'épuration des fumées). Pour répondre aux ambitions de décarbonation de l'industrie, la Fédération Française Tuiles & Briques (FFTB) et le Conseil national de l'industrie ont donc réalisé une feuille de route de la décarbonation de l'industrie des tuiles et briques (2022). La filière s'est ainsi engagée à réduire de 27 % ses émissions de CO₂ à horizon 2030 et de 80 % à horizon 2050 par rapport aux émissions constatées en 2015. Trois leviers sont retenus dans ce but :

- l'optimisation continue du process et l'éco-conception : parmi les outils évoqués, les acteurs ciblent l'incorporation de biocombustibles ou de boues papetières à l'argile pour réduire la consommation énergétique lors de la cuisson ;
- la substitution du gaz naturel par des énergies décarbonées ou renouvelables : l'utilisation d'hydrogène ou d'électricité décarbonés sont décrites comme des technologies de rupture. En 2021, le Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC) s'est adressé à l'Ademe pour mener des essais préliminaires d'une durée 2 ans sur l'utilisation d'hydrogène décarboné (projet HyDÉTop) ;
- la captation du CO₂ dans les fumées de four, méthanisation, stockage, réutilisation : jamais utilisées dans ce secteur, ces technologies font l'objet d'un démonstrateur (RecyCarb, en phase d'étude technico économique en 2021).

Le plâtre

Favorisé par les temps et températures de cuisson faible lors de sa fabrication, le plâtre a une empreinte carbone très faible. De manière générale, dans l'industrie lourde, le projet de décarbonation est soutenu dans le cadre du plan France Relance « Décarbonation de l'industrie ». Les subventions se mettent au service de trois leviers : l'efficacité énergétique, la décarbonation des procédés et la chaleur décarbonée. Il s'applique au secteur du plâtre au travers d'initiatives concrètes :

- **Placo Saint-Gobain** a par exemple dévoilé une feuille de route pour laquelle la marque prévoit un investissement de 25 millions d'euros visant à réduire ses émissions de CO₂ en impliquant ses quatre sites industriels français et sept carrières de gypse. Ces deux postes d'actions principaux seront de limiter les extractions de matière première en allégeant les plaques ainsi que de limiter l'utilisation d'eau pour réduire l'énergie nécessaire au séchage du plâtre.

- Le fabricant de plaques Etex s'est également engagé dans un plan de décarbonation dont l'objectif est une réduction de 30 % des émissions d'ici 2025. Plusieurs sites sont impactés, notamment :
 - **Carpentras** (84) : L'ambition est de faire de ce site historique une usine modèle parmi les plus performantes et les plus compétitives d'Europe. Trois axes ressortent : 1) réduire de 20 à 30 % l'énergie nécessaire à la fabrication d'une plaque de plâtre grâce à l'utilisation d'équipements moins énergivores favorisant la récupération d'énergie (projets de cogénération, acquisition de séchoirs modernes...) ; 2) augmenter la collecte des déchets de chantiers via son programme Eco Plâtre et intégrer toujours plus de plâtre recyclé dans sa production ; 3) diminuer l'empreinte carbone en limitant drastiquement les transferts de produits d'un site à l'autre.
 - **Auneuil** (60) : investissement de 18 millions d'euros, financé à hauteur de 4,6 millions d'euros par l'État par le biais du plan France Relance. L'entreprise va se doter d'un nouveau four moins énergivore.
 - **Ottmarsheim** (68) : Ce projet d'installation d'un système de récupération et réutilisation d'énergie ainsi que d'un apport d'énergie plus performant sur le sécheur permettra la réduction de 18 722 MWh d'énergie primaire par an et 3 500 tonnes de CO₂ équivalent par an.

Les industriels du plâtre s'engagent donc aussi pour accompagner la décarbonation du secteur de la construction.



Autres impacts environnementaux et sociétaux

Les carrières sont des sites strictement réglementés. La gestion des argilières et plâtrières répond, comme tout site extractif, à des impératifs de gestion raisonnée et respectueuse de l'environnement et de remise en état de sites (comblement des cavités générées par l'exploitation, gestion des risques de contamination des eaux souterraines). La dissolution du gypse peut, en effet, enrichir localement les sols en sulfate et contaminer les eaux.

La protection des espèces pendant la phase d'extraction et la réhabilitation des sites en fin de vie sont donc des enjeux cruciaux d'une bonne gestion de ces sites. À ce titre, Eurogypsum, fédération européenne représentative de l'industrie de fabrication des produits à base de plâtre, est signataire, aux côtés d'autres fédérations d'exploitants de carrières (l'association européenne du ciment -CEMBUREAU- et l'Union Européenne des Producteurs de Granulat -UEPG-) d'un code de conduite pour la protection des espèces du secteur extractif (2021).



Substituabilité et alternatives

Encouragée par la réglementation environnementale RE2020, la montée en puissance des matériaux biosourcés et géosourcés dans le secteur de la construction impulse le déploiement de plusieurs alternatives aux matériaux plâtres et terres cuites. Le bois peut, en conséquence, être considéré comme une alternative à certains matériaux minéraux comme les briques de structure ou de parement et les cloisons en plâtre.

La filière terre crue est aussi de plus en plus valorisée comme substitut à certains matériaux énergivores tels que le béton ou la terre cuite. Plusieurs techniques de construction utilisant la terre crue existent : le pisé, l'adobe, la bauge, la brique de terre compressée, le torchis, etc. Le pisé de terre (mélange de terres argileuses, sable et gravier) est, d'ailleurs, une technique de construction répandue dans le patrimoine architectural de la région Auvergne-Rhône-Alpes et du territoire lyonnais. L'Orangerie réalisé par Nicolas Meunier à Lyon-Confluence en 2019 en est l'une des représentations les plus contemporaines, mais des immeubles du XIX^e siècle dans le quartier de la Croix-Rousse attestent d'une utilisation plus lointaine de ce matériau. Les terres crues, en effet, disposent de nombreuses qualités (recyclabilité, valorisation des déblais de chantier en terre, disponibilité locale et sans grande transformation, faible bilan énergétique, isolation acoustique et régulation hygrothermique, etc.). Cependant, cette filière rencontre encore de nombreux obstacles au niveau, notamment, de la réglementation et de l'assurance. Le projet national terre crue lancé en septembre 2021 vise à accompagner l'intégration des terres crues comme

matériaux de construction courants. Gwenaëlle Hello, sous-directrice de la recherche au sein du ministère de la Transition Écologique (Nicolas, 2021), résume ainsi l'enjeu de son déploiement : « notre accompagnement résulte d'une conviction : celle que la terre crue sera demain un matériau comme les autres, qui présente le double avantage de répondre aux exigences de neutralité en CO₂ et de préservation de la biosphère. Il conviendra de savoir bâtir local et avec des ressources respectueuses du vivant, ce que permet déjà la terre crue ».



Innovations

Les principales mutations des industries du plâtre et des terres cuites répondent aux impératifs de transition écologique. L'allègement est donc central dans les différentes stratégies adoptées par les acteurs de la filière. En phase avec sa feuille de route 2030 et pour prélever moins de matière première, la marque Placo Saint-Gobain annonce, par exemple, vouloir réduire le poids de ses plaques de plâtre. Le leader mondial de la terre cuite, Wienerberger, anticipe également cette tendance en commercialisant une brique plus légère (NATURbric®), qu'il produit exclusivement sur son site de Durtal (49).

Enjeu territorial / Grand Lyon et AURA

L'étude des gisements d'intérêt régional et national menée par le BRGM (2020) recense les principaux gisements dans la région Auvergne-Rhône-Alpes. Les gisements d'argiles communes⁵ identifiés sur ce territoire se situent à Sainte-Foy-l'Argentière (Rhône), dans les bassins d'Aumance (Allier), de Brioude (Haute-Loire), de Roanne (Loire), de la plaine du Forez (aussi appelé bassin de Montbrison, Loire), des Monts du Lyonnais et du Pilat (Rhône), et enfin du sud de la Bresse et des Dombes (Ain)⁶. Ces gisements offrent un potentiel d'approvisionnement des filières briques et tuiles de proximité. Certaines carrières ont un intérêt patrimonial du fait de la production de tuiles vernissées qui en découle et s'exportent à l'international, à l'instar de la tuilerie Blache (Loire-sur-Rhône, 69).

Remarque : La carrière de Sainte-Foy-l'Argentière est exploitée par la société Edilians, leader de la production de tuiles en terre cuite qui produit chaque année près de 75 millions de tuiles.

Les gisements de gypse situés en Auvergne-Rhône-Alpes et dans la région PACA concentrent, quant à eux, 18% des ressources nationales (le gisement principal étant situé en Île-de-France). Le BRGM estime qu'au rythme de consommation actuel, ces sites disposent de 200 ans de réserves, mais leur accès reste limité par la « prise en compte de nombreux enjeux, notamment environnementaux ». Les gisements de gypse sont donc classés d'intérêt national. La Savoie est le département le plus riche en gisement de gypse. Il fournit 5% des besoins nationaux.

4. Le rapport final du BRGM précise que ce recensement se concentre sur les gisements d'argiles illitiques, « plus faciles à façonner et à sécher que des kaolinites et smectites dans le cas de la fabrication des briques et céramiques ».

5. L'identification de ces gisements est le fruit d'une étude bibliographique menée par le BRGM et pouvant faire l'objet de légères incohérences liées à des imprécisions de localisation de carrières ou à des tracés géologiques obsolètes. La liste ne s'avère pas exhaustive.

Principales sources utilisées :

- Architecture. (2022, 11 février). Innovations et systèmes constructifs tournés vers l'avenir : 'future proof' avec les matériaux de terre cuite. <https://www.architectura.be/fr/actualite/innovations-et-systemes-constructifs-tournes-vers-l-avenir-future-proof-avec-les-materiaux-de-terre-cuite/>
- Birdlife Europe, Cembureau, Eurogypsum, UEPG. (2021, octobre). Industrie extractive, protection des espèces, code de conduite : une approche simple des procédures de planification et d'autorisation, dans le respect de la législation européenne et favorisant la biodiversité. https://www.lesindustriesduplatre.org/wp-content/uploads/2022/11/French_Code-of-conduct_Digital-VF.pdf
- CARTANNAZ C. (2020, mai). Schéma régional des carrières d'Auvergne-Rhône-Alpes : évaluation des gisements d'intérêt régional et national. Rapport final. BRGM. https://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rp-68275-fr_src_gisements.pdf
- Communiqué de presse. (2021, 29 septembre). Durtal : Wienerberger innove avec une brique plus légère et plus écologique. L'Usine Nouvelle. <https://www.usinenouvelle.com/article/communiquedurtal-wienerberger-innove-avec-une-brique-plus-legere-et-plus-ecologique.N1145097>
- DGE (2016). Prospective – Marché actuel et offre de la filière minérale de construction et évaluation à échéance de 2030. https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/prospective/Industrie/2016-11-filiere-minerale-construction-synthese-pipame.pdf
- Direction de l'eau et de la biodiversité. (2022, 14 janvier) Examen au « cas par cas » sur la nécessité de soumission à évaluation environnementale de l'instauration d'une zone spéciale de carrières de gypse et d'anhydrite dans le département de la Savoie (73). https://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/formulaire_instauration_zone_speciale_de_carrieres_de_gypse_en_savoie_cle0cf375.pdf
- Engagement pour la croissance verte relatif au recyclage des déchets de plâtre signé le 27 avril 2016. BO MEEM – MLHD n° 2016/18, 10 octobre. https://www.lesindustriesduplatre.org/wp-content/uploads/2020/08/engagement_recyclage_platre.pdf
- Fédération française Tuiles & Briques. (2022). Feuille de route de décarbonation de l'industrie des Tuiles et Briques. https://www.fft.org/wp-content/uploads/2022/12/FFTB_Dossierdepresse_Decarbonation.pdf
- Fédération française Tuiles & Briques. (2022). L'industrie de la terre cuite en chiffres – Statistiques 2021. https://www.fft.org/wp-content/uploads/2022/07/FFTB_STATISTIQUES-TUILES-ET-BRIQUES_2021.pdf
- Fédération française Tuiles & Briques. (2022). Rapport Développement Durable 2021. - https://www.fft.org/wp-content/uploads/2022/10/FFTB_Developpement-durable-2021_0310.pdf
- Fossey C., Massieu A. (2020, 16 janvier). La France, deuxième producteur européen de briques et tuiles. n°178. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4277931>
- Haurine F. (2015). Caractérisation d'atterrissement d'argiles récents sur le territoire français, en vue de leur valorisation dans l'industrie des matériaux de construction en terre cuite [thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris]. HAL. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01423865/document>
- Julien, F. (2022, 9 novembre). Pacte de décarbonation : la ministre Olivia Grégoire essuie les plâtres dans l'Oise. Courrier Picard. <https://www.courrier-picard.fr/id359080/article/2022-11-09/pacte-de-decarbonation-la-ministre-essuie-les-platres-dans-loise>
- ICharry, E., Palierse, C. (2022, 29 décembre). Promoteurs et constructeurs craignent un manque de matériaux verts. Les Échos. <https://www.lesechos.fr/industrie-services/immobilier-btp/promoteurs-et-constructeurs-craignent-un-manque-de-materiaux-verts-1892519>
- Leroy, F. (2021, 1^{er} octobre). La plaque de plâtre à horizon 2030 : légère, recyclée, démontable et décarbonnée. Batirama. - <https://www.batirama.com/article/43747-la-plaque-de-platre-a-horizon-2030-legere-recyclee-demontable-et-decarbonnee.html>
- Leroy, F. (2021, 3 juin). Terre cuite et RE 2020 : au rendez-vous des exigences bas carbone. Batirama. - <https://www.batirama.com/article/41161-terre-cuite-et-re-2020-au-rendez-vous-des-exigences-bas-carbone.html>
- Leroy, F. (2021, 10 octobre). La plaque de plâtre à horizon 2030 : légère, recyclée, démontable et décarbonnée. Batirama. <https://www.batirama.com/article/43747-la-plaque-de-platre-a-horizon-2030-legere-recyclee-demontable-et-decarbonnee.html>
- Le bilan de la mise en œuvre relatif au recyclage des déchets de plâtre. (2020). - <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ECV%20relatif%20au%20recyclage%20des%20d%C3%A9chets%20de%20pl%C3%A2tre%20-%20Bilan%20avril%202020.pdf>
- L.P., (2017, 2 novembre). La terre crue : un matériau performant et écologique à ne pas oublier ! Florès. <https://flores-amo.fr/terre-crue-materiau-ecologie/>
- Luquain, A. (2020, 10 janvier). Crue, la terre promise à un bel avenir. Le Moniteur. - <https://www.lemoniteur.fr/article/crue-la-terre-promise-a-un-bel-avenir.2069944>
- Maachi, A., Sonnier, R. (2020, 26 mars). Le plus vieux matériau de construction au monde est aussi le plus écoresponsable. The Conversation. - <https://theconversation.com/le-plus-vieux-materiau-de-construction-au-monde-est-aussi-le-plus-ecoresponsable-133587>

- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2021, 12 avril). Matériaux de construction biosourcés et géosourcés. <https://www.ecologie.gouv.fr/materiaux-construction-biosources-et-geosources#:~:text=Les%20mat%C3%A9riaux%20biosour%C3%A9s%20sont%20issus,construction%20dans%20un%20b%C3%A2timent%20>
- Nicolas, J. (2021, 13 septembre). La terre crue a enfin son « projet national ». Le Moniteur. <https://www.lemoniteur.fr/article/la-terre-crue-a-enfin-son-projet-national.2162027>



VERRE



En résumé – Le verre est un matériau dur, cassant et transparent, obtenu par fusion de matières minérales comme la silice et les carbonates de calcium. Les verres sont principalement utilisés comme emballages (verres creux) et vitrages (verres plats). La consommation de verre est en croissance au niveau mondial. L'Europe dispose de bonnes capacités de production de verre, mais dépend de matières premières et surtout d'énergie fossile qui sont largement importées. L'impact environnemental du verre est très dépendant des sources d'énergie utilisées, mais aussi du niveau de recyclage et de réutilisation du verre. Or celui-ci est bon pour le verre creux, mais médiocre pour le verre plat, faute de filière suffisamment organisée.



Définition et caractéristiques

S'il existe dans la croûte terrestre des verres naturels, comme les quartz, la très grande majorité des verres utilisés aujourd'hui sont des matériaux artificiels obtenus, pour les verres courants, par fusion à haute température de matériaux d'origine minérale, en particulier la silice associée à des carbonates de calcium et de sodium. Ces verres minéraux ont pour caractéristiques communes d'être des matériaux durs, cassants et le plus souvent transparents ou translucides.

On notera qu'il existe également des verres organiques (obtenus à partir de résines, le plus souvent des polymères), ou encore des verres métalliques (obtenus à partir de métal fondu), mais l'écrasante majorité des verres utilisés dans le monde sont des verres minéraux (ou verres courants) correspondants à la définition donnée ci-dessus.



Procédés de fabrication et principaux usages

De manière générale, les verres sont produits à partir de silice issue du sable (pour 50 à 80 %) à laquelle est ajoutée du carbonate de sodium ainsi que d'autres éléments minéraux comme le calcaire ou la dolomie. Cette composition est chauffée à très haute température (environ 1300 à 1600°C) pour obtenir un verre liquide qui pourra ensuite être mis en forme avant refroidissement et durcissement de la matière.

En 2022, la production mondiale de verre était d'environ 160 millions de tonnes, soit environ 20 kg par habitant et par an. En Europe, la production et la consommation sont de l'ordre de 35 millions de tonnes par an (chiffres 2016), soit environ 80 kg par habitant et par an.

On peut distinguer plusieurs grandes familles de verres courants, qui se différencient par leurs composants, leurs procédés de fabrication et leur destination :

Le verre creux sert essentiellement à la fabrication de flacons, bouteilles, bocaux et autres emballages en verre. Les verres creux représentent environ deux tiers (66 %) des tonnages de verre produits en Europe. Ils ont pour particularité de contenir une part importante de calcin, lui-même issu du recyclage du verre, le plus souvent additionné de matières premières vierges. Une fois portée à température de fusion, la composition est soufflée ou pressée dans des moules pour lui donner sa forme définitive.

Note : on distingue parfois dans cette famille le verre de table, destiné à la production de vaisselle, incluant différentes formes comme le cristal ou le Pyrex, dont les compositions et les modes de production sont un peu différents des emballages en verre précités. Le verre de table représente moins de 4 % de la production européenne de verre.

Le verre plat correspond en grande partie à ce qu'on appelle couramment le vitrage, et qui est notamment destiné aux secteurs du bâtiment ou de la construction de véhicules. Le verre plat représente environ 30 % de la production européenne. Il est majoritairement produit par flottage : la composition est chauffée jusqu'à fusion, puis le verre

liquide est versé sur un bain d'étain en fusion dont la surface est parfaitement lisse, avant d'être recuit et refroidit, formant alors des plaques de verre très homogènes. Ces plaques pourront ensuite être éventuellement transformées pour obtenir différentes caractéristiques recherchées : résistance, traitement anti-reflets, couleur, etc.

La fibre de verre est utilisée pour l'isolation ou comme élément de renforcement de matériaux composites (associée à des résine, cf. chapitre matériaux composites). La composition est chauffée à des températures proches de 1500°C, puis étirée à très grande vitesse afin d'obtenir des filaments d'un diamètre parfois inférieur à 10 mm (micromètres). La fibre obtenue peut ensuite être tissée ou agglomérée, selon les usages visés.

La fibre optique est utilisée pour l'éclairage ou la transmission de données numériques. Sa production est complexe et nécessite de fabriquer une préforme en silice très pure, qui est ensuite étirée à très haute température avant d'être gainée d'une couche de résine protectrice.

D'autres **verres techniques**, ou spéciaux, sont également produits pour répondre à des usages très spécifiques, comme la fabrication d'écrans, de lunettes ou encore d'ampoules.



Tendances, disponibilité et dépendances

La consommation mondiale de verre est estimée en 2022 à 166 millions de tonnes, pour un chiffre d'affaires dépassant les 110 milliards US\$. La demande de verre est en croissance assez forte au niveau mondial, et la production est passée de 140 à 160 millions de tonnes entre 2016 et 2022. La production attendue en 2030 est de 230 millions de tonnes, soit une croissance annuelle en volume de 3,9% par an – et une croissance du chiffre d'affaires attendu légèrement supérieure, dépassant les 5% par an. La demande de verre plat est tirée par le secteur du bâtiment, qui utilise des quantités grandissantes de verre aussi bien en façade qu'à l'intérieur des logements (décoration, cloisons, etc.), avec un marché particulièrement porteur en Asie. La demande de verre creux augmente également, tirée par le marché de l'agroalimentaire et une tendance actuelle visant à remplacer certains emballages plastiques.

Les matières premières ne semblent pas menacées d'épuisement à court terme, notamment pour l'industrie du verre creux qui consomme une part importante de verre recyclé. Parce qu'elle recycle moins, l'industrie du verre plat semble plus sensible à l'évolution à venir des ressources de sable, la matière première principale du verre, dont plusieurs rapports internationaux estiment qu'il pourrait venir à manquer dans le courant du siècle. L'industrie verrière reste toutefois une consommatrice très minoritaire du sable mondial, qui est avant tout le fait du secteur du BTP.

En revanche, les procédés de production du verre sont gros consommateurs d'énergie, ce qui les rend très sensibles au prix du pétrole et du gaz. La crise sanitaire du Covid-19 a ainsi généré en 2020 des difficultés d'approvisionnement et une augmentation des prix de certaines matières premières, en particulier pour la production de verre plat. La très forte augmentation des prix de l'énergie en 2021-22 a également mis la filière en grande difficulté et certains sites ont dû momentanément cesser leur production – incluant le cas emblématique de Duralux, qui a vu la part de l'énergie passer de 7 à 40% de ses coûts de production en 2022.

En France et en Europe, la dynamique est moins forte qu'à l'échelle mondiale : le marché du verre plat et de du verre creux sont relativement stables depuis maintenant plusieurs années, voire décennies. De son côté, la France importe davantage de verre creux qu'elle n'en exporte, essentiellement en provenance de pays voisins (Espagne Allemagne). Au contraire, elle exporte davantage de verre plat qu'elle n'en importe. Toutes filières confondues, la France compte 24 entreprises qui exploitent 42 usines et emploient 18 558 personnes.

Dans l'ensemble, l'Europe est donc relativement souveraine puisqu'elle dispose d'un outil de production lui permettant de couvrir approximativement ses besoins – soit environ 35 millions de tonnes de verre par an, dont 23 millions de tonnes de verre creux et 11 millions de tonnes de verre plat. La dépendance de l'Europe tient davantage à la production des matières premières et, plus encore, à la production des énergies fossiles dont elle est grosse consommatrice, et qui sont très largement importées.

À l'exception de Saint-Gobain (n°2 mondial) les principaux acteurs du secteur du verre industriel ne sont pas européens, même s'ils disposent le plus souvent de sites de production sur ce continent. Sur un plan plus stratégique, on notera que la France dispose de deux usines de production de fibre optique, un élément important du développement du secteur numérique.



Circularité

L'industrie du verre a depuis très longtemps intégré le recyclage dans ses pratiques.

C'est particulièrement vrai pour le verre creux, qui dispose en Europe d'une filière de collecte et de recyclage très organisée (il existe plus de 200 000 points de collecte en France). Le taux de recyclage des emballages en verre est aujourd'hui proche de 80 % en France. Le calcin, produit à partir de verre recyclé, peut représenter jusqu'à 90 % des matières utilisées dans la production de verre creux. Malgré un bilan environnemental plus intéressant encore, la réutilisation via les systèmes de consigne ou la vente en vrac est en revanche aujourd'hui encore assez marginale. Des filières de collecte et de distribution en magasin commencent à se mettre en place sur certains territoires – par exemple sous l'impulsion de Rebooteille en région lyonnaise. Mais c'est essentiellement chez les professionnels qu'elle est aujourd'hui structurée (cafés, hôtels et restaurants), où elle permet d'éviter chaque année la production de 500 000 tonnes de déchets.

Le verre plat est en revanche beaucoup moins recyclé que le verre creux. Cela s'explique à la fois par un mode de production différent, mais aussi et surtout par une filière de collecte et de transformation qui n'est pas suffisamment organisée. De ce fait, la majorité du verre plat issu des chantiers de démolition est mélangée aux autres déchets et n'est pas recyclé. L'engagement du gouvernement français est de réintroduire 40 à 50 % du verre plat collecté et trié au cours des prochaines années, contre 5 % aujourd'hui, grâce à la structuration des filières de collecte et de transformation.

Les fibres de verre, enfin, sont très difficiles à recycler, en particulier lorsqu'elles sont utilisées comme renfort de matériaux composites (cf. chapitre matériaux composites).



Décarbonation

À l'instar des matériaux composites, le verre occupe une position ambiguë en matière de transition énergétique et de décarbonation.

D'un côté, la production de verre est en effet énergivore et, de ce fait, carbonée – puisque la plupart des fours dans le monde sont alimentés en énergie fossile. Le procédé de production du verre émet également des gaz à effet de serre du fait de la décarbonation des matières premières au cours de la cuisson (environ 15 à 25 % du total des émissions). Si on en croit la base carbone de l'ADEME, la production de verre représente en France 3 % des émissions de l'industrie, et il faut compter en moyenne 1 kg de CO₂e par kg de verre produit à partir de matière brute (un peu plus pour le verre plat et un peu moins pour le creux). Ce bilan diminue de moitié environ pour le verre recyclé, et on estime qu'il est encore divisé de moitié (par rapport au recyclage) en cas de réutilisation – ce qui est notamment constaté dans la filière des cafés, hôtels et restaurant. Un autre levier de décarbonation envisagé est le changement de sources d'énergie (notamment le biogaz, l'hydrogène et l'électricité).

D'un autre côté, la filière du verre est un acteur de la transition énergétique. Parmi les marchés porteurs en fort développement, on trouve notamment celui de la production de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques, dont le verre est une composante majeure (l'entreprise Alliaverre a par exemple récemment annoncé la relocalisation d'une unité de production de verre en France à destination du secteur photovoltaïque). Les verres plats ont également beaucoup évolué afin d'accroître la performance énergétique des bâtiments (double ou triple vitrage, notamment) participant à améliorer le bilan énergétique du secteur. Enfin, les fibres de verre restent parmi les matériaux les plus utilisés dans le domaine de l'isolation des bâtiments.



Autres impacts environnementaux et sociétaux

Le sable est la matière première principale du verre. Même si la production de verre n'est pas la première consommatrice de sable, l'exploitation de cette matière première est aujourd'hui l'objet d'inquiétudes : épuisement de la ressource, menaces de pérennité de certains littoraux, érosion accélérée, commerce illégal, etc.



Substituabilité et alternatives

Le verre a des particularités qui le rendent difficilement remplaçable par d'autres matériaux. Historiquement, le verre creux utilisé majoritairement comme emballage (bouteilles, bocaux, etc.) a été fortement concurrencé par d'autres matériaux comme le plastique. Mais cela n'a pas empêché la production de verre creux d'augmenter, ces matériaux alternatifs venant s'ajouter plus que se substituer au verre, afin d'alimenter un secteur par ailleurs en très forte croissance. La défiance dont fait aujourd'hui l'objet le plastique amène certains industriels à envisager un retour au verre pour certains usages – c'est par exemple le cas emblématique de Coca-Cola dans certaines régions du monde.

Pour certains usages spécifiques, le verre plat peut également être concurrencé par d'autres matériaux, comme par exemple le plexiglas. Il reste en revanche incontournable dans la plupart des usages liés au bâtiment.

La fibre de verre isolante est concurrencée par d'autres matériaux (plastiques alvéolaires, matériaux biosourcés) mais reste encore très présente en France : les laines minérales représentaient ainsi la moitié des surfaces d'isolants utilisés en France en 2020.



Innovations

Si on en croit la presse spécialisée et les syndicats professionnels du secteur, l'industrie du verre continue à innover dans de nombreux domaines, notamment celui de la transition écologique et énergétique. Dans le secteur des verres plats, plusieurs travaux ont par exemple permis d'intégrer des cellules photovoltaïques dans les vitres destinées aux façades de bâtiments (vitrage dit photovoltaïque). D'autres recherches visent à rendre le verre réactif à la lumière, c'est-à-dire capable de s'opacifier afin de mieux réguler les apports solaires.

Les secteurs ayant connu le plus d'innovations au cours des dernières années semblent toutefois être ceux des verres techniques, comme par exemple les verres de lunettes (photochromiques, photosensibles, etc.) ou encore les écrans de matériel informatique (notamment avec le développement fulgurant des écrans tactiles).

Quelques innovations sont en cours également du côté des outils de production, plutôt dans une dynamique d'optimisation des technologies existantes afin de réduire les consommations énergétiques et le bilan carbone de la production – par exemple avec des fours hybrides remplaçant une grande part du gaz par de l'électricité décarbonée.

Enjeu territorial / Grand Lyon et AURA

Plusieurs industries de la grande région lyonnaise travaillent dans le domaine de la production de verre. C'est le cas de plusieurs fabricants de verre creux comme Owens-Illinois (Vaulx-en-Velin, Veauche) ou Verrallia/Saint-Gobain (Saint-Romain-le-Puy). Une usine de recyclage de verre creux et de verre plat (pour la production de calcin) est également présente à proximité de ces deux sites, à Saint-Romain-le-Puy, dans la Loire. La répartition assez homogène de telles installations sur le territoire est importante dans une perspective de réduction des besoins de transports liés au recyclage (de la collecte de verre en amont jusqu'à la transformation en verre, en passant par l'étape intermédiaire de production de calcin).

Une usine de verre flotté (verre plat) est installée dans la Vallée du Rhône à Salaise-sur-Sanne (Saint-Gobain/Riou Glass).

On notera enfin qu'une filière de consigne du verre creux est en train de se structurer sur la région lyonnaise (Reboteille), avec d'ores et déjà plus d'une centaine de points de collecte et une unité de lavage en projet.

Principales sources utilisées :

- ADEME, 2021. « Les Plans de Transition Sectoriels pour décarboner l'industrie lourde française à l'horizon 2050 », ADEME, mis en ligne le 3 décembre 2021, url : <https://agirpoulatransition.ademe.fr/entreprises/demarche-decarbonation-industrie/actualites/plans-transition-sectoriels-decarboner-industrie>
- Bernon N., 2019. « Le sable, une ressource essentielle en voie de disparition », The Conversation, le 13 septembre 2019. - <https://theconversation.com/le-sable-une-ressource-essentielle-en-voie-de-disparition-122094>
- Chatel L. 2015. « Consigne du verre contre recyclage : quel bilan pour le climat ? », Zero Waste France, mis en ligne le 17 février 2015. - <https://www.verre-avenir.fr/Le-recyclage-du-verre/#accueil>
- Colombel R., 2021. « Le marché des isolants boosté par Maprimerenov' », Batiweb, mis en ligne le 29 janvier 2021. - <https://www.batiweb.com/actualites/vie-pratique/le-marche-des-isolants-booste-par-maprimerenov-37345>
- FEVE, 2022. « Furnaces of the future. A fundamental milestone towards climate neutral packaging », mis en ligne le 14 mars 2022. - <https://feve.org/glass-industry/projects/furnace-future/>
- Grand View Research, 2020. Glass Manufacturing Market Size, Share & Trends Analysis By Product, By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2022-2030. GVR-4-68038-699-8. - <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/glass-manufacturing-market>
- Glass Alliance Europe, 2021. The European glass sector contribution to a climate neutral economy. Position paper, Glass Alliance Europe, Mai 2021. - https://www.glassallianceeurope.eu/images/para/2021-05-05-gae-position-paper-on-decarbonisation-v2_file.pdf
- Growth Leader Economy, non daté. « Innovations in Glass Manufacturing Industry », Ideapoke, mise en ligne non datée (consulté le 25 novembre 2022). - <https://www.ideapoke.com/growthleader/glass-manufacturing-innovation/>
- L'Écho de la baie, 2021. « Marché du verre plat 2021 : le baromètre de l'UDTVP », L'écho de la baie, mis en ligne le 10 novembre 2021. - <https://www.lechodelabaie.fr/actualites/marche-du-verre-plat-2021-le-barometre-de-ludtvp/>
- L'Elémentarium, non daté. « Verres », in L'Elémentarium, tableau périodique, mise en ligne non datée (consulté en novembre 2022). - <https://lelementarium.fr/product/verres/>
- Livage J., 2004. « Le verre », La Recherche, n° 379, octobre 2004. - <https://www.larecherche.fr/le-verre>
- Meinig B., Buoncuore D., Gansäuer E., Lucas J., 2022. « Decarbonisation & Public Funding : What's in it for the Glass Industry », Glass International, mis en ligne le 29 mars 2022. - <https://www.glass-international.com/features/decarbonisation-public-funding-whats-in-it-for-the-glass-industry>
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2017. « Le recyclage du verre plat : un engagement pour la croissance verte », Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, mis en ligne le 8 novembre 2017. - <https://www.ecologie.gouv.fr/recyclage-du-verre-plat-engagement-croissance-verte>
- Research and Markets, 2021. Float Glass Market Forecasts to 2028 – COVID19 Impact and Global Analysis By Type and Application and Geography, R&M.
- Sud-Ouest, avec l'AFP, 2022. « Hausse du prix de l'énergie : l'État aide la verrerie Duralux en lui accordant un prêt de 15 millions d'euros », Sud-Ouest, mis en ligne le 21 novembre 2022. - <https://www.sudouest.fr/economie/energie/hausse-du-prix-de-l-energie-l-etat-aide-la-verrierie-duralux-en-lui-accordant-un-pret-de-15-millions-d-euros-13060429.php>
- UNEP, 2019. Sand and Sustainability : Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources. UNEP. - <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/28163>
- Verre Avenir, non daté. « Recyclage du verre », Verre Avenir, mise en ligne non datée (consulté le 25 novembre 2022). - <https://www.verre-avenir.fr/Le-recyclage-du-verre/#accueil>



COMPOSITES



En résumé – Les matériaux composites combinent un « renfort » (par exemple une fibre de verre ou de carbone) et une « matrice » (par exemple une résine polymère). Ces matériaux permettent d'associer des caractéristiques *a priori* peu compatibles, comme la légèreté et la solidité.

Ils sont de plus en plus utilisés dans les secteurs de la mobilité, des énergies renouvelables ou des loisirs. Indispensables à la transition énergétique, ils permettent d'alléger les véhicules ou de construire des éoliennes, mais leur production est paradoxalement énergivore et ils sont difficilement recyclables.



Définition et caractéristiques

Les matériaux composites forment une catégorie de matériaux un peu à part, puisqu'ils combinent plusieurs matériaux de familles différentes pour obtenir des propriétés particulières résultant de cette combinaison. Il existe une grande variété de matériaux composites, qui sont généralement constitués de deux matériaux complémentaires respectivement appelés « renfort » et « matrice ». Le renfort est souvent un support fibreux ou filamentaire, qui assure l'essentiel des propriétés mécaniques : il peut s'agir par exemple de fibre de carbone, de fibre de verre, de fibres végétales, voire de bois ou même dans certains cas d'acier ou de céramiques. La matrice joue quant à elle le rôle de liant : il peut s'agir par exemple de résine, de colle ou encore de polymère.

On peut distinguer trois familles de composites, selon la nature de leur matrice :

- Les **composites à matrice organique** (CMO) : il s'agit le plus souvent d'une résine polymère, associée à un renfort qui peut être en fibre de verre, fibre de carbone ou encore fibre végétale. Très répandus, les CMO sont utilisés dans l'aéronautique, les matériels de sport, le bâtiment, le mobilier ou encore l'industrie.
- Les **composites à matrice céramique** (CMC) : beaucoup moins répandus, ils sont utilisés dans l'industrie aéronautique et militaire. La céramique est rigide, plus légère que de nombreux métaux, mais cassante, d'où son association au carbone ou à l'alumine.
- Les **composites à matrice métallique** (CMM) : également peu répandus car complexes et onéreux à produire, ils sont constitués d'une matrice en métal (généralement l'aluminium) complétée de fibres céramiques ou métalliques, et sont utilisés surtout dans l'aéronautique et le spatial.

Les chiffres et tendances présentés ci-après concernent les CMO, qui représentent la majorité des matériaux composites, ainsi que ceux qui sont probablement amenés à le plus se développer dans le contexte de la transition énergétique.

Note complémentaire : le béton armé est parfois considéré comme un matériau composite, ainsi que les plaques de plâtre, par exemple. Ils associent au moins deux matériaux pour en combiner les qualités (ex. acier et béton). Pour autant ils n'entrent dans la catégorisation susmentionnée. Dans les CMO peuvent être inclus ceux utilisant du bois et des résines ou colles (contreplaqués, voire agglomérés), mais les statistiques des matériaux composites sont en réalité souvent réduites au champ des CMO de type fibres + résines, décrits ci-dessus. Pour mémoire :

- Contreplaqués : il s'agit de feuilles de bois obtenues par déroulage des grumes, superposées de manière croisée et collées entre elles (à plat ou moulées). Elles font l'objet d'une très grande diversité d'usage, dont plus de 65% dans le bâtiment (construction et agencement). 250 000 m³ de contreplaqués sont produits chaque année en France, soit environ 160 000 tonnes (2 à 3 kg/hab/an).
- Béton armé : 20 millions de tonnes de béton sont produits chaque année en France (300 kg/hab/an), dont seulement 120 000 tonnes de béton armé.



Procédés de fabrication et principaux usages

La production de CMO à base de fibres et de résines représenterait aujourd'hui environ 18 millions de tonnes par an au niveau mondial, soit 2 à 3 kg/hab/an, pour un chiffre d'affaires de 86 milliards de dollars US. On distingue en particulier trois types de CMO :

- Les **fibres de verre** sont produites à partir de verre, lui-même chauffé à haute température (plus de 1000°C) par fusion de silice, de carbonates de sodium et de calcium (concrètement, il s'agit de sable associé au carbonate de sodium et à d'autres matériaux minéraux). La fibre est obtenue par étirage du verre chauffé, et peut ensuite prendre différentes formes, notamment en tissages. Elle est ensuite mélangée à des résines polymères. La fibre de verre est de loin le premier des composites à polymère en volume, puisqu'elle représente 88% du total des masses de CMO. À noter que ces fibres peuvent également être associées à des matrices d'autres natures, comme des ciments.
- Les **fibres naturelles** sont des fibres végétales (comme le lin), animales (comme la soie) mais aussi minérales (comme l'amiante). Elles représenteraient 11% des fibres utilisées dans l'ensemble des matériaux composites associés à des matrices. Les données concernant ces fibres sont plus difficiles à identifier (origines, volumes, etc.), l'amiante étant historiquement un matériau dont les volumes ont pu être importants par le passé (fibrociment, notamment). Les fibres et résines végétales semblent en revanche encore assez marginales aujourd'hui.
- Les **fibres de carbone** sont produites à partir de pétrole ou de charbon, transformés en polypropylène, puis en polyacrylonitrile (PAN). Les fibres de PAN sont ensuite oxydées à environ 300°C, puis carbonisées à plus de 1000°C, avant que soit opéré le procédé de graphitisation en tant que tel, qui nécessite une cuisson à plus de 3000°C. L'ensemble du procédé est donc très énergivore : pour 1 kg de fibre il faut consommer environ 80 kWh d'énergie. La production mondiale de fibre de carbone est de 80 000 t/an en 2018, et elle est le plus souvent associée à des polymères (résines) pour un total de 150 000 tonnes de matériaux composites à base de carbone. Cela représente seulement 1% de la masse des composites polymères, mais près d'un tiers du chiffre d'affaires du secteur (23 milliards de dollars US en 2018). Les secteurs utilisateurs sont majoritairement l'aviation (34%) et l'automobile (26%), et dans une moindre mesure l'éolien (13%) et les loisirs (13%). Il y a 20 tonnes de composites de carbone dans un Boeing moderne (lui-même constitué à plus de 50% de composites).



Tendances, disponibilité et dépendances

Le taux de croissance du secteur des CMO est important, s'élevant à 5-6% par an au cours des dernières années à l'échelle mondiale. Les observateurs du marché des composites prévoient une forte augmentation de la demande dans les années à venir, avec près de 9% de croissance de chiffre d'affaires par an attendu sur la période 2020-2025 pour ce qui concerne les composites utilisant des résines polymères. Cette augmentation de la demande est encore plus forte pour le carbone, dont le marché est porté par l'aéronautique, l'automobile et l'éolien dans un contexte marqué par une volonté d'allègement des véhicules, et dans une perspective de transition énergétique du secteur des transports.

Les matières premières des différentes CMO (sable, silice, pétrole, charbon, etc.) ne semblent pas menacées d'approvisionnement à court terme – d'autant que la part de ces matières consommées par le secteur des CMO est souvent négligeable. En revanche certains procédés sont gros consommateurs d'énergie (pour la fibre verre et plus encore le carbone) ce qui les rend sensibles au prix de l'énergie.

Enfin, l'Europe ne souffre pas d'une dépendance particulièrement marquée en termes de production comparée à sa consommation. Si environ un tiers de la production de fibre de carbone s'opère en Chine, 21% est encore fabriquée en Europe. La production de fibre de verre est quant à elle concentrée dans les mains d'un nombre assez restreint de producteurs, dont le Français Saint-Gobain (filiale Vetrotex) qui possède plusieurs sites de production en Europe.



Circularité et recyclage

Le recyclage est l'un des principaux talons d'Achille des matériaux composites. Une fois liés, le renfort et sa matrice deviennent en effet le plus souvent inextricables. Le recyclage devient de ce fait très complexe et génère des pertes de qualité du matériau, avec essentiellement trois voies possibles :

- La réutilisation directe, sans transformation chimique, par exemple pour produire du mobilier urbain à partir de pales d'éoliennes ;
- Le broyage puis la valorisation énergétique, par exemple dans les cimenteries
- Le broyage pour la fabrication d'autres matériaux composites recomposés, mais de moindre qualité.

Ces filières de valorisation sont toutefois encore assez balbutiantes en France comme dans le reste de l'Europe, si bien que la plupart des déchets de matériaux composites ne sont aujourd'hui pas recyclés ni valorisés.



Décarbonation

Les matériaux composites sont confrontés à un dilemme d'un point de vue de la transition énergétique et de la décarbonation :

D'un côté, **leur production est généralement énergivore et carbonée**. Par exemple, la production de fibres de carbone ou d'aramide est très énergivore et, même en France, elle a une empreinte carbone qui varie de 20 à 40 kg de CO²e/kg de fibre, pour la seule étape de production de graphitisation. Les fibres de verre, moins performantes en termes de rigidité et de légèreté, ont en revanche un bilan plus favorable, proche de 3 kg de CO²e/kg de fibre. Dans tous les cas il faut ajouter le bilan de la résine, qui tourne également aux alentours de 3 kg de CO²e/kg (selon la base carbone de l'ADEME). La légèreté accrue de la fibre de carbone se paie donc par un bilan carbone de production nettement plus élevé, et les pistes de décarbonation de ce matériau restent très liées à celle de l'énergie utilisée.

D'un autre côté, **ces matériaux sont considérés comme stratégiques pour opérer la transition énergétique**. Du fait de leur rapport poids/solidité, certains matériaux composites sont en effet très fortement sollicités pour répondre à deux enjeux :

- La production d'énergies renouvelables, en particulier dans le secteur de l'éolien, qui connaît une très forte croissance ;
- L'allègement des véhicules, en particulier les voitures et les avions, qui font de plus en plus appel aux matériaux composites (la moitié de la masse d'un avion est aujourd'hui composée de matériaux composites, dont 20 tonnes de composites à base de carbone).



Autres impacts environnementaux et sociétaux

La production de composites à base d'amiante, comme les fibrociments, a longtemps représenté des volumes importants, avant que les effets sur la santé de l'amiante soient révélés et que sa vente soit progressivement interdite.



Substituabilité et alternatives

Les CMO sont amenés à remplacer d'autres matériaux comme les plastiques ou les métaux, dans certains usages spécifiques qui font notamment apparaître un enjeu d'allègement – dans des industries comme celle des transports ou, dans une moindre mesure, celle des loisirs (équipements de sport par exemple). Des substitutions sont probables à l'intérieur de ce secteur, notamment entre fibres de verre et fibres de carbone (ces dernières étant plus légères et rigides).

On constate également des substitutions en cours entre CMO d'origines minérales et fossiles d'un côté, et CMO naturelles et biosourcées de l'autre, par exemple dans le secteur des loisirs. Les industries du ski et du surf et, dans une moindre mesure, celles de l'automobile s'intéressent par exemple de plus en plus aux résines et fibres naturelles (le lin notamment) mais les volumes en jeu restent marginaux.



Innovations

Les principales innovations en cours dans le secteur des CMO semblent liées à la transition écologique et énergétique : recherche de procédés moins carbonés, amélioration des procédés de recyclage ou encore substitution par des matériaux biosourcés.

Par exemple, dans le secteur de l'éolien, l'enjeu du recyclage des pales devient important :

- Le consortium ZEBRA, qui regroupe des énergéticiens du secteur de l'éolien et des acteurs industriels des filières des polymères et des composites, développe actuellement des procédés visant à fabriquer des pales d'éoliennes constituées à 100 % de matériaux recyclés.
- Le projet CETEC, piloté par l'industriel de l'éolien Vestas, développe un procédé qui cherche à améliorer la séparabilité des résines et des fibres dans les pales éoliennes usagées, afin de plus facilement les recycler et les valoriser.

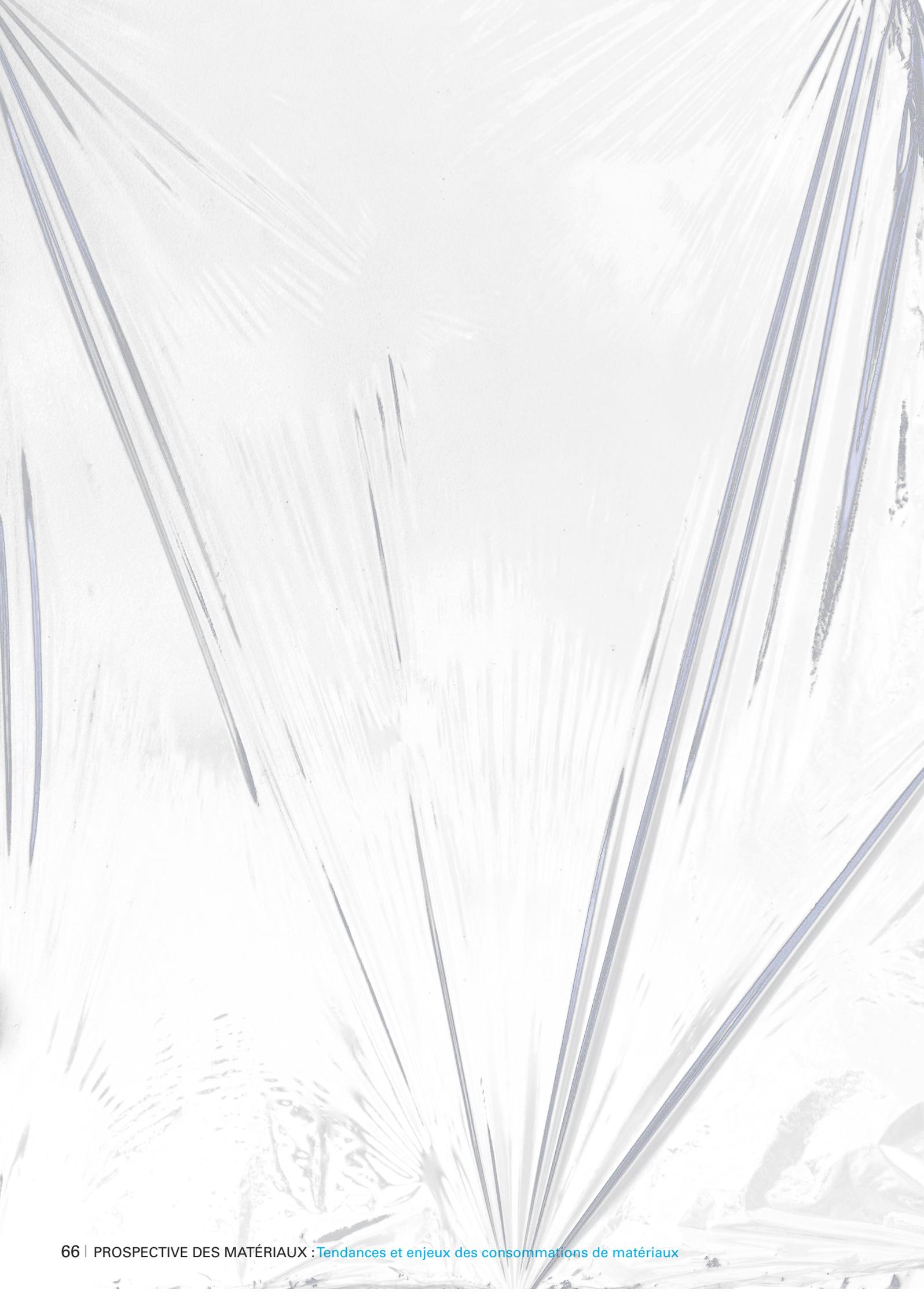
Enjeu territorial / Grand Lyon et AURA

Plusieurs entreprises fabriquent ou assemblent des fibres de verre et de carbone en région Auvergne-Rhône-Alpes. C'est le cas par exemple de Hexcel, un fabricant de fibres de carbone dont une usine est basée en Isère, ou encore ATG composite, dans le Rhône. Le leader de la production de fibres de verre, Vetrotex (Saint-Gobain) a en revanche fermé son usine de Chambéry. De nombreuses industries produisent également des résines ou des polymères qui peuvent entrer dans la composition des matériaux composites.

L'industrie du ski est confrontée à un enjeu de recyclage des matériaux composites présents dans les skis et snowboards usagés. Même si les volumes sont modestes, une filière s'est structurée, mais avec une faible valorisation matière qui passe par le broyage et l'incinération avec récupération énergétique.

Principales sources utilisées :

- Al-Oqla F.M., Salit M.S., 2017. Materials Selection for Natural Fiber Composites. WoodHead Publishing.
- Bilan carbone. - <https://bilans-ges.ademe.fr/>
- FIB – Fédération de l'Industrie du Béton, non daté. « Chiffres clés », mise en ligne non datée (consulté en octobre 2022). - <https://www.fib.org/industrie-du-beton-chiffres-cles/>
- JEC Group, 2020. « Le JEC Observer : une vision globale du marché des composites », mis en ligne en mars 2020. - <https://www.jeccomposites.com/press/le-jec-observer-une-vision-globale-du-marche-des-composites/>
- Leblanc B., 2011. « Recycler des skis, un problème typiquement alpin », in L'usine nouvelle, mis en ligne le 26 février 2011. - <https://www.usinenouvelle.com/article/recycler-des-skis-un-probleme-typiquement-alpin.N147304>
- La rédaction, non daté. « Le recyclage des pales éoliennes », in Le journal de l'éolien onshore et offshore, mise en ligne non datée (consulté en octobre 2022). - <https://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/le-recyclage-des-pales-eoliennes/>
- L'Elémentarium, non daté. « Fibres de carbone », in L'Elémentarium, tableau périodique, mise en ligne non datée (consulté en octobre 2022). - <https://lelementarium.fr/product/fibres-de-carbone/>
- Mayer N., 2016. « Composites à matrices céramiques : qu'est-ce que c'est ? » in Futura Sciences, mis en ligne le 15 janvier 2016. - <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-composite-matrice-ceramique-15248/>
- Mr Mondialisation, 2020. « Recyclage de la fibre de carbone : une urgence écologique méconnue », in Mr Mondialisation, mis en ligne le 4 février 2022. - <https://mrmondialisation.org/recyclage-de-la-fibre-de-carbone-une-urgence-ecologique-meconnue/>
- Motteau G., 2017. « Innovation. La fibre de lin de Linéo équipe planches de surf et skis », in Ouest France, mis en ligne le 10 avril 2017. - <https://www.ouest-france.fr/normandie/sa-fibre-de-lin-equipe-planches-de-surf-et-skis-4920692>
- UIPC – Union des Industries du Panneau Contreplaqué, 2022. « Les chiffres clés », mise en ligne non datée (consulté en octobre 2022). - <http://www.uipc-contreplaque.fr/les-chiffres-cles/>



PLASTIQUES



En résumé – Les plastiques sont indispensables à la conception de nombreux biens et alimentent nombre de filières telles que les emballages, le BTP ou l'automobile. À l'origine de nombreuses émissions polluantes sur l'ensemble de son cycle de vie, ces matériaux font l'objet de réglementations de plus en plus contraignantes et devraient voir leur demande augmenter de façon croissante à travers le monde. Aucune alternative totale n'est à ce jour viable, même si des innovations de procédé (intégration de matières premières recyclées et/ou biosourcées), la réduction de leur usage voire la substituabilité de ce matériau se développent.



Définition et caractéristiques

Les plastiques se divisent en trois familles et plusieurs sous-familles :

- Les **thermoplastiques** dont les principaux sont le Polyéthylène (PE), Polyéthylène haute densité (PEhd), Polychlorure de vinyle (PVC), Polyéthylène téréphtalate (PET), Polypropylène (PP), Polystyrène (PS) et le Polyamide (PA). Leur transformation est réversible ce qui en favorise le recyclage.
- Les **thermodurcissables** dont le plus consommé est l'Aminoplaste. Leur transformation irréversible empêche tout recyclage mais assure la solidité et la rigidité des produits finis. Ces plastiques ne représentent que 5% de la consommation totale de plastiques.
- Les **élastomères** servant à la production du caoutchouc et pouvant provenir soit d'une culture naturelle d'hévéa, soit de l'industrie pétrochimique. Ces plastiques synthétiques sont difficilement recyclables.



Procédés de fabrication et principaux usages

Les plastiques sont principalement issus de l'industrie pétrochimique et passent par un ensemble d'étapes transformant la matière première (combustible fossile) en un objet fini. Le Naphta, dérivé du pétrole, va subir deux transformations chimiques. Il est tout d'abord chauffé à 800°C puis refroidit brutalement (procédé de vapocraquage) pour obtenir des monomères, des molécules de petite taille et de faible masse moléculaire qui, en s'attachant à une ou plusieurs molécules identiques, forment des macromolécules appelées polymères. Présentés sous forme de granulés, liquides ou poudres, ces derniers sont associés à des adjuvants avant d'être moulés, injectés ou thermoformés dans des usines de plasturgie. Près de 5300 formulations de polymères sont actuellement commercialisées.

Les plastiques sont largement plébiscités pour leurs propriétés inégalables : légèreté, rigidité, souplesse, résistance aux chocs ou à la corrosion, capacité à conduire l'électricité, conditions d'hygiène et de conservation optimales, etc. Ces propriétés leur confèrent des applications et des débouchés variés, systématisant ainsi leur présence dans toutes les activités humaines.

En France, plus de 90% de la production de matières plastiques porte sur les thermoplastiques dont 80% sur les trois thermoplastiques que sont le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP) et le polychlorure de vinyle (PVC). À l'instar du territoire européen, ces débouchés alimentent une multitude de secteurs en commençant par les emballages (46%) mais également le BTP (19%), l'automobile (10%), les produits électriques et électroniques (5%), l'ameublement, les équipements de loisirs et de sport (4%) et l'agriculture (3%).

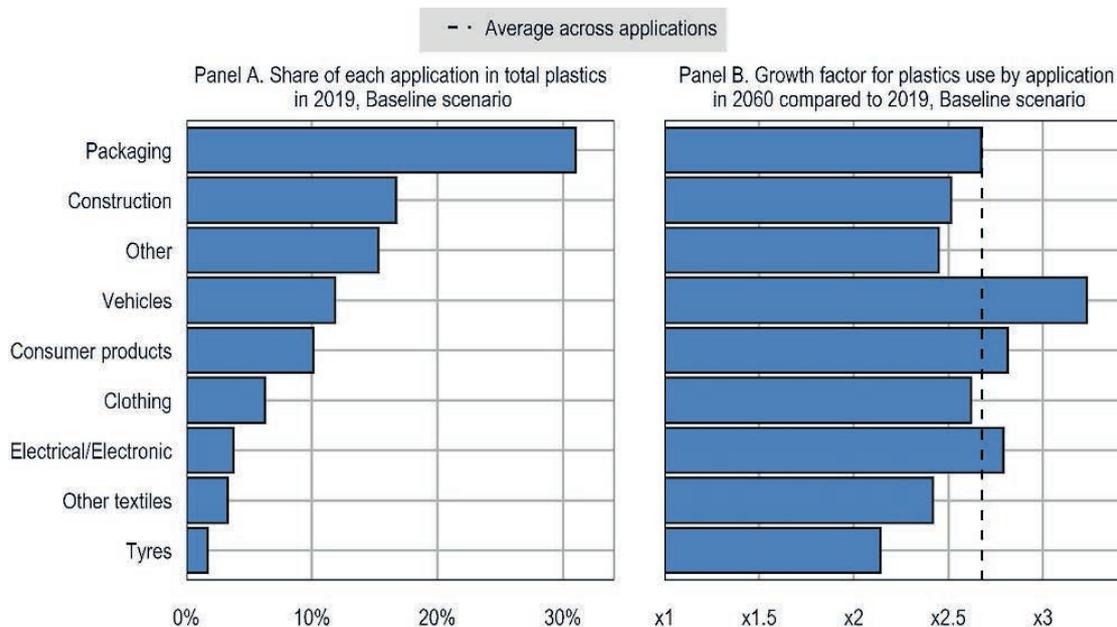


Tendances, disponibilité et dépendances

La production mondiale de plastique, qui aurait doublé ces 20 dernières années, représentait 367 millions de tonnes métriques en 2020. Avec 55 millions de tonnes produits en 2020 (Plastic Europe, Epro, 2021), l'Union européenne est le 3^e producteur mondial de plastiques, après l'Asie et l'Amérique du Nord. Derrière l'Allemagne et l'Italie, la France représente près de 10% de la consommation de plastiques en Europe. Un Français consommerait près de 70 kg de plastique par an. Cette production planétaire et effrénée pourrait même tripler à l'horizon de 2050⁷. Selon l'OCDE, la dynamique de consommation des plastiques (OCDE, 2022) résulterait d'une forte croissance démographique et d'une hausse des revenus par habitants ayant un impact non négligeable sur certaines pratiques telles que la consommation à emporter ou encore, de la vente en détail en ligne. Ces pratiques se sont vues amplifier lors de la pandémie de Covid-19.

Les projections à 2060 de l'OCDE mettraient notamment en avant une hausse des consommations de plastiques dans des zones de croissances économiques telles que l'Afrique subsaharienne, en Asie et en Inde. Elle définit également des pics dans les secteurs des transports, de la construction et des emballages. Par conséquent, les augmentations les plus importantes concerneront les polymères utilisés pour ces applications, tels que le PET (polyéthylène téréphthalate) et le PE (polyéthylène), utilisés pour l'emballage.

Répartition des usages du plastique à horizon 2060 (Source : OECD ENV-Linkage model)



La hausse des niveaux de vie et d'industrialisation des pays hors OCDE sont présentés par l'OCDE comme étant les principales causes d'accroissement de la consommation de plastiques d'ici 2060. Ce phénomène entraînera des répercussions sur la demande dans le secteur de la construction et des transports ainsi que pour les secteurs de consommation de biens, notamment de véhicules et d'appareils électroménagers. Pour les emballages, l'OCDE justifie ce phénomène par un accroissement du marché mondial des services et par une utilisation de plus en plus intensive d'emballages et de biens de consommations tels que les contenants alimentaires à emporter, les produits médicaux, les fournitures artistiques, les cartes de crédits ou encore, les bagages.

Malgré les estimations sur la croissance de la production de plastique, Jean-Yves Daclin, directeur général pour la France de Plastic Europe tempère : « Compte tenu des politiques décidées partout dans le monde pour limiter l'utilisation des emballages en plastique à usage unique, il est probable que cette croissance diminue et que la production de plastiques ne double pas à nouveau d'ici 2040 » (dans La Dépêche, 2022).

7. Le WWF annonçait un triplement de la production d'ici 2040 tandis que IFPEN envisage une production pouvant atteindre 1 milliard de tonnes par an en 2050.

Selon l'étude de l'OCDE, les politiques actuelles sont encore insuffisantes pour déplacer significativement la production de plastiques primaire vers les plastiques secondaires. Les plastiques primaires sont ceux utilisés majoritairement, à savoir : les plastiques fossiles et biosourcés. Les plastiques secondaires (fabriqués à partir de matériaux recyclés) ne représentent que 6% de la consommation mondiale de plastiques alors que sa consommation peut réduire les pressions environnementales. En Europe, une croissance est attendue en raison de l'apparition d'un cadre politique renforcé telles que les normes réglementaires de contenus recyclés dans les produits.



Disponibilité

Pour assurer sa consommation, la France est majoritairement dépendante de combustibles fossiles en provenance de grandes puissances étrangères. Son approvisionnement en pétrole est principalement issu de l'Arabie Saoudite, du Kazakhstan, de la Russie et du Nigéria.

Depuis 2010, le marché européen de la pétrochimie est, quant à lui, devenu un marché d'importation. Ainsi, le déficit extérieur de la France était, en 2021, de -1,1 million de tonnes et 3,2 milliards d'euros.

Supplanté par l'attractivité des prix pratiqués par la concurrence étrangère (notamment les États-Unis) et face à un marché qui s'oriente progressivement vers les plastiques recyclés, les pétrochimistes européens ont réduit leurs investissements. Les arrêts de productions en aval de la chaîne, associés à des épisodes de forces majeurs sur les sites de production pétrochimiques, des ralentissements dans les approvisionnements maritimes et une hausse des importations chinoises de polymères en provenance des États-Unis et d'Europe à la sortie de la crise du Covid-19, ont par conséquent fragilisé les plasturgistes. Ces derniers ont également dû faire face à une hausse des coûts des matières premières polymères.



Circularité et recyclage

La France fait partie des pays européens les moins performants en matière de recyclage des plastiques. La répartition française du traitement des déchets (3,6 millions de tonnes collectés en 2018) se décompose entre 24% de recyclage, 43% de revalorisation énergétique et 33% de mise en décharge. Si la capacité du pays à recycler et revaloriser ces déchets est loin derrière les performances de l'Allemagne, de la Suède ou encore de la Belgique, la France a vu ses volumes de recyclage et de revalorisation augmenter respectivement de 79% et de 35% au cours de la dernière décennie (Plastics Europe, Epro, 2020). Alors que 75% des déchets plastiques pourraient être recyclés, la filière a encore besoin de s'organiser et de s'industrialiser.

Procédés de recyclage du plastique

Recyclage mécanique	Recyclage chimique	Recyclage enzymatique ou biologique
Le plus souvent, les plastiques sont broyés par action mécanique sans modification de leur structure chimique. Ce procédé se limite à des formulations composées d'un seul polymère et d'additifs similaires. Ce recyclage ne permet pas de recycler la totalité du produit. Il implique une perte de matière et une dégradation de ses propriétés. Par conséquent, ces plastiques ne sont pas recyclables à l'infini et finiront, à terme, incinérés.	Il s'agit d'une séparation des composants par réaction chimique (dépolymérisation) permettant de produire de nouveaux plastiques. Ce procédé permet de recycler des déchets plastiques «mêlés à des inertes ou souillés par des matières organiques inséparables, des mélanges de différents plastiques, de différents grades ou de différents additifs, pour lesquels le recyclage mécanique n'est pas possible pour des raisons techniques ou économiques» (Delavelle, De Caebel, 2015). Trois techniques existent : dissolution, gazéification et pyrolyse.	Le procédé est identique au recyclage chimique mais se réalise à l'aide de bactéries ou de levures qui digèrent les sucres et rejettent du CO ₂ . Le recyclage chimique, enzymatique ou un mix des deux solutions sont choisies au cas par cas.

Le recyclage des plastiques rencontre en effet plusieurs freins à son déploiement :

- L'association des plastiques à d'autres matériaux ou la présence de certains additifs rend les opérations de recyclage complexes ;
- Certaines filières de collecte ne sont pas encore assez développées pour assurer le recyclage des plastiques selon leurs catégories de produits (matériaux de construction, objets de bricolage, etc.) ;
- Les volumes collectés sont encore insuffisants pour assurer des prix compétitifs à ceux des polymères vierges.

Pour autant, les plastiques peuvent entrer dans une boucle vertueuse d'économie circulaire. Poussé par des objectifs nationaux visant à atteindre 100% de recyclage des emballages en plastique à usage unique en 2025⁸, l'industrie plasturgique se mobilise également pour une transformation de son modèle. Ainsi, les plasturgistes européens se sont engagés à atteindre 10 millions de tonnes de matière plastique recyclée (MPR) chaque année, entre 2025 et 2035. Dans son livre blanc, Polyvia précise que 50% des entreprises françaises consommeraient déjà des MPR et indique qu'une tonne de MPR réinjectée dans un nouveau cycle de production des entreprises françaises équivaldrait à une réduction de gaz à effet de serre situé entre 1,3 à 2 tonnes équivalents de CO₂.

Dans cette optique, le recyclage chimique est une solution complémentaire au recyclage mécanique qui permettrait d'augmenter les typologies de produits recyclables (plastiques multicouches, souillés et souples). S'il s'avère être un levier puissant pour augmenter les volumes de MPR, ce procédé n'en est pas moins décrié pour son coût, sa consommation énergétique⁹ et, surtout, la nocivité environnementale des solutions chimiques utilisées. Alors que l'on doutait de son potentiel déploiement il y a encore quelques années, c'est à présent par le prisme de grands investissements sur le territoire français que cette technique se répand.



Décarbonation

L'augmentation croissante de la production et de la consommation de plastiques pourrait générer près de 56 milliards de tonnes d'émissions de CO₂ d'ici 2050 à l'échelle mondiale, soit 10 à 13% du budget carbone¹⁰ planétaire. Les plastiques favorisent ces émissions à plusieurs stades : production, transport, fabrication ou encore recyclage. Toutefois, plusieurs zones d'ombre restent à éclaircir quant à l'ampleur de ces émissions. Concernant le recyclage, outre les émissions liées au transport et aux procédés de transformation de la matière, un autre phénomène est mis en cause : le nombre de cycles de recyclage possible actuellement ne fait que retarder légèrement sa fin de vie et donc, les émissions qu'il rejettera à terme¹¹.

8. Loi anti-gaspillage et économie circulaire (2020).

9. « Le recyclage chimique par pyrolyse consiste à chauffer les matières plastiques à une température comprise entre 500 et 600°C. » (dans *l'Usine Nouvelle*, Couto, 2021).

10. Le GIEC dans un rapport de 2018 définit le budget carbone comme une « estimation des émissions mondiales nettes cumulées de CO₂ anthropique depuis une date de début donnée jusqu'au moment où les émissions anthropiques de CO₂ atteignent un niveau net nul, ce qui aurait pour effet, selon toute probabilité, de limiter le réchauffement planétaire à un niveau donné, compte tenu de l'impact des autres émissions anthropiques. » Le budget carbone exprime ainsi la marge de manœuvre dont dispose la communauté internationale pour mettre en œuvre ses mesures de réduction d'émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale. (Novethic.fr : <https://www.novethic.fr/lexique/detail/budget-carbone.html>).

11. Le nombre de cycles de recyclage des polymères actuels se situe entre 5 à 10. À titre d'exemple, une bouteille d'eau en PET peut subir une dizaine de cycles en un an. (The Sea Cleaners, 2020)

12. À l'époque largement médiatisée par *WWF*, cette donnée est en réalité la fourchette haute de l'estimation faite par les chercheurs australiens : « La limite inférieure est quant à elle de 0,1 g, soit 50 fois moins. [...] Les chercheurs reconnaissent donc que leurs analyses sont perfectibles, mais suggèrent que la réalité se situerait près de 0,7 g par semaine » (Techno-science.net, 2022)



Autres impacts environnementaux et sociétaux

La composition des plastiques et leur production massive posent de nombreux risques de pollution pour les écosystèmes naturels et de toxicité pour la santé humaine. Les recherches démontrent l'impact de la dégradation des plastiques sur la faune et la flore. Si les effets sur les océans sont aujourd'hui largement documentés, ceux impliquant la pollution des sols et des eaux intérieures n'en sont qu'à leurs prémices. Ainsi, 1/3 des plastiques produits annuellement finiraient dans les sols (utilisation de protections pour les cultures, présence de microparticules dans les eaux usées qui serviront ensuite de fertilisants, etc.).

Les sources d'ingestion par l'homme sont également bien documentées. À titre d'exemple, selon une étude menée en 2019 par l'Université de Newcastle (cité dans Althoff, 2020), un individu ingérerait environ 5 g de plastique par semaine, soit l'équivalent d'une carte de crédit¹². Si la toxicité de certains additifs comme les phtalates et le bisphénol A sont à présent reconnus, les chercheurs ne disposent pas du même degré de connaissances pour toutes les formulations existantes : « Ces chiffres, d'ores et déjà inquiétants, ne disent toutefois rien des conséquences sanitaires de l'absorption de plastiques. On ignore ainsi si les particules ingérées peuvent pénétrer dans le sang et donc dans les organes internes. Il est tout à fait possible qu'elles soient ensuite expulsées du corps via le tube digestif » (Althoff, 2020). De plus, l'Atlas du Plastique (Althoff, 2020) indique qu'il est actuellement impossible de mesurer l'ampleur de l'exposition humaine aux particules car les données sur la composition des produits se perdent au fil de la chaîne d'approvisionnement ou sont « tue[nt] par les fabricants au nom d'une prétendue confidentialité des informations commerciales ».

À cela s'ajoutent toutefois les effets potentiels sur la santé des populations proches des sites pétrochimiques et d'incinération.



Substituabilité et alternatives

Outre l'enjeu de réduction des impacts écologiques du plastique pétrosourcé, les risques de rupture d'approvisionnement en matière première font émerger de nouveaux plastiques dits biosourcés. Ces derniers, développés à partir de la biomasse, sont classés en deux catégories :

- D'une part, les bioplastiques aux propriétés équivalentes aux plastiques pétrosourcés, comme le polyéthylène issu de la canne à sucre.
- D'autre part, de nouveaux entrants plus innovants comme l'acide polylactique issu de l'amidon et utilisé pour l'impression 3D ou issus de la protéine du lait comme le fait Lactips (Saint-Paul-en-Jarez, 42) pour produire des films plastiques biodégradables.

Note : biosourcé vs biodégradable

Biosourcé : produit composé en tout ou partie à base de plastiques issus de la biomasse. Par décret datant de 2017, un plastique biosourcé doit contenir un minimum de 30% de matière première naturelle. La loi AGECE prévoit un seuil de 60% d'ici 2025.

Biodégradable : phénomène de décomposition sous l'action de micro-organismes. En d'autres termes, un plastique biosourcé n'a pas automatiquement de propriétés biodégradables.

Ces plastiques biosourcés, à l'origine conçus comme alternatives aux emballages alimentaires, se développent progressivement à d'autres secteurs (automobile, agriculture, téléphonie, etc.). En 2017, ces plastiques ne représentaient qu'1% de la production totale de plastiques, soit 0,02% des surfaces agricoles. Les controverses concernant les bioplastiques portent notamment sur les prévisions de croissance galopante de terres arables exploitées à ces fins et leur concurrence avec les usages alimentaires.

Dans certains secteurs, il est également possible de remplacer l'utilisation des plastiques par d'autres. C'est le cas notamment dans le secteur des emballages. Le tableau ci-dessous énumère quelques grandes tendances d'alternatives aux plastiques.

Usage / filière	Matériaux de substitution	Exemples
Emballages	Papier / Carton / biomasse	Le carton, s'il s'avère plus lourd, représente une alternative viable aux emballages plastiques. L'utilisation du papier est également courante mais d'autres substituts peuvent être explorés comme le bois, la pulpe végétale issue de la canne à sucre ou l'agar-agar, la fibre de roseau, ou le PLA (dérivé du maïs, de la betterave ou de la pomme de terre). D'après UPM Specialty Papers, les emballages à base de fibres représenteront plus de 40% des matériaux employés en 2040 (dans La Tribune, 2022)
Emballages	Verre	Le verre peut également être proposé en alternative et dispose de l'avantage d'être réutilisable.
Emballages	Aluminium	A La Ciotat, l'entreprise Ardagh Metal Packaging s'est par exemple engagée dans un programme de recyclage de ses chutes de fabrication et allège le poids unitaire de ses canettes. En novembre, l'usine provençale a obtenu la certification de l'Aluminium Stewardship Initiative pour la performance de sa solution de gestion des matières premières. L'aluminium est également un substitut viable dans les packagings alimentaires. (Molga, 2023)
Ameublement	Bambou	Déjà cultivé en Italie, le bambou commence à s'installer dans les exploitations de certains agriculteurs français recherchant une solution au réchauffement climatique et identifiant le potentiel de diversification de la graminée. La plus grande bamboueraie d'Europe se situe d'ailleurs dans la Gard. Des cultures s'installent progressivement à l'instar de Cap Bambou (Attignat, 01) qui s'associe avec un cultivateur local pour créer une gamme de produits made in France. (Saclier, 2021)
Ameublement	Métal / Bois	Des pièces de quincaillerie métalliques ou d'assemblage bois peuvent remplacer les pièces en plastique présent dans les produits de l'ameublement. Ces alternatives permettent d'anticiper au mieux la phase de démantèlement du produit en fin de vie en évitant que le plastique ne se mêle aux broyats du bois. (Eco-mobilier, 2016)
Eoliennes	Bois	Plusieurs sociétés propulsent la filière bois dans la fabrication d'éoliennes, à l'instar des mâts proposés par InnoVent (Villeneuve d'Ascq, 59) ou Modvion (Suède), commercialisées respectivement en 2021 et 2022. Des solutions peuvent aussi s'observer au niveau des pâles. La start-up allemande Voodin Blades, qui développe des pales de rotor durables pour les éoliennes, s'est associé en novembre 2022 à Stora Enso, l'un des principaux fournisseurs mondiaux de produits en bois massif. (Tisserand, 2022)



Innovations

Les innovations dans les bioplastiques visent actuellement à se détourner des bioplastiques de 1^{ère} génération (fabriqués à partir de ressources alimentaires) pour développer les bioplastiques de 2^e génération (biomasse lignocellulosique et déchets municipaux) et 3^e génération (micro-organismes produits hors-sol : algues, champignons, etc.). Selon l'association European Bioplastic, la demande pour ce type de plastique pourrait ainsi croître de 2,1 millions de tonnes en 2020 à 2,9 millions de tonnes en 2025. Solvay réalise, par exemple, des polymères naturels en séparant la cellulose et la lignine contenus dans les déchets du bois. Ces nouveaux polymères sont injectés dans des matériaux composites utilisés pour la fabrication d'avions ou de voitures.

Une autre voie d'innovation porte sur l'évolution de la filière du recyclage chimique. En Europe, 2,6 milliards d'euros seront investis dans ces technologies d'ici 2025 et au moins 7,2 milliards d'ici 2030¹³. Selon Jean-Francis Spindler, directeur R&I chez Solvay (interview du 15 février 2023) presque toutes les familles de plastiques sont recyclables de la sorte, à l'image du polyester ou de la polyoléfine : « il y en a quand même certains qu'on ne sait pas faire mais des petits volumes ultra techniques. Il faut continuer à travailler dans ce domaine ».

La famille des polyesters est, par exemple, très facile à recycler. Elle se retrouve dans les bouteilles mais également les chaussures de ski, les cordes en nylon ou les filets de pêches. Mais le polyester représente également 15 à 20% du poids final d'une voiture (coussins d'airbag, circuits de refroidissement ou pédales de frein). Solvay réalise ce type de recyclage pour produire des monomères servant à fabriquer de nouveaux polymères.

Le PVC est également recyclable. Par exemple, le groupe Serge Ferrari, basé à La Tour-du-Pin et qui utilise des toiles en PVC, exploitait avec Solvay l'usine de recyclage de PVC, Vinyloop. Installée en Italie, Vinyloop a fermé ses portes en 2018. Romain Ferrari, directeur RSE du groupe, a alors cofondé Polyloop en reprenant le procédé de dissolution de Vinyloop : « Au lieu de faire du recyclage pour les spécialistes du déchet, on produit de la matière première recyclée pour la plasturgie », explique-t-il (Delpont, 2021). Polyloop installe des unités de recyclage chez les plasturgistes et récupère ainsi un matériau vierge, « dont il maîtrise la provenance et la formulation ». Serge Ferrari a installé le premier module dans son usine fin 2022.

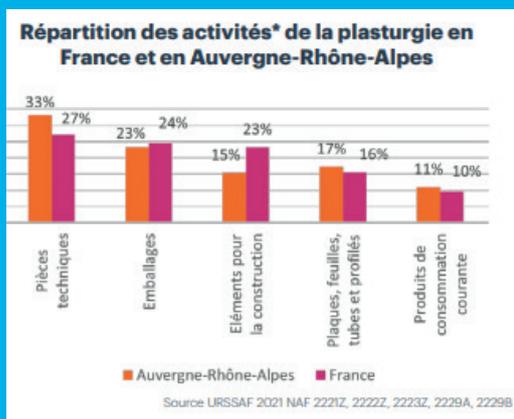
Pour finir, d'autres solutions émergent par la recherche nouvelles sources de production de plastique. L'entreprise allemande Covestro est, par exemple, à l'origine d'un procédé novateur de fabrication de polyuréthane remplaçant partiellement le pétrole par du CO₂ rejeté par des usines. Si actuellement l'incorporation de CO₂ ne peut dépasser 20% sans dénaturer le produit, l'entreprise développe des partenariats ambitieux pour atteindre la production d'un polyuréthane 100% d'origine non-fossile (dans l'Usine Nouvelle, Fenech, 2021).

13. Estimations communiquées par Plastics Europe en 2021 sur la base de prévisions fournies par ses membres.

Enjeu territorial / Grand Lyon et AURA

L'Auvergne-Rhône-Alpes se démarque comme 1^{ère} région de l'industrie de la plasturgie avec 1120 entreprises et 1 330 établissements implantés pour 23 000 salariés soit 22 % des effectifs nationaux.

Le secteur profite d'une structuration complète sur toute la chaîne de valeur de la filière. Plus de 50 % des acteurs exercent des activités de production et de distribution. La région se distingue par une forte dominante d'activités de fabrications de pièces techniques qui alimentent de nombreux secteurs comme l'automobile, la santé et l'aéronautique.



Avec une telle composition, la région est en tête des investissements et emplois créés entre 2017 et 2022. La filière a ainsi investi 500 millions d'euros et créé 860 nouveaux emplois. Les 3/4 de ces créations d'emplois se situent à Lyon, Bourgoin-Jallieu et Yonnax. Le projet Roussillon 2022, lauréat de plan de France Relance, vise à réduire la dépendance aux fournisseurs extra-européens par la modernisation d'une unité de siloxanes à Roussillon (38) et l'augmentation de sa capacité. Les siloxanes sont les éléments de base de la chimie des silicones, qui eux-mêmes sont des intrants importants aux industries médicales et à l'électrification des véhicules.

Yonnax (Plastic Vallée), les Sources de Loire et Lyon sont les trois secteurs phares de la plasturgie. Le territoire lyonnais représente 2 600 emplois, soit 11% des effectifs régionaux mais ne représente que 3% des emplois dans l'industrie locale.

Principales sources utilisées :

- AFP, 2022. « Crise du plastique : où en est la production sur la planète ? ». in La Dépêche. - <https://www.ladepeche.fr/2022/02/28/crise-du-plastique-ou-en-est-la-production-sur-la-planete-10139843.php#:~:text=Selon%20des%20estimations%20cit%C3%A9es%20en,%22acc%C3%A9l%C3%A9r%C3%A9e%20la%20crise%20climatique%22.>
- Althoff J., 2020. « Atlas du plastique : faits et chiffres sur le monde des polymères synthétiques ». En ligne. 58 pages. - https://fr.boell.org/sites/default/files/2020-03/Atlas%20du%20Plastique%20VF_0.pdf
- Colmet Daâge V., 2022. « Pour réhabiliter le plastique, l'industrie développe le recyclage chimique ». in Reporterre, mis en ligne le 15 février 2022. - <https://reporterre.net/Pour-rehabiliter-le-plastique-l-industrie-developpe-le-recyclage-chimique>
- Couto A., 2021. « Recyclage des plastiques : la voie chimique monte en puissance ». in L'Usine Nouvelle, mis en ligne le 23 novembre 2021. - <https://www.usinenouvelle.com/article/recyclage-des-plastiques-la-voie-chimique-monte-en-puissance.N1806147>
- Dalberg Advisors, WWF, 2021. « Plastics: the costs to society, the environment and the economy ». En ligne. 47 pages. - https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2021-09/20210906_Report_The-real-cost-of-plastic-pollution_EN_WWF.pdf
- Delavelle C., De Caebel B., 2015. « Recyclage chimique des déchets plastiques : situation et perspectives - État de l'art et avis d'experts ». En ligne. 9 pages. - https://record-net.org/storage/etudes/13-0242-1A/synthese/Synth_record13-0242_1A.pdf
- Delpont L., 2021. « Polyloop recycle le PVC au pied des usines de plastique ». in Les Échos, mis en ligne le 24 février 2021. - <https://www.lesechos.fr/pme-regions/innovateurs/polyloop-recycle-le-pvc-au-pied-des-usines-de-plastique-1292980>
- Desprets V., 2022. « Le plastique, l'atout bas carbone : la plasturgie, une industrie du futur engagée et responsable ». 62 pages.

- Donval C., 2022. «Panorama de la filière plasturgie et composites en Auvergne-Rhône-Alpes». Auvergne-Rhône-Alpes Entreprises. - <https://www.auvergnerhonealpes-entreprises.fr/blog/nos-publications-3/post/panorama-de-la-filiere-plasturgie-et-composites-en-auvergne-rhone-alpes-1740>
- Éco-mobilier, 2016. «Innovation & éco-conception en vue du recyclage – Le guide de la filière mobilier». 77 pages.
- Fenech Q., 2021. «Le chimiste allemand Covestro produit un précurseur du polyuréthane à partir de CO₂ plutôt que de pétrole». in L'Usine Nouvelle, mis en ligne le 21 juin 2021. - <https://www.usinenouvelle.com/article/le-chimiste-allemand-covestro-produit-un-precurseur-du-polyurethane-a-partir-de-co2-plutot-que-de-petrole.N1807857>
- IFP Energies nouvelles. s.d. «Tout savoir sur le recyclage du plastique». - <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/climat-environnement-et-economie-circulaire/tout-savoir-recyclage-du-plastique>
- La Dépêche, 2022. «Crise du plastique : où en est la production sur la planète ?». mis en ligne le 28 février 2022. - <https://www.ladepeche.fr/2022/02/28/crise-du-plastique-ou-en-est-la-production-sur-la-planete-10139843.php>
- La Tribune. «Emballages alimentaires : vers une adoption massive d'alternatives écoresponsables ?». mis en ligne le 13 décembre 2022. - <https://www.latribune.fr/supplement/emballages-alimentaires-vers-une-adoption-massive-d-alternatives-ecoresponsables-944407.html>
- Molga P., 2023. «Ardagh Metal Packaging investit à La Ciotat dans ses canettes aluminium». In Les Échos, mis en ligne le 30 janvier 2023. - <https://www.lesechos.fr/pme-regions/provence-alpes-cote-dazur/ardagh-metal-packaging-investit-a-la-ciotat-dans-ses-canettes-aluminium-1901861>
- OCDE, 2022. «Global plastics outlook : economic drivers, environmental impacts and policy options». 201 pages. - https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_de747aef-en
- OCDE, 2022. «Global plastic outlook : policy scenarios to 2060». 283 pages. - https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_aa1edf33-en
- Plastic Europe, Epro, 2021. «Plastic – the Facts 2021 : an analysis of European plastics production, demande and waste data». - <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>
- Plastic Europe, Epro, 2020. «Plastic – the Facts 2020 : an analysis of European plastics production, demande and waste data». - <https://plasticseurope.org/fr/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>
- Polyvia, 2021. «Perspective économique : les approvisionnements matières», mise en ligne le 22 novembre 2021. - <https://www.polyvia.fr/fr/economie/perspective-economique-les-approvisionnement-matieres>
- Polyvia, 2022. «Recyclage chimique : où en sommes-nous ?». 52 pages
- Raad M., 2022. «Pollution plastique : les "bioplastiques" sont-ils une alternative ?» in L'Info durable, mis en ligne le 2 février 2022. - <https://www.linfordurable.fr/environnement/pollution-plastique-les-bioplastiques-sont-ils-une-alternative-30654>
- Rousselle L., 2021. «Le plastique rêve d'un avenir biosourcé». in L'Usine Nouvelle, mis en ligne le 16 avril 2021. - <https://www.usinenouvelle.com/editorial/le-plastique-reve-d-un-avenir-biosource.N1076409>
- Saclier A., 2021. «Le bambou : l'alternative idéale au plastique ?». in L'Info Durable, mis en ligne le 13 octobre 2021. - <https://www.linfordurable.fr/conso/le-bambou-l-alternative-ideale-au-plastique-28513>
- Techno-science.net, Ingère-t-on vraiment l'équivalent d'une carte de crédit en microplastique chaque semaine ?» (2020, 26 août) - <https://www.techno-science.net/actualite/ingere-on-vraiment-equivalent-carte-credit-microplastique-chaque-semaine-N22285.html>
- The Sea Cleaners, 2020. «Plastiques, effet de serre, bilan carbone et réchauffement climatique», mise en ligne le 29 juin 2020. - <https://www.theseacleaners.org/fr/veille%2520scientifique/plastiques-effet-de-serre-bilan-carbone-et-rechauffement-climatique/#:~:text=Les%20%C3%A9missions%20cumul%C3%A9es%20de%20gaz,probl%C3%A8me%20va%20encore%20s'aggraver>
- Tisserand F., 2022. «Mâts et pales d'éoliennes : nouveau marché pour le bois». in Le Bois International, mis en ligne le 6 décembre 2022. - <https://www.leboisinternational.com/foret/gestion-forestiere/mats-et-pales-deoliennes-nouveau-marche-pour-le-bois-714333.php>



MÉTAUX



En résumé – Matériaux aux propriétés multiples, les métaux sont extraits de roches à travers différentes étapes et procédés (extraction minière, minéralurgie, métallurgie) ou pour certains d'entre eux à partir de déchets métalliques recyclés. Ces procédés sont très consommateurs en eau et en énergie et générateurs de contaminations diverses. La France est entièrement dépendante des importations pour ses approvisionnements en métaux, dont la production et la transformation sont pour la plupart d'entre-eux concentrées dans les mains de quelques pays et entreprises. La hausse des consommations, portée par les économies en développement et par les stratégies de décarbonation, laisse présager des tensions sur les approvisionnements que le recyclage ne saura réduire que partiellement. La baisse généralisée des teneurs dans les gisements devrait conduire à une augmentation des conséquences sociales et environnementales du secteur minier.



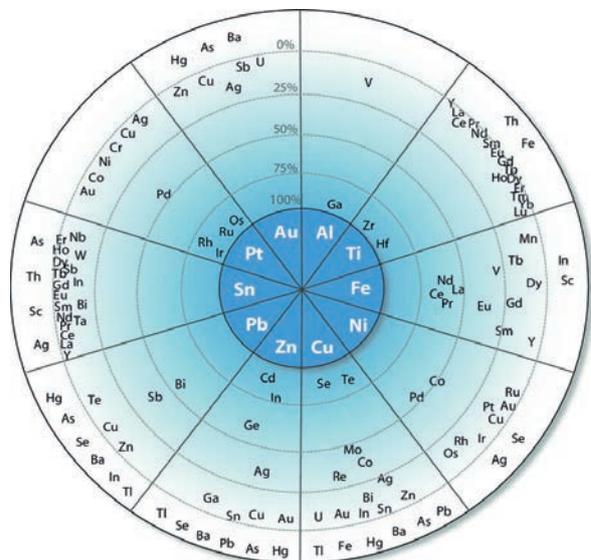
Définition et caractéristiques

Les métaux sont des matériaux dont les atomes sont unis par des liaisons métalliques. Il peut s'agir de corps simples ou d'alliages, dont les propriétés ne sont pas uniformes. Parmi les 110 éléments dont les propriétés chimiques ont été caractérisées, on dénombre 86 métaux.

C'est la nature électronique particulière d'une liaison métallique qui est responsable de plusieurs propriétés macroscopiques des métaux : le plus souvent, ils se caractérisent par une conductivité électrique et thermique élevée, une bonne malléabilité, une grande ductilité qui leur permettent de se déformer sans se briser, et des points de fusion et d'ébullition plus élevés que les non-métaux. Quelques métaux présentent également des propriétés magnétiques comme le ferromagnétisme, et certains sont résistants à la corrosion et à l'oxydation dans l'air humide. Les alliages permettent notamment d'améliorer leurs propriétés mécaniques en les rendant moins fragiles, plus durs, plus résistants à la corrosion. Ce sont ces propriétés remarquables qui rendent les métaux indispensables à de nombreux usages.

On peut trouver les métaux soit à l'état natif, c'est à dire à l'état de corps simples non combinés à d'autres éléments, soit plus généralement associé avec d'autres éléments (oxygène, soufre, carbone..) pour former des **minéraux** (oxydes, sulfures, carbonates...), eux-mêmes imbriqués avec d'autres minéraux pour former des **minerais**. Pour un métal exploité, d'autres métaux pourront ainsi être extraits conjointement comme **co-produits** ou **sous-produits** alors qu'il n'aurait pas été économiquement viable de les extraire en tant que produits principaux. Les substances métalliques et métalloïdes associées, se trouvant dans de plus faibles proportions, sont le plus souvent émises dans les rejets et les effluents (voir «Autres impacts environnementaux et sociétaux»).

Roue de la complémentarité des métaux
(Source : Science Advances, By-product metals are technologically)



Pour un métal exploité, il est possible d'évaluer les métaux « associés » les plus probables. Nassar et al. ont développé la roue de la complémentarité des métaux. Les principaux métaux exploités comme produit principal sont représentés au centre de la roue : aluminium (Al), titane (Ti), fer (Fe), nickel (Ni), cuivre (Cu), zinc (Zn), plomb (Pb), étain (Sn), platine (Pt) et or (Au). Plus un métal est proche du centre, plus il sera susceptible d'être récupéré comme co-produit ; plus il est proche de l'extérieur, plus il est probable qu'il soit rejeté dans les effluents et les déchets miniers. Les éléments dans la région blanche du cercle extérieur sont des éléments pour lesquels le pourcentage de leur production qui provient du métal principal indiqué n'a pas été déterminé.



Procédés de fabrication et principaux usages

Procédés de fabrication

La compréhension des procédés de production de métaux est nécessaire pour prendre la mesure des enjeux qui se posent.

• Extraction

Plusieurs techniques d'exploitation minière existent et peuvent être réparties en trois grandes catégories : **la mine à ciel ouvert**, la mine souterraine et la lixiviation in situ. Le choix de la technique est influencé par la géologie du corps minéralisé (nature, morphologie, profondeur, épaisseur, extension, etc.), l'occupation de la surface et la géographie du site, le savoir-faire et les objectifs économiques de l'exploitant.

L'exploitation d'une mine à ciel ouvert concerne l'exploitation de parties de gisement situées proches de la surface topographique (typiquement entre 0 et 400 m de profondeur). Elle consiste à exploiter le minerai depuis une excavation créée en surface après avoir enlevé la terre végétale, les roches et les niveaux stériles qui le surmontent. Pour cela, elle requiert généralement des engins de chantier de tailles considérables et peu communs aux autres secteurs de l'industrie (pelles, roues-pelles, draglines, tombereaux, foreuses). L'exploitation d'une **mine souterraine** consiste à exploiter le minerai depuis une excavation créée sous la surface du sol, en souterrain. Une percée est effectuée pour accéder au gisement et des travaux d'ossature doivent être mis en œuvre (rampes, descenderies, galeries, puits). Dans les deux cas, le minerai est extrait à l'aide d'explosifs ou de façons mécaniques (pelles qui extraient en continu les roches dans une mine à ciel ouvert ; scies, machines à attaque ponctuelle ou mineur continu pour une mine souterraine).

La lixiviation in situ est aujourd'hui presque uniquement utilisée pour l'extraction de l'uranium. L'association SystEx¹⁴ estime qu'avec la diminution des teneurs et de la raréfaction des gisements facilement exploitables, cette technique prendra une place croissante au sein de l'industrie minière dans les années à venir pour d'autres métaux, notamment le cuivre ou l'or pour lesquels des études et essais sont menés. Elle permet en effet d'exploiter des gisements à basse teneur, en faisant circuler une solution (de l'acide sulfurique ou du carbonate de soude, le plus souvent) à travers celui-ci pour dissoudre les métaux d'intérêt. Une solution chargée en métaux, appelée lixiviat, est récupérée via des puits collecteurs. Le lixiviat est ensuite acheminé vers une usine de traitement qui permet de récupérer la(les) substance(s) d'intérêt. L'exploitation se fait à des profondeurs importantes, atteignant souvent plusieurs centaines de mètres. Cette technique a une faible emprise en surface et ne donne lieu à aucune excavation, aucun dépôt de stériles et aucun dépôt de résidus miniers, mais présente un risque de contamination des eaux souterraines.

• Traitement du minerai

Même à une concentration intéressante, le minerai a rarement une pureté suffisante pour pouvoir être transformé directement en produits finis. Il est donc nécessaire de le traiter dans une usine dédiée, sur le site même de la mine ou bien délocalisée du site d'exploitation. Le traitement, long et complexe, suit un schéma de procédé bien défini et spécifique pour chaque type de minerai, mais on peut distinguer deux grandes étapes :

14. Voir la présentation : <https://www.systext.org/node/2>.

15. Le minerai de fer est préréduit en étant exposé à l'action réductrice d'un gaz (obtenu à partir de charbon ou gaz naturel) à haute température (plus de 900°C).

- La **minéralurgie** (ou concentration) consiste à séparer les différents minéraux contenus dans un minerai brut pour générer un concentré valorisable. Deux étapes se succèdent : la comminution (concassage et broyage du minerai afin de réduire sa granulométrie) et la concentration, qui consiste à séparer les minéraux en utilisant les différences qui existent entre leurs propriétés de surface physico-chimiques.
- La **métallurgie** (ou extraction chimique) consiste en la transformation de la matière première ou du concentré en produit fini, à plus haute valeur ajoutée : lingots, alliages, oxydes, sels, etc. Deux principales techniques existent, elles peuvent être mises en œuvre de manière indépendante ou complémentaire : la pyrométallurgie (permettant la séparation des métaux via une réaction d'oxydation après l'homogénéisation de la source de métal par grillage) et l'hydrométallurgie (permettant la séparation des métaux après leur mise en solution à l'aide d'un solvant).

Alliages et aciers

Un **alliage** est un mélange de plusieurs éléments chimiques, dont le principal constituant est un métal, appelé « métal de base » ou « base ». Les éléments ajoutés volontairement sont appelés « éléments d'alliage » ou « éléments d'addition » et les éléments non désirés sont appelés « impuretés ». Les éléments d'addition sont le plus souvent des métaux, mais peuvent également être d'autres éléments chimiques tels que le carbone ou le silicium. L'ajout d'éléments permet d'améliorer les propriétés d'un métal (propriétés mécaniques, résistance à la chaleur, résistance à la corrosion...) voire de lui conférer des nouvelles propriétés. Les alliages métalliques offrent une grande diversité. Il en existe des milliers différents, répondant à des usages plus ou moins spécifiques, et ayant généralement comme base le fer, le cuivre ou l'aluminium. Leurs propriétés varient selon leur composition et leur mode de production. Généralement on les classe en deux catégories : alliages ferreux et alliages non ferreux, les alliages ferreux les plus courants étant les alliages de fer et de carbone (fontes et aciers). Mais le fer peut également être allié à d'autres éléments tels que le chrome, le nickel ou d'autres.

Une **fonte** est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Elle se distingue par son excellente coulabilité. Un **acier** est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est comprise entre 0,02% et 2% en masse. Les aciers peuvent être classés selon de nombreux facteurs. Sur la base de la composition chimique, on peut distinguer :

- Les **aciers non alliés** : aciers pour lesquels les teneurs en un certain nombre d'éléments ne dépassent pas certaines valeurs limites fixées dans la norme NF EN 10020.
- Les **aciers inoxydables** : aciers alliés contenant au minimum 10,5% de chrome et au maximum 1,2% de carbone. Ils peuvent être subdivisés suivant leur teneur en nickel (inférieure ou supérieure ou égale à 2,5%) et leur caractéristique principale (résistance à la corrosion, résistance à l'oxydation à chaud, résistance au fluage).
- Les **autres aciers alliés**, qui peuvent être classés en aciers de qualité alliés et en aciers spéciaux alliés.

Les étapes principales de la fabrication de l'acier sont la métallurgie primaire (qui fournit l'acier en fusion), la métallurgie secondaire (où la composition du métal en fusion est ajustée), puis la coulée et sa transformation (par exemple, par laminage). Deux filières permettent la production d'acier en fusion :

- La **filière traditionnelle** mobilise des **hauts fourneaux** permettant de transformer le minerai de fer en fonte liquide, en brûlant du coke qui sert à la fois de combustible et d'agent réducteur. Le passage de la fonte dans un convertisseur permet ensuite d'éliminer les éléments indésirables afin d'obtenir l'acier à l'état liquide. À l'échelle mondiale, près de 70% de l'acier est issu de fonte produite au haut fourneau.
- La **filière électrique** permet de produire de l'acier en fusion à partir de minerai de fer préréduit¹⁵ ou à partir de ferraille (déchets de métaux ferreux) avec un four à arc électrique permettant de faire circuler du courant entre le matériau chargé et les électrodes.

• Principaux usages

À la fin du 19^e siècle, l'économie reposait sur l'exploitation de moins d'une dizaine de métaux. Aujourd'hui, elle en sollicite une soixantaine, que l'on retrouve dans une très grande diversité de produits : pièces forgées ou moulées utilisées dans les équipements industriels et les biens de consommation (automobiles, aéronautique et spatial, équipements mécaniques, construction et infrastructures, plomberie, bijoux...), câbles et composants électriques, composants électroniques, piles et batteries, aimants, pots catalytiques, cellules photovoltaïques, lampes, céramiques et verres, etc. Certains usages sont dispersifs : peintures, plastiques, pneus, tissus, produits chimiques, produits d'hygiène et cosmétiques.

L'augmentation du nombre de métaux utilisés a notamment été portée par la microélectronique et les technologies numériques. Le téléphone portable comportait une trentaine de métaux, le smartphone en requiert aujourd'hui plus de cinquante. Les besoins pour les technologies numériques ne représentent pas une grande proportion par rapport au volume de métaux produits pour l'ensemble des secteurs. Cependant, pour certains métaux, elles en sont le premier débouché, comme pour le **tantale** (condensateur et semi-conducteurs), l'**indium** (films minces d'ITO pour écran LCD) et le **gallium** (semi-conducteurs).

• **Production et utilisations**

<p>Acier</p>	<p><u>Production métallurgique</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Production mondiale en 2021 : 1951 Mt • Production UE en 2021 : 158,8 Mt <p><u>Formes ou secteurs d'utilisations</u> (Union Européenne, 2021) : construction 37% ; automobile 16% ; équipements mécaniques et électriques 15% ; objets métalliques 14% ; tubes 12% ; appareils ménagers 2%, autres transports 2%.</p>
<p>Aluminium</p>	<p><u>Production de bauxite</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Production mondiale en 2021 : 390 Mt • Production UE en 2021 : 5,5Mt • Principaux pays producteurs : Australie, Chine, Brésil <p><u>Production d'aluminium primaire</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Production mondiale en 2021 : 68 Mt • Production UE en 2019 : 2,3 Mt <p><u>Formes ou secteurs d'utilisations</u> (monde, 2020) : construction 25% ; équipements 11% ; transports 23% ; feuilles d'aluminium 9% ; électricité 12% ; emballages 8%</p>
<p>Cuivre</p>	<p><u>Production minière</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Production mondiale en 2021 : 21 Mt • Production UE en 2021 : 818 000 t (Pologne, Espagne, Bulgarie, Suède, Portugal...) • Principaux pays producteurs : Chili, Pérou, Chine <p><u>Production métallurgique</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Production mondiale en 2021 : 24,8Mt de cuivre raffiné • Production UE en 2021 : 2,7Mt, dont 17% de production secondaire (Allemagne, Pologne, Espagne, Belgique...). • Principaux pays producteurs : Chine, dans une moindre mesure Chili, Japon <p><u>Formes ou secteurs d'utilisations</u> (monde, 2020) : câbles 60% ; feuilles 17% ; barres 12% ; tubes</p> <p><u>Industries françaises aval dépendantes de cette matière première</u> : toutes industries utilisant de l'électricité ; tous fabricants de matériels produisant ou utilisant de l'électricité ; plomberie.</p>
<p>Nickel</p>	<p><u>Production minière</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Production mondiale en 2021 : 2,7 Mt • Production UE en 2019 : 54 000 t (Finlande et Grèce) • Production en Nouvelle-Calédonie : 186 000 t • Principaux pays producteurs : Indonésie, Philippines, Russie <p><u>Production métallurgique</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Production mondiale primaire en 2021 : 2,7 Mt • Production primaire UE en 2019 : 71 800 t (Finlande et France) • Production française : l'usine de Sandouville (76) de Eramet produit du nickel et des sels de nickel avec : 6 730 t de cathodes de nickel et 2 125 t de Ni contenu dans des sels. • Production en Nouvelle-Calédonie : 73 413 t • Principaux pays producteurs : Chine, Indonésie, Japon <p><u>Formes ou secteurs d'utilisations</u> (monde, 2021) : aciers inoxydables 69% ; batteries 12% ; alliages de nickel 7% ; aciers alliés et fonderie : 5% ; galvanoplastie 5% ; autres 2%</p> <p><u>Industries françaises aval dépendantes de cette matière première</u> : tous utilisateurs de superalliages (aéronautique, défense, spatial, turbines à gaz) ; tous utilisateurs d'inox (nucléaire, industries chimique et pétrochimique, ferroviaire, navale, automobile, bâtiment, ascenseurs, escalators, électroménager et ustensiles de cuisine, équipements agroalimentaires et restauration ; et en aval, les industries agroalimentaires et la restauration ; batteries ; etc.).</p>

Dans les années et décennies à venir, le développement des véhicules électriques et des batteries de stockage et l'expansion des réseaux d'électricité, portée par l'augmentation de la demande d'électricité et une part beaucoup plus importante d'énergie éolienne et photovoltaïque, contribueront très largement à l'intensification de la demande en métaux.

- **Les véhicules électriques** utilisent environ six fois plus de minéraux que les véhicules conventionnels, (hors châssis et carrosserie). Ceux-ci se trouvent essentiellement dans deux composants : les moteurs électriques et les batteries. Les moteurs synchrones à aimants permanents, au meilleur rendement, nécessitent des terres rares, dont du néodyme, du cuivre, du fer et du bore. Les moteurs à induction asynchrones sont moins coûteux mais moins efficaces, ils ne nécessitent pas de terres rares mais une quantité plus importante de cuivre pour la cage du rotor et le stator en cuivre.
- **Les batteries lithium-ion**¹⁶, unique technologie utilisée aujourd'hui pour les batteries de véhicules électriques, contiennent un certain nombre de minéraux dans le matériau actif de la cathode, dans celui de l'anode (du graphite¹⁷) et dans le collecteur de courant (généralement du cuivre). Elles sont souvent classées en fonction de la composition chimique de la cathode : LCO (lithium et oxydes de cobalt), LMO (lithium et oxydes de manganèse), LFP (lithium et phosphate de fer), NMC (nickel-manganèse-cobalt), NCA (nickel-cobalt-aluminium). Les besoins en chaque minéral varient ainsi en fonction de la chimie de la cathode. Les autres modules et composants de la batterie sont principalement constitués d'aluminium, d'acier, de liquides de refroidissement et de pièces électroniques.
- **Les centrales solaires photovoltaïques** sont principalement composées de modules, d'onduleurs, de tracker solaires, de structures de montage et de composants électriques généraux. Les différences d'intensité minérale proviennent principalement des différences entre les types de modules. Les modules en silicium cristallin (c-Si) constituent la technologie photovoltaïque dominante, suivis par les cellules solaires en couches minces. Les installations photovoltaïques distribuées ont tendance à être équipées d'onduleurs de chaîne ou de micro-onduleurs, ce qui nécessite environ 40% de cuivre en plus que les projets à l'échelle du réseau, qui utilisent généralement des onduleurs centraux.
- **Les éoliennes** se composent d'une tour, d'une nacelle et de rotors érigés sur une fondation et nécessitent pour cela du béton, de l'acier, du fer, de la fibre de verre, des polymères, de l'aluminium, du cuivre, du zinc et pour certaines des terres rares. Les intensités minérales dépendent de la taille de l'éolienne et de son type. Le marché de l'éolien terrestre est actuellement dominé par les générateurs synchrones à aimant permanent (GB-DFIG), qui représentent plus de 70% du marché mondial. Les générateurs synchrones à aimant permanent à entraînement direct (DD-PMSG), contenant des terres rares, ont doublé leur part de marché au cours des dix dernières années, passant d'environ 10% en 2010 à 20% en 2020, principalement en offshore, en raison de leurs caractéristiques plus légères et plus efficaces, ainsi que de leurs coûts de maintenance réduits.

Les terres rares

Les terres rares sont un groupe de 17 métaux qui possèdent des propriétés physiques qui les rendent indispensables dans de nombreuses applications industrielles. Elles sont assez médiatisées de par la dépendance mondiale vis-à-vis de la Chine qui possède un quasi-monopole sur leur production et leur rôle dans la guerre commerciale sino-américaine. Ce quasi-monopole n'est pas tant lié à la répartition des ressources qu'à une question de législation environnementale. Relativement abondantes dans l'écorce terrestre, leurs gisements sont en revanche généralement peu concentrés. Il est ainsi peu commun de trouver des gisements d'utilité commerciale. Ayant des propriétés chimiques très voisines, les différentes terres rares se trouvent mélangées dans un même minerai, et le traitement pour extraire les métaux est ainsi particulièrement long, énergivore et polluant.

16. Une batterie lithium-ion est un assemblage de plusieurs cellules intégrées en module et ce module est lui-même intégré en pack. C'est ce pack couplé à un BMS « Battery Management System » qui est inséré dans la batterie. Une cellule est constituée de quatre blocs : une cathode, une anode, un séparateur et un électrolyte.

17. Le graphite est l'une des formes cristallines de l'élément carbone. Il peut être naturel ou élaboré industriellement.



Tendances, disponibilité et dépendances

Les métaux dans la transition énergétique

Dans une étude publiée en 2021, l'IEA évalue les besoins en minéraux (hors acier et aluminium) pour différentes technologies dites « décarbonées » en fonction de plusieurs scénarios. Un constat général est que la construction de centrales solaires photovoltaïques, de parcs éoliens et de véhicules électriques nécessite plus de minéraux que leurs équivalents utilisant des combustibles fossiles. Le type et le volume des besoins en minéraux varient ensuite considérablement d'une technologie à l'autre, et même au sein d'une même technologie (notamment des technologies des turbines éoliennes et des batteries des véhicules électriques).

Le lithium, le nickel, le cobalt, le manganèse et le graphite sont essentiels aux performances, à la longévité et à la densité énergétique des batteries. Les terres rares sont essentielles aux aimants permanents, indispensables à certaines éoliennes et aux moteurs des véhicules électriques. Les réseaux électriques ont besoin d'une très grande quantité de cuivre et d'aluminium, le cuivre étant la pierre angulaire de toutes les technologies liées à l'électricité.

L'IAE a évalué la demande globale en minéraux à l'aide de quatre variables principales : les tendances du déploiement des technologies « décarbonées » selon différents scénarios ; les parts des sous-technologies dans chaque domaine technologique ; l'intensité minérale de chaque sous-technologie ; et les améliorations de l'intensité minérale. La demande des autres secteurs industriels a également été prise en compte, afin d'estimer la contribution des technologies d'énergie propre à la demande globale et de mieux évaluer les enjeux liés à l'offre.

Dans les deux principaux scénarios (« tendanciel » et « durable »), la part des technologies « décarbonées » dans la demande totale augmentent considérablement. Dans le scénario « durable » elle atteint en 2040 plus de 40 % pour le cuivre et les éléments de terres rares, 60 à 70 % pour le nickel et le cobalt, et près de 90 % pour le lithium. Les demandes en cuivre et en nickel sont relativement corrélées au développement économique matériel global (construction, infrastructures, équipements) et vont ainsi continuer à croître, avec une part grandissante venant des technologies « décarbonées ».

Il faut noter que la demande en minéraux des technologies « décarbonées » est sujette à de grandes incertitudes technologiques et politiques. La plus grande source de variabilité de la demande provient de l'incertitude quant à la rigueur des politiques climatiques.

Perspectives d'approvisionnement et risques

L'étude de l'IEA évalue que les plans actuels d'approvisionnement et d'investissement sont suffisants pour soutenir la trajectoire du scénario « tendanciel », mais pas celle du scénario « durable ». Certains minéraux, comme le lithium et le cobalt, devraient être excédentaires à court terme, tandis que l'hydroxyde de lithium, le nickel de qualité batterie et certaines terres rares (par exemple, le néodyme et le dysprosium) pourraient être confrontés à une offre limitée dans les années à venir. Toutefois, à moyen terme, la demande prévue dépasse l'offre attendue des mines existantes et des projets en construction pour la plupart des minéraux, ce qui signifie que d'importants investissements supplémentaires seraient nécessaires pour soutenir la croissance de la demande. Les risques de retards ou de coûts plus élevés des transitions énergétiques sont réels.

Les risques sont principalement liés à la concentration géographique de la production, au décalage entre le rythme de l'évolution de la demande, aux effets de la baisse de qualité des ressources, aux conséquences sociales et écologiques de la production minière et à l'exposition aux risques climatiques.

► Forte concentration géographique de la production

La production de nombreux minéraux nécessaires à la transition énergétique est plus concentrée que celle du pétrole ou du gaz naturel. Une situation qui ne devrait pas changer à court terme selon l'IEA :

- 70 % du cobalt a été produit en République démocratique du Congo (RDC) en 2019. La RDC étant très instable politiquement, le risque est notamment géopolitique.

- 60% des terres rares ont été produites en Chine en 2019.
- 87% du lithium a été produit en Australie, Chili et Argentine en 2018.

Le niveau de concentration est encore plus élevé pour les opérations de transformation, où la Chine est très présente dans tous les domaines. La part de la Chine dans le raffinage est d'environ 35% pour le nickel, 40% pour le cuivre, de 50 à 70% pour le lithium et le cobalt, et de près de 90% pour les terres rares. Les entreprises chinoises ont également réalisé d'importants investissements dans des actifs en Australie, au Chili, en RDC et en Indonésie.

Ces niveaux élevés de concentration, combinés à des chaînes d'approvisionnement complexes, augmentent les risques qui pourraient découler de perturbations physiques (par exemple, tremblement de terre, tsunami, ou inondation) ou d'événements réglementaires et géopolitiques (interdiction d'exportation, coup d'État...) dans les pays producteurs peuvent avoir un impact important sur la disponibilité des minéraux et, par conséquent, sur les prix.

► Longs délais de développement des projets

Les délais d'exécution des projets exacerbent le risque d'un décalage entre la demande et la capacité de l'industrie à lancer de nouveaux projets. L'IAE a analysé que pour les principales mines mises en service entre 2010 et 2019, il a fallu 16,5 ans en moyenne pour développer des projets, de la découverte à la première production (la durée exacte varie selon le minéral, l'emplacement et le type de mine). En moyenne, il a fallu plus de 12 ans pour réaliser les études d'exploration et de faisabilité, et 4 à 5 ans pour la phase de construction. Ces délais soulèvent des questions quant à la capacité de l'offre à augmenter la production si la demande devait augmenter rapidement.

► Baisse de la qualité des ressources

Les préoccupations relatives aux ressources concernent la qualité plutôt que la quantité. Les gisements exploités de l'Antiquité au 19^e siècle ont été les plus riches et les plus accessibles. Leur épuisement a ensuite conduit à se tourner vers des gisements à beaucoup plus faible teneur. Des innovations ont permis à l'industrie de s'intéresser à des cibles de plus en plus larges et l'augmentation de la taille des matériels de production a contribué à l'exploitation de mines plus grandes. L'amélioration technologique a ainsi permis de remplacer les ressources de haute qualité épuisées par des ressources de moins bonne qualité mais plus abondantes et donc d'augmenter les réserves. Par exemple, la limite d'une quarantaine d'années d'exploitation [pour le cuivre](#) est restée pratiquement inchangée depuis les années 50, alors que la teneur moyenne du minerai de cuivre au Chili a considérablement diminué, de 30% au cours des 15 dernières années.

Pour autant, il se pourrait que ces tendances soient remises en question pour l'avenir : la baisse de concentration des gisements au cours du temps induit une croissance exponentielle de l'énergie de production, qui ne pourra pas toujours être compensée par l'amélioration technologique (voir décarbonation).

► Exposition accrue aux risques climatiques

Le cuivre et le lithium sont particulièrement vulnérables au stress hydrique en raison de leurs besoins élevés en eau. Plus de 50% de la production actuelle de lithium et de cuivre est concentrée dans des régions où les niveaux de stress hydrique sont élevés. 70% des exploitations minières des six principales compagnies minières dans le monde sont localisées dans des pays où il existe une pénurie d'eau (Bourbon, 2014). Et la part des mines situées dans des zones à fort stress hydrique est appelée à augmenter au fil du temps du fait du changement climatique. Par ailleurs, les inondations, amenées à être plus fréquentes, peuvent entraîner le déversement de déchets dangereux provenant de sites miniers ou de stockage de déchets, ainsi que la rupture de digues de résidus, avec des dommages environnementaux extrêmement importants (voir Autres impacts environnementaux et sociétaux).

La liste des matières premières critiques établie par la Commission européenne indique pour chacune des matières premières considérées les principaux pays fournisseurs de l'UE, la dépendance à l'égard des importations, le taux de recyclage en fin de vie et les usages principaux.

La [liste des matières premières critiques](#) établie par la Commission européenne indique pour chacune des matières premières considérées les principaux pays fournisseurs de l'UE, la dépendance à l'égard des importations, le taux de recyclage en fin de vie et les usages principaux.



Circularité et recyclage

Les **métaux de base** sont généralement utilisés sous forme d'alliages, faisant intervenir des métaux d'ajout entrant en variété et en quantité plus ou moins importante dans leur composition. Ces alliages peuvent être triés par nature pour être recyclés séparément et en garder toute la valeur (exemple : acier inoxydable à plus de 10,5% de chrome) ou ne pas être triés et ainsi donner un mélange qui sera utilisé dans des usages à faibles contraintes (recyclage non fonctionnel).

Les **métaux de spécialité**, quand ils ne sont pas utilisés dans des alliages, peuvent être recyclés, notamment à partir de déchets électriques et électroniques. Pour cela, des procédés associant généralement pyrométallurgie et hydrométallurgie sont nécessaires, dans des installations requérant un fort investissement et un savoir-faire.

La **réduction de la consommation énergétique** est l'un des principaux avantages du recyclage par rapport à la production primaire. En effet, pour plusieurs métaux, les économies d'énergie peuvent aller de 60 à 90% (UNEP, 2013). Certains chiffres sont cependant discutés, le gain énergétique permis par le recyclage de l'aluminium, estimé à 95%, ne prendrait pas en compte la mise en place de toute la chaîne de valeur liée au recyclage et serait en réalité de l'ordre de 70%. Judith Pigneur (2021) note que ces réductions concernent essentiellement les grands métaux industriels. Beaucoup de petits métaux utilisés en petite quantité dans les alliages et dans les applications électroniques requièrent en revanche une énergie pouvant être séparés significativement plus grande que celle des productions minières.

Le développement du recyclage de ces métaux de spécialité peut être limité par différents facteurs. La diversité des produits et des composants complexifie le montage de lignes de recyclage adaptées et leur massification, d'autant plus que les courtes durées de vie technologique de certains produits peuvent rendre obsolète un modèle de recyclage auparavant pertinent. Ceci peut freiner la mise en place de circuits logistiques lourds et l'engagement d'investissements industriels onéreux. Par ailleurs, les concentrations en métaux dans les produits ne sont pas toujours avantageuses par rapport à la mine classique, et insuffisantes pour que des économies d'échelle puissent être envisagées. Des études ont pu montrer que la réduction des quantités de métaux présents dans les produits électroniques et les panneaux photovoltaïques avait rendu moins attractif leur recyclage.

Le **recyclage des cartes électroniques** ne pourrait être rendu possible en France, selon un rapport du Conseil Général de l'Économie et un rapport sénatorial, que par « une rupture technologique, car il n'est pas possible d'être compétitif avec un procédé de fonderie classique (trop grosse économie d'échelle et avance en maîtrise technologique des fonderies existantes) ». Ainsi, « il semble plus opportun et pragmatique de concentrer les développements français sur certaines activités, comme le désassemblage, la production de concentrés et le traitement final ciblé sur certaines matières rares ou critiques ». Le rapport du Conseil Général de l'Économie note également que les 9 grandes entreprises qui structurent le marché mondial du recyclage¹⁸ (...) s'intéressent principalement aux métaux les plus présents dans les cartes électroniques, comme le cuivre. De nombreux métaux critiques (ex. : le tantale et l'étain) ne sont pas récupérés compte tenu des difficultés technologiques (dues à la présence concomitante de plastiques, métaux antagonistes, halogènes, céramiques et verre) et des coûts afférents à ces technologies et à leur adaptation pour tenir compte de l'évolution très rapide des produits ».

18. Dont 3 en Europe (*Boliden* en Suède, *Umicore* en Belgique et *Aurubis* en Allemagne), 1 au Canada (*Xtrata*), 1 en Corée et 4 au Japon.

Dans un objectif de réduction de la consommation de matières premières primaires, l'utilité du recyclage est très relative. Jean-François Labbé (2016) donne l'exemple d'une substance dont la consommation augmente de 3% par an, dont la durée moyenne d'immobilisation est de 10 ans¹⁹ et dont le taux de recyclage²⁰ est de 80%. La production primaire nécessaire, en plus du recyclage, pour satisfaire la demande, restera de 40,5% de cette demande et atteindra le même niveau qu'elle aurait eu sans recyclage 31 ans plus tard. **Pour un métal dont la demande est croissante, la production minière doit suivre la même croissance, quel que soit le taux de recyclage de ce métal.** L'approvisionnement secondaire étant différé dans le temps, il restera toujours inférieur aux besoins.



Décarbonation

Consommation énergétique et décarbonation

La production de ressources minérales est particulièrement énergivore. Il a été estimé que 10,5% de la production mondiale d'énergie primaire est consommée par le secteur des métaux, pour leur extraction et pour leur production (dont 6,5% pour l'acier et 1,8% pour l'aluminium, Fizaine et Court 2015). Cette énergie varie grandement suivant le type de mine, la concentration du minerai, la profondeur, la pureté, le procédé de traitement et de raffinage. Un rapport réalisé par la société australienne Engeco rapporte que la consommation d'énergie finale moyenne d'un site dont la production est traitée par hydrométallurgie (et non pyrométallurgie), est répartie comme suit :

- diesel dans les équipements mobiles : 46%
- électricité pour la comminution (concassage et broyage) : 25%
- électricité pour la ventilation des mines souterraines : 15%
- autres utilisations d'électricité 14%.

Certaines exploitations en bord de mer et en région aride, tel qu'au Chili, utilisent également une part importante d'énergie afin de dessaler de l'eau de mer.

Afin de réduire ses émissions de gaz à effets de serre, l'industrie minière mise sur le déploiement de véhicules et équipements électriques ou hybrides et l'alimentation en énergies renouvelables des sites.

Impact de la baisse de la qualité des ressources sur la consommation énergétique

Selon Olivier Vidal (2019), différents travaux indiquent que l'énergie de production des métaux et leur prix à long terme varient en loi puissance de leur dilution (inverse de la concentration) dans les minerais exploités. Ceci signifie qu'à technologie constante, la baisse de concentration des gisements au cours du temps induit une croissance exponentielle de l'énergie de production. Néanmoins, jusqu'à présent, l'amélioration de la productivité et de l'efficacité énergétique de production ont permis un gain énergétique supérieur à la perte due à la baisse de concentration des minerais. La viabilité économique du traitement d'un matériau à teneur décroissante dépend donc de l'amélioration continue de l'efficacité des technologies minières ou bien des économies d'échelle qui peuvent être réalisées. Olivier Vidal explique qu'il doit arriver cependant un moment où le gain ne compense plus la perte, impliquant l'augmentation du prix de la ressource naturelle. En effet, il existe une limite thermodynamique, qui fixe une valeur minimale de l'énergie qui ne pourra être franchie, quelle que soit l'amélioration technologique, donnée par les valeurs d'énergie de broyage, de séparation et de raffinage. Olivier Vidal estime que la disponibilité des métaux pourrait être compromise dans un futur proche par le coût prohibitif de leur extraction, car la quantité d'énergie nécessaire à leur production deviendrait trop importante.

19. Les temps de séjour d'un métal dans les produits et les infrastructures en cours d'utilisation sont très variables selon les métaux et selon les usages. Plusieurs dizaines d'années pour les métaux utilisés dans le bâtiment et les infrastructures publiques ou collectives (acier, aluminium, cuivre, zinc), une vingtaine pour les composants des panneaux solaires, une dizaine d'années pour les métaux des véhicules et des écrans plats, quelques années pour les appareils portables en moyenne renouvelés plus fréquemment, de quelques semaines ou mois pour le fer des boîtes de conserve et l'aluminium des cannettes de boisson.

20. Plusieurs indicateurs permettent d'appréhender le recyclage : le taux de collecte, le taux d'efficacité du recyclage, le taux de recyclage en fin de vie des éléments et le taux d'incorporation de matière recyclée dans les produits.



Autres impacts environnementaux et sociétaux

Déchets et effluents miniers

À chacune des étapes de production, l'industrie minière génère des déchets et des effluents :

- eaux minières et stériles miniers lors de l'étape d'exploitation,
- résidus miniers lors de l'étape de minéralurgie,
- poussières et fumées lors de l'étape de métallurgie.

Les **stériles** sont les roches extraites pour accéder au minerai, ils contiennent généralement les minéraux des zones minéralisées, mais dans de plus faibles concentrations. Les résidus sont les rejets générés à chaque étape de traitement du minerai. Les teneurs en métaux d'intérêt étant très faibles dans le minerai, la quantité de résidu générée correspond quasi intégralement à la quantité extraite. Ces déchets peuvent être stockés dans des installations en surface (dépôts gravitaires, parcs à résidus ou bassins), servir à remblayer les vides miniers ou être déversés en milieux aquatiques (mer, rivière ou lac). Dans le monde, la surface totale recouverte de déchets miniers serait équivalente à près de deux fois la surface de la France métropolitaine.

Étant donné le coût des installations et de leur maintenance, les risques financiers ou réputationnels en cas d'accident et les potentiels conflits d'usage avec les populations locales, les exploitants peuvent faire le choix de **déverser les résidus miniers en milieux aquatiques**, le plus souvent sans traitement préalable. C'est une pratique répandue, notamment mise en œuvre au Canada, au Groenland, en Indonésie, en Norvège et en Papouasie-Nouvelle-Guinée. En 2012, au moins dix des vingt compagnies minières membres de l'International Council on Mining and Metals (ICMM), regroupant les plus gros industriels miniers mondiaux, avaient recours à des déversements ou prévoyaient d'en faire usage.

Dégradation des ressources hydriques et des sols

L'eau est un enjeu majeur des activités minières. D'une part, de par l'importance des **besoins en eau** des sites miniers, qui peuvent entrer en concurrence avec d'autres usages, dont les besoins quotidiens des populations locales et l'agriculture. Ce qui peut provoquer de fortes tensions, notamment pour les nombreux gisements situés dans des zones soumises à un stress hydrique : 70 % des exploitations minières des six principales compagnies minières dans le monde sont localisées dans des pays où il existe une pénurie d'eau.

Ensuite, parce que **la qualité des eaux est dégradée** à travers différents mécanismes :

- la génération de volumes conséquents d'eaux minières via l'exhaure²¹,
- le ruissellement et l'infiltration des eaux au niveau des dépôts de stériles miniers,
- le ruissellement, l'infiltration et le débordement des eaux au niveau des parcs à résidus miniers,
- les déversements accidentels de déchets et de produits chimiques,
- les ruptures de digues minières (l'accident minier affectant l'environnement le plus courant, survenant souvent des années après l'arrêt de la production minière, lorsque l'entretien fait défaut),
- les déversements volontaires dans les rivières, les lacs et les mers,
- le détournement des cours d'eau vers la fosse et sa conversion en lac toxique.

21. L'exhaure correspond au pompage de l'eau dans les exploitations souterraines afin d'éviter l'engorgement naturel de la mine dû à la présence d'eau souterraine. Un tel pompage peut également avoir lieu après la cessation de l'activité afin d'éviter les affaissements miniers facilités par l'engorgement. Ces interventions perturbent les écoulements des années, voire des siècles après la fermeture. Sans traitement, le rejet de ces eaux dans le milieu naturel peut engendrer des pollutions importantes, il est donc nécessaire de mettre en place des traitements adaptés à chaque cas.

Selon l'Agence de protection environnementale américaine (US EPA), la contamination des eaux par l'activité minière représente l'une des trois plus importantes menaces pour la sécurité écologique au monde. Le rabattement des nappes phréatiques et le lessivage des déchets et le phénomène de drainage minier acide peuvent affecter les puits, qui sont des sources d'eau potable pour des millions de personnes dans le monde ainsi que des sources d'approvisionnement pour l'agriculture. À titre d'exemple, les 40 mines en activité aux États-Unis génèreraient à elles seules environ 80 milliards de litres d'eau contaminée par an. Ces pollutions peuvent persister sur des centaines voire des milliers d'années.

Autre enjeu, les résidus miniers peuvent présenter des concentrations en métaux et métalloïdes très élevées qui, lorsqu'ils sont lessivés par la pluie, viennent dégrader la qualité des sols et des eaux. De plus, lorsque les gisements contiennent des sulfures (c'est le cas pour un certain nombre de grands métaux industriels), il peut se produire un **drainage minier acide** (DMA), c'est à dire la formation d'acide sulfurique lorsque les sulfures s'oxydent au contact de l'air et de l'eau. Cette oxydation est d'autant plus favorisée que la granulométrie des résidus est fine. C'est un problème très courant, identifié comme un enjeu majeur de la gestion environnementale des sites miniers (Pigneur, 2021).

Échelles temporelles et géographiques

Les conséquences des activités minières s'étendent sur des échelles temporelles et géographiques extrêmement importantes :

- Les métaux et les métalloïdes ne peuvent pas être décomposés et ne sont pas biodégradables, ils sont persistants dans l'environnement des centaines à des milliers d'années. Des chercheurs ont montré que les pollutions liées à une rupture de parc à résidus (à Mount Polley, Canada) pourraient perdurer des milliers d'années dans les sols et les sédiments.
- L'emprise territoriale est bien supérieure à l'emprise stricte des activités de production métalliques. Les contaminations peuvent s'étendre de plusieurs (centaines de) kilomètres autour du site, lorsque des cours d'eau sont affectés.
- Le déploiement d'infrastructures routières, ferroviaires ou maritimes de très grande taille, souvent sur des centaines de kilomètres pour acheminer le minerai vers les usines de traitement lorsqu'il n'est pas traité sur place, puis vers les usines de transformation manufacturières, ainsi que l'implantation d'autres industries implantées pour subvenir aux besoins de la mine ont aussi un impact fort, notamment sur la biodiversité.

Michel Deshaies²² indique que «le coût de la réhabilitation de ces héritages miniers [mines de minerais métallifères] est toujours très élevé et peut dépasser largement les capacités financières d'une compagnie minière, ou alors celle-ci peut se déclarer en faillite afin d'échapper à ses obligations de réhabilitation. [...] En fait, pour beaucoup de mines actuellement en activité, les coûts de la réhabilitation risquent d'être bien supérieurs à ce qu'aura rapporté l'exploitation minière et c'est ce qui compromet beaucoup la possibilité de [réhabiliter] sans intervention de la puissance publique». Cependant les États négligeraient souvent cette problématique et la plupart des sites abandonnés ou orphelins n'auraient jamais fait l'objet de travaux de mise en sécurité ou de réhabilitation. Des législations imposant des plans de gestion de l'après-mine et des garanties financières ont pu être mises en place, mais le montant des garanties financières serait quasi-systématiquement sous-estimé. Une commission d'enquête sénatoriale rapporte qu'en France, «en dépit de son impact majeur sur la santé des populations et l'environnement, la pollution des sols d'origine industrielle et minière constitue toutefois un enjeu mal mesuré et insuffisamment pris en compte dans notre législation» (Jourda, 2019).

22. M. Deshaies, « Les territoires miniers - Exploitation et reconquête », 2007. Cité par *SystExt*.

Enjeu sociaux

À l'échelle mondiale, l'industrie minière est le secteur responsable du plus grand nombre de **conflits socio-environnementaux**, de par les phénomènes d'expropriation et d'accaparement des terres souvent à l'œuvre ainsi que par la destruction et ou la contamination des milieux de vie. Les peuples autochtones sont particulièrement affectés par des violations de droits humains et leur survie est menacée dans certaines régions du monde.

Les **effets sanitaires** associées aux pollutions peuvent être graves (notamment cancers colorectaux, de la vessie, des poumons et du système digestif), avec parfois des problématiques épidémiologiques d'échelle régionale.

L'OIT indique que « dans la plupart des pays, l'exploitation minière reste la **profession la plus dangereuse** si l'on tient compte du nombre de personnes exposées au risque ». De plus de nombreux accidents mortels ne sont pas pris en compte dans les statistiques internationales.

Les activités minières contemporaines produisent une **recomposition du tissu social**. L'afflux de travailleurs pour la construction des infrastructures, de personnel qualifié pour l'exploitation et le traitement du minerai, et de travailleurs permettant la vie du personnel (restauration, transport, services publics, loisirs, etc.) engendre une forte augmentation de la pression foncière et une augmentation du coût de la vie (notamment à cause des écarts salariaux). Elle engendre aussi une masculinisation des zones concernées, avec le développement de violence envers les femmes.

Les données de la Banque mondiale dressent un **bilan économique et social** globalement négatif de l'industrie minières : elles montrent que l'activité minière à l'échelle nationale n'est pas un facteur de réduction de la pauvreté, mais plutôt d'augmentation des inégalités de revenus (Pigneur, 2019). Au niveau territorial, l'activité minière peut être un facteur d'accroissement des revenus à court terme mais est un facteur d'appauvrissement sur le long terme, les bénéfices socio-économiques prenant fin au moment de la fermeture du site. À une échelle macroéconomique, l'exploitation de ressources minières conduit à un déséquilibre intersectoriel et à une surévaluation du taux de change se traduisant in fine par la réduction de la compétitivité des autres entreprises exportatrices (Aknin, 2021). Au niveau géopolitique, l'abondance en ressources s'est traduite dans plusieurs pays par une diffusion de la **corruption** ou des **conflits**. C'est particulièrement le cas du coltan, le minerai contenant le tantale, métal qui a rendu possible la miniaturisation des équipements numériques. Ce minerai a été un facteur clé dans « grande guerre d'Afrique » (1998-2003), qui a constitué le plus important conflit interétatique de l'histoire de l'Afrique contemporaine – avec plus trois millions de morts et un million de déplacés au total - et alimente encore aujourd'hui des luttes armées dans la région du Kivu en République Démocratique du Congo.



Substituabilité et alternatives

Substitution

Graedel et al. ont étudié l'ensemble des substituts pour 62 éléments dans plus de 80% de leurs débouchés en masse : certains métaux sont globalement substituables (aluminium, zinc) tandis que d'autres le sont beaucoup moins (cuivre, chrome, manganèse, plomb) voire potentiellement pas du tout (rhénium, métal du groupe du platine, plusieurs terres rares).

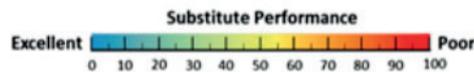
Pour les terres rares et les métaux du groupe platine, le meilleur substitut, quand il existe, est généralement un métal du même groupe, présentant donc le même risque d'approvisionnement que le métal cible. Aucun des 62 métaux n'a de substituts qui offrent des performances exemplaires dans toutes leurs principales applications, ce qui signifie qu'une simple substitution comme solution générique face à un risque d'approvisionnement n'est pas envisageable.

La substitution fait aussi face à des obstacles économiques, liés au prix relatif entre les deux ressources substituables (qui peut ne pas être favorable pour enclencher la substitution malgré une faisabilité technique), aux coûts relatifs au changement, aux réajustements nécessaires des équipements et de la technologie ainsi qu'à la perte des avantages obtenus en termes de connaissance et à la perte de réseaux de coopération

avec les fournisseurs et les clients. Florian Fizaine (2021) indique que l'effet prix aurait peu d'emprise sur la substitution intramatériaux et souffrirait d'une très forte inertie pouvant perdurer au-delà de la décennie.

H																	He
Li 41	Be 63											B 41	C	N	O	F	Ne
Na	Mg 94											Al 44	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc 65	Ti 63	V 63	Cr 76	Mn 96	Fe 57	Co 54	Ni 62	Cu 70	Zn 38	Ga 38	Ge 44	As 38	Se 47	Br	Kr
Rb	Sr	Y 95	Zr 66	Nb 42	Mo 70	Tc	Ru 63	Rh 96	Pd 39	Ag 44	Cd 38	In 60	Sn 36	Sb 57	Te 38	I	Xe
Cs	Ba 63	*	Hf 38	Ta 41	W 53	Re 90	Os 38	Ir 69	Pt 66	Au 40	Hg 45	Tl 100	Pb 100	Bi 46	Po	At	Rn
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo

* Lanthanides	La 75	Ce 60	Pr 41	Nd 41	Pm	Sm 38	Eu 100	Gd 63	Tb 63	Dy 100	Ho 63	Er 63	Tm 88	Yb 88	Lu 63
** Actinides	Ac	Th 35	Pa	U 63	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr



Par ailleurs, la coproduction ou la sous-production peut largement réduire l'intérêt d'une substitution. Les substituts alternatifs à un métal sont fréquemment d'autres métaux possédant des caractéristiques similaires et sont souvent associés dans les mêmes gisements (cas des platinoïdes et des terres rares). Passer d'un métal à un autre expose le consommateur à une augmentation du prix du substitut sans réaction forte de l'offre jointe de métaux (faible élasticité prix des coproduits et sous-produits).

Florian Fizaine note en ce sens que « les consommations exponentielles réduisent à peu près toute valeur de stock gigantesque à quelques centaines d'années de consommation (au mieux). La substitution d'un élément par un autre, nous fait gagner du temps mais ne résout pas le problème de l'augmentation de la pression que fait peser l'anthroposphère sur la biosphère. On ne fait que reporter la pression d'un point vers un autre. Ensuite, loin de passer à une économie basée sur des flux renouvelables, nos économies font exactement l'inverse (et cela s'aggrave), c'est-à-dire dépendent de plus en plus de ressources de stocks ».

Hiérarchie d'Altenpohl

La substitution ne consiste pas uniquement au remplacement d'un matériau par un autre. Sept niveaux différents de substitution sont par exemple distingués par le métallurgiste Altenpohl, qui peuvent se jouer à des échelles de temps différentes :

- un changement d'objectif ou de valeur personnelle ou sociale entraînant une modification de la demande,
- un changement de stratégie pour atteindre les objectifs,
- un changement du système via des moyens techniques permettant la mise en œuvre d'une stratégie,
- un changement de sous-système grâce à une modification de la conception du système,
- un changement de composant au travers d'un changement de conception,
- un changement de matériaux pour un composant spécifique,
- un changement dans la façon de produire la ressource.

► Potentiels de substitution pour quelques métaux

Le **cuivre**, dans ses usages électriques et électroniques (environ 30 % au niveau mondial), pourrait être remplacé par de l'aluminium, cependant moins bon conducteurs et plus sujet aux risques d'incendie. Graedel et al estime la performance de cette substitution comme « pauvre ».

Les **inox au nickel** (76% de l'utilisation du nickel au niveau mondial) peuvent être substitués par des inox plus pauvres en nickel ou sans nickel, mais avec une baisse de qualité et de performances, pouvant être acceptable dans certains usages (équipements domestiques, construction, industrie agroalimentaire), moins dans d'autres (industries chimique et pétrochimique notamment).

Le **cobalt** est généralement substituable mais avec des pertes de performances. Dans le domaine des batteries Li-ion, la substitution du cobalt est possible par des technologies alternatives ou des changements de compositions au sein d'une même technologie. Dans les superalliages et autres alliages, le cobalt peut être substitué par d'autres métaux comme le molybdène, le niobium ou le rhénium, en fonction des applications et performances recherchées. Dans le domaine des aimants permanents, d'autres technologies existent, en particulier la technologie NdFeB à base de terres rares (néodyme, praséodyme, dysprosium) ou certaines plus économiques avec pertes de performances (ferrites).

Le lithium des batteries a des substitutions possibles mais dans des technologies en général moins performantes ou plus coûteuses. L'évolution technologique actuelle est en faveur des batteries au lithium.

Le **néodyme** des aimants permanents n'est pas substituable sans perte de performances, sauf par le praséodyme, également critique.

Le **dysprosium** est non substituable dans les aimants permanents FeNdB sans perte de performances (sauf par du terbium, également critique). Les aimants FeNdB sont substituables par d'autres technologies d'aimants permanents, mais au prix de masses bien plus importantes.

Relance minière

La relance minière en métropole française est envisagée par les acteurs institutionnels et industriels comme un moyen participant à la sécurisation des approvisionnements. L'enjeu majeur pour ceux-ci est l'acceptabilité sociale des activités minières, car de fait, les oppositions locales sont courantes.

L'un des arguments en faveur de la relance minière, en plus de la souveraineté productive, est la meilleure maîtrise des dégradations et pollutions par rapport à ce qui se fait dans des pays aux réglementations moins regardantes ou peu respectées. Cependant, compte tenu des dynamiques autour des matériaux, ouvrir une mine en France n'aura probablement pas pour effet d'éviter l'ouverture d'une autre ailleurs dans le monde.



Innovations

Le secteur minier, de manière générale, recherche des retours sur investissement rapides, et préfère utiliser des technologies et des procédures ayant fait leurs preuves plutôt que d'innover. De fait, les dépenses en R&D sont particulièrement faibles. Cependant, l'association SystEx remarque que des techniques « innovantes » ou « modernes » sont régulièrement mises en avant dans les communications, sans que celles-ci soient explicitées, mais pouvant laisser penser qu'il existerait de nouvelles façons d'exploiter ou de traiter les minerais permettant de réduire les conséquences sanitaires et écologiques. L'association SystEx estime que les retours d'expériences du terrain et l'état de l'art de la recherche contredisent cette idée.

La plupart des techniques (c'est à dire les procédés et les méthodes) minières utilisées datent de la fin du 19^e siècle, avec des rendements qui se sont améliorés au fil du temps. Les techniques développées le plus récemment offrent une meilleure efficacité (tonnage/coût) mais ne permettent pas de réduire les impacts environnementaux associés. Par exemple, le foudroyage par blocs consiste à former une cavité souterraine de très grande taille (200 à 500 mètres de haut) par l'usage d'explosifs. La sélectivité étant faible (qualité de l'extraction), les volumes de résidus miniers générés sont très importants,

avec leurs risques associés. L'effondrement des terrains situés au-dessus de la zone exploitée est également un risque identifié. La lixiviation in situ et en tas font également parties des techniques « récentes ». Cette dernière consiste à mettre en tas de 10 à 20 mètres de hauteur du minerai concassé ou broyé sur une plateforme étanchéifiée et à l'irriguer avec une solution acide (ou cyanurée pour l'or) pendant une période prolongée. Particulièrement adaptée aux minerais à plus faible teneur, elle devrait être de plus en plus utilisée dans les années à venir. Les aires de lixiviation en tas s'étendent sur des surfaces de l'ordre du kilomètre carré voire de la dizaine de kilomètre carré.

L'une des évolutions en cours serait de l'ordre technologique (se rapportant aux outils et au matériel), avec la numérisation de et l'automatisation de l'industrie minière (utilisation d'analytique Big Data, de capteurs, de drones, de GPS, d'équipements IoT...).

Enjeu territorial / Grand Lyon et AURA

Acteurs en région Auvergne Rhône-Alpes directement concernés par les métaux clés de la transition énergétique :

Cuivre

- Gindre Duchavany (Lyon), filiale du groupe suisse Alpin AG, produit des barres et profilés de cuivre et alliages à Pont de Chéruy (38).

Nickel

- Aubert&Duval, de la branche alliages d'Eramet, produit des inox et superalliages au nickel. Sites de production à Les Ancizes (63), Issoire (63), Firminy (42) ;
- Ugitech (73 Ugine), filiale de l'allemand Schmolz und Bickenbach, produit des inox à Ugine (73) et des barres et fils à Ugine, et Bourg-en-Bresse (01) ;
- Industeel (Le Creusot, filiale d'ArcelorMittal) produit des inox et des superalliages au nickel à Châteauneuf (42).

Lithium

- Recupyl (38-Domène) recycle des piles et des accumulateurs pour récupérer les métaux contenus et obtient des poudres de zinc, manganèse, cobalt et lithium. Sites en France, Pologne et Singapour.
- Dans l'Allier, sur le site de Beauvoir (commune d'Echassières), Imerys envisage la production de 34 000 tonnes d'hydroxyde de lithium par an à partir de 2028. Ce serait l'un des plus grands projets d'extraction de lithium en Europe.

Principales sources utilisées :

- Aknin A., «La malédiction des ressources dans les pays miniers en développement», in Florian Fizaine, Xavier Galiègue (dir.), «L'économie des ressources minérales et le défi de la soutenabilité 1 Contexte et enjeux», ISTE Éditions, 2021, p. 208-233
- Bonnet et al., «Vers Une Géopolitique De L'énergie Plus Complexe ? Une analyse prospective tridimensionnelle de la transition énergétique» (working paper), IFP Énergies nouvelles et de l'Institut de relations internationales et stratégiques, 2018. - <https://hal.science/hal-02971706>
- Bourbon J.C., «Les mines, le nouveau terrain des géants de l'eau», La Croix, 2014.
- Fizaine F., «La substitution : promesses, principes et principales contraintes», in Florian Fizaine, Xavier Galiègue (dir.), «L'économie des ressources minérales et le défi de la soutenabilité 2 Enjeux et leviers d'action», ISTE Éditions, 2021.
- Fizaine F., Court V., «Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI », Ecological Economics, 2015, p. 106-118. - <https://hal.science/hal-01170989/>
- Fizaine F., Galiègue X. (dir.), «L'économie des ressources minérales et le défi de la soutenabilité 1 Contexte et enjeux», ISTE Éditions, 2021.
- Florian Fizaine, Xavier Galiègue (dir.), «L'économie des ressources minérales et le défi de la soutenabilité 2 Enjeux et leviers d'action», ISTE Éditions, 2021.
- Geldron A., «L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'inquiéter ?», rapport technique pour l'Ademe, 2017. - https://www.researchgate.net/publication/323119968_l'epuisement_des_métaux_et_mineraux_faut-il_s'inquieter_l'epuisement_des_métaux_et_mineraux_faut-il_s'inquieter
- Graedel et al., «On the materials basis of modern society », PNAS, mai 2015, p. 6295–6300. - <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1312752110>
- Homobono N., Vignolles D., «Analyse de la vulnérabilité d'approvisionnement en matières premières des entreprises françaises», rapport pour le Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies, 2019. - https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/vulnerabilite-appvisionnement.pdf
- IEA, «The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions», IEA Publications, 2021. - <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- Jourda G., «Pollutions industrielles et minières des sols : assumer ses responsabilités, réparer les erreurs du passé et penser durablement l'avenir Tome I», rapport sénatorial, 2019. - <https://www.senat.fr/notice-rapport/2019/r19-700-1-notice.html>
- Labbé J.F., «Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux», annales des Mines - Responsabilité et environnement, février 2016, pages 45 à 56.
- Melvil Bossé, «Afrique. Minerais de sang et néocolonialisme en République Démocratique du Congo (RDC) Le conflit au Kivu, zone grise en proie à de cruciales rivalités géoéconomiques», 2020
- Pigneur J., «Mise au point d'une méthode intégrée d'analyse des impacts des filières de matières premières minérales», thèse de génie industriel, Gif-sur-Yvette, 2019, 406 pages. - <https://hal.inria.fr/tel-03123793/>
- Saint-Aubin Ph., «La dépendance aux métaux stratégiques : quelles solutions pour l'économie ?», avis du Conseil économique, social et environnemental, 2019. - <https://www.lecese.fr/travaux-publies/la-dependance-aux-métaux-strategiques-queelles-solutions-pour-l-economie>
- SystEx, «Controverses minières Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales- Volet 2 Tome 1. Exploration et exploitation minières en eaux profondes», 2021. - <https://www.systext.org/node/1931>
- SystEx, «Controverses minières. Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales Volet 1. Analyse argumentée basée sur un retour d'expérience international, portant sur plusieurs sujets d'actualité : Caractère prédateur et dangereux. Techniques minières · Déversements volontaires en milieux aquatiques · Anciens sites miniers», 2021. - <https://www.systext.org/node/1785>
- UNEP, «Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles», 2013
- Vidal O., «L'avenir des matières premières», revue Études, mai 2021, pages 19 à 30. - <https://www.cairn.info/revue-etudes-2021-5-page-19.htm>
- Vidal O., «Modélisation de l'évolution à long terme de l'énergie de production primaire et du prix des métaux», 2019. - <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02396615/document>
- Fiches éléments de L'Élémentarium. - <https://lelementarium.fr>
- Fiches de criticité du BRGM. - <https://www.mineralinfo.fr/fr/securite-des-approvisionnements-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques#les-analyses-par-substance>

Analyse transversale / ouverture conclusive

L'analyse thématique des matériaux ou familles de matériaux que nous avons réalisée ne permet d'appréhender qu'une partie de la complexité du sujet. Car même si certaines tendances peuvent apparaître au sein de chaque famille de matériau, il est en réalité aujourd'hui très difficile d'isoler un matériau d'un autre tant ils sont imbriqués dans des chaînes de production complexes et, bien souvent, mondialisées. De ce fait, analyser de façon transversale les différents matériaux n'est pas un exercice facile. Quelques tendances nous semblent toutefois importantes à retenir.

Des consommations en hausse au niveau mondial

La première tendance observable au niveau mondial pour quasiment tous les matériaux est l'augmentation constante des flux de production et de consommation. Au cours du 20^e siècle, cet accroissement s'est le plus souvent avéré plus rapide encore que celui de la démographie. Les pays les plus riches sont toutefois parfois parvenus à stabiliser voire à réduire leurs consommations matérielles dans certains domaines. La France a par exemple connu un pic de production de ciment et de béton dans les années 1970 ; la production de verre creux et plat semble également décroître depuis le milieu des années 2000 dans notre pays. Mais la consommation d'autres matériaux, comme les composites, augmente encore ; et, si l'empreinte matérielle dans son ensemble parvient à se stabiliser dans certains pays comme le nôtre, c'est à un niveau qui reste très élevé, probablement impossible à généraliser à l'ensemble de la population mondiale²³.

Des ajouts, mais pas vraiment de substitution

Une deuxième tendance assez nette concerne l'absence de réelle substitution entre matériaux sur le long terme et à l'échelle globale. Ce phénomène est déjà largement documenté dans le domaine de l'énergie : alors que les théories économiques dominantes misent essentiellement sur la substitution pour répondre aux impératifs écologiques – l'apparition de nouvelles technologies ou ressources étant supposée se substituer aux précédentes – la réalité observée est toute autre : jusqu'à présent, le développement des énergies fossiles n'a pas réduit l'usage de la biomasse, pas plus que le nucléaire ou l'éolien n'ont fait baisser la consommation mondiale d'énergies fossiles. La même tendance s'observe concernant les matériaux. En particulier, les matériaux issus de la biomasse, qui étaient majoritaires avant le 20^e siècle, sont certes devenus minoritaires aujourd'hui, mais leur production a néanmoins augmenté. Il semble bien que, dans la plupart des cas, les nouveaux matériaux viennent s'ajouter aux flux et aux stocks existants, davantage qu'ils ne viennent s'y substituer²⁴.

Une transition énergétique qui interroge la transition matérielle

La plupart des matériaux analysés sont aujourd'hui concernés par la transition énergétique et climatique : soit parce que leur extraction ou leur production sont très dépendantes des énergies fossiles (verre, ciment, métaux...), soit parce que leurs procédés de production sont émetteurs de gaz à effet de serre (ciment), soit encore parce que la transition énergétique suppose de faire davantage appel à eux (bois, métaux, composites, verre). Mais si la transition énergétique s'annonce dans tous les cas comme un défi majeur pour la plupart des filières, l'analyse par matériau laisse apparaître des tensions en devenir entre ces derniers : la transition énergétique suppose par exemple de faire appel à de nombreux minerais métalliques dont la disponibilité est questionnée à moyen terme, et dont l'intensité énergétique risque paradoxalement d'augmenter²⁵.

23. Dans une thèse de doctorat dédiée à cette question, Michael Lettenmeier estime qu'une empreinte matériellement soutenable équivaut à environ 8 tonnes par habitant et par an, soit à peine plus de la moitié de l'empreinte matérielle d'un Français : Lettenmeier M., 2018. *A sustainable level of material footprint – Benchmark for designing one-planet lifestyles*. Aalto University. - <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/31300>

24. Voir par exemple Fressoz J-B., 2022. « Énergie et matières premières : le mythe de la transition », Pour la Science, n°535. - <https://www.pourlascience.fr/sd/histoire-techniques/energie-et-matieres-premieres-le-mythe-de-la-transition-23715.php>

25. Voir à ce propos les travaux de Philippe Bihouix en France, rapportés sur Millénaire 3 : <https://www.millenaire3.com/Interview/2015/Notre-soif-de-minerais-et-d-energie-va-poser-un-enorme-probleme>

La transition énergétique pourrait également accroître l'usage de la biomasse comme source d'énergie ou de stockage du carbone au détriment – ou en concurrence avec – d'autres usages matériels. Si les liens entre transition énergétique et transition matérielle commencent à être explorés²⁶, ils mériteraient de l'être bien davantage afin de mettre en avant les potentielles contradictions ou synergies entre elles.

Une circularité à développer, mais qui ne suffira pas toujours

En matière de circularité, certains matériaux ont déjà atteint une maturité importante et peuvent servir d'exemple – c'est le cas du verre creux, très recyclé dans les pays les plus industrialisés. Mais pour la plupart des matériaux, le recyclage est encore soit très insuffisant (plastiques, métaux, ciment), soit marginal (composites, caoutchouc). Pour certains matériaux, le recyclage pose par ailleurs encore de nombreux défis : par exemple, la complexification des matériaux – de plus en plus assemblés ou composites – et le développement de certains usages dispersifs (ex. microparticules) rendent le recyclage plus difficile, voire impossible. Le recyclage connaît par ailleurs des limites physiques (perte de qualité des matériaux recyclés, coût énergétique, etc.) et, même dans les conditions techniques les plus favorables, la plupart du temps il ne permet pas d'endiguer l'augmentation de l'extraction de matières premières si, dans le même temps, la demande en matériaux continue de croître²⁷.

Une appétence pour les matériaux biosourcés qui laisse présager des usages concurrentiels

Toujours concernant l'enjeu de circularité, beaucoup d'attentes semblent portées aujourd'hui sur les matériaux biosourcés, qui présentent l'avantage d'être a priori renouvelables et, dans bien des cas, plus aisément recyclables ou ré-assimilables par les écosystèmes. Résines polymères, fibres issues du pétrole, matériaux de construction minéraux ou encore plastiques de toutes sortes pourraient potentiellement être remplacés par des matériaux biosourcés. Mais là encore, la productivité de la biomasse n'étant pas infinie, des conflits d'usage des sols pourraient à l'avenir amener à arbitrer entre production alimentaire, production énergétique, production matérielle ou encore préservation de la biodiversité. Les contradictions ou synergies possibles entre ces différents usages (et entre les différents matériaux potentiellement concernés) mériteraient là encore d'être approfondies, tant elles semblent diviser les experts²⁸.

Des chaînes d'approvisionnement souvent mondialisées qui interrogent la souveraineté des nations

Certains matériaux ou familles de matériaux sont très ancrés dans les territoires : le bois, le plâtre, la terre cuite, le ciment et la plupart des matériaux de construction utilisés en Europe sont par exemple produits à proximité des lieux de consommation, avec des matériaux de proximité – c'est notamment le cas autour de la Métropole de Lyon. Pour d'autres matériaux, comme le plastique, les composites ou le caoutchouc, la France et l'Europe disposent des outils de transformation nécessaires, mais généralement pas des matières premières. D'autres matériaux sont enfin extraits et/ou transformés beaucoup plus loin, jusqu'à poser des problèmes de souveraineté comparables à ceux posés par notre dépendance aux énergies fossiles et fissiles. Le pétrole nécessaire à la production de polymères, les fibres textiles et de très nombreux métaux stratégiques indispensables aux transitions énergétique et numérique sont aujourd'hui extraits et transformés en dehors du territoire européen.

26. En France, ce travail est par exemple réalisé en lien avec le scénario de transition énergétique de l'association négaWatt, via les travaux de Solagro soutenus par l'Ademe (scénario *AFTERRES*, scénario *négaWatt*).

27. Voir à ce propos les explications de François Grosse, rapportées sur Millénaire 3 : <https://www.millenaire3.com/Interview/Economie-circulaire-et-politiques-publiques>

28. Muscat et al., 2021. « Food, energy or biomaterials ? Policy coherence across agro-food and bioeconomy policy domains in the EU », *Env. Science & Policy*, vol. 123, pp. 21-30, url : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146290121001210>

Une sobriété matérielle qui a du mal à s'imposer

Enfin, de manière assez comparable à ce qui a pu être observé dans le domaine de la transition énergétique²⁹, il semble que la sobriété soit aujourd'hui à la fois reconnue comme indispensable par de plus en plus d'experts, tout en restant le maillon faible des politiques publiques³⁰. Par sobriété, il faut entendre l'ensemble des actions permettant de réduire à la source les besoins de biens matériels, en adaptant les comportements et les habitudes ainsi que l'environnement économique, réglementaire ou culturel incitant à la surconsommation. Moins produire et moins consommer peut passer par différentes actions : régulation de la publicité, meilleure conception et durabilité des produits, augmentation des prix (par le marché ou par des taxes), réglementation voire, peut-être un jour, rationnement. Mais si beaucoup s'accordent à reconnaître que « le meilleur matériau est celui qui n'est pas consommé », force est de constater que l'effort des industriels et des politiques publiques dans ce domaine est encore timide. Si elles étaient élargies à d'autres domaines de consommation matérielle, des politiques de type « zéro artificialisation nette » pourraient par exemple ouvrir la porte à l'élaboration de véritables stratégies de sobriété matérielle, sans doute nécessaires pour compléter les orientations actuelles, qui restent essentiellement fondées sur la substitution et la circularité.

Des niveaux de criticité et de dépendance divers

Enfin, même si certains enjeux sont transversaux, nous avons pu constater qu'ils s'exprimaient avec une acuité très différente selon les types de matériaux considérés.

Par exemple :

- Le plâtre et la terre cuite paraissent assez peu critiques, tant sur le plan de la souveraineté que sur le terrain de la transition écologique.
- Le ciment et le verre ne présentent pas d'énormes enjeux de dépendance, mais ils sont tous deux consommateurs directs ou indirects de sable (dont la ressource pourrait se tarir) et, surtout, ils sont confrontés à un énorme enjeu de décarbonation.
- Le plastique et les composites connaissent quant à eux un fort essor et deviennent de plus en plus stratégiques, alors qu'ils posent de gros problèmes de circularité et leur fabrication repose sur des matières premières fossiles.
- Plusieurs métaux sont devenus très stratégiques pour la transition énergétique et numérique, alors même que la France et l'Europe n'en détiennent pas les clés de production – que ce soit en termes de matière première ou de transformation.

Le tableau conclusif présenté ci-après résume les principaux enjeux en lien avec la transition écologique et la souveraineté économique, en rappelant de manière synthétique leur importance et leur nature pour chaque matériau.

29. Villalba B., Semal L., 2019. *Sobriété énergétique. Contraintes matérielles, équité sociale et perspectives institutionnelles*. Ed. Quae, Paris.

30. En particulier au niveau « macro » et sociétal, si on en croit Guillard V., Ben Kemoun N., 2019. *Penser la sobriété matérielle*. Synthèse. Ademe. - <https://fabriquedesrecits.com/training/penser-la-sobriete-materielle/>

	Souveraineté / autonomie	Décarbonation	Circularité	Biodiversité	Territoire régional / lyonnais
Bois	<ul style="list-style-type: none"> > Déficit extérieur croissant, avec un excédent sur les bois bruts et un déficit sur les bois transformés > Demande domestique en croissance (bois énergie et construction). > Ressource forestière nationale a priori abondante et diversifiée. Menace du changement climatique > Freins économiques à l'exploitation de la ressource 	<ul style="list-style-type: none"> > La forêt constitue le premier puit de carbone de la France, d'où des controverses entre laisser pousser la forêt ou l'exploiter > La SNBC définit des objectifs ambitieux de séquestration de carbone via la production de matériaux bois > Les importations de bois et produits dérivés provenant de pays tropicaux représentent 8 % de la déforestation importée de l'UE 	<ul style="list-style-type: none"> > La forêt constitue une ressource renouvelable (à condition de respecter ses conditions de renouvellement) > Les déchets bois peuvent faire l'objet de recyclage (matières, pâte à papier, valorisation énergétique...) 	<ul style="list-style-type: none"> > Les écosystèmes forestiers constituent un réservoir de biodiversité. > La déforestation contribue à l'érosion de la biodiversité dans les pays tropicaux. > En France, certaines pratiques sylvicoles ont des impacts négatifs sur la biodiversité. 	<ul style="list-style-type: none"> > La région est la 2^{ème} française en termes de récolte de bois d'œuvre et la 3^{ème} pour la récolte totale.
Fibres textiles	<ul style="list-style-type: none"> > Déficit extérieur croissant de la France pour les produits textile et d'habillement. > Net fléchissement de la consommation finale (en valeur) de produits textile et d'habillement, mais poursuite de la croissance en volume (tonnes). > La France est le 1^{er} producteur mondial de lin et 2^{ème} pour le chanvre. 	<ul style="list-style-type: none"> > Les fibres synthétiques dominent la production mondiale > Les matériaux fournis par les plantes à fibres peuvent se substituer à des matériaux d'origine fossiles pour divers usages : isolants, fibres textile, plastiques, composites. 	<ul style="list-style-type: none"> > Les fibres naturelles peuvent difficilement prendre le relais des fibres synthétiques. La circularisation des déchets textiles constitue un enjeu fort. > Le recyclage des déchets textile bute sur divers freins : exportation des déchets collectés, baisse de qualité des textiles collectés, procédés de récupération des fibres, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> > La production mondiale de coton implique une irrigation importante et un recours massif aux pesticides. > Le lin nécessite 10 fois moins de traitements que le coton. Le chanvre ne nécessite aucun arrosage, aucun traitement et permet de favoriser la biodiversité grâce à son couvert. 	<ul style="list-style-type: none"> > Développement des surfaces en culture de chanvre en Auvergne-Rhône-Alpes. > Le recyclage des textiles constitue une préoccupation forte des acteurs de la filière textile régionale
Caoutchouc	<ul style="list-style-type: none"> > La consommation finale de produits en caoutchouc est stable ces dernières années en France, avec un déficit extérieur pour la France. > La production de caoutchouc naturel est menacée par la propagation de maladies et par le changement climatique. > Matière première stratégique selon l'Union européenne. 	<ul style="list-style-type: none"> > Le caoutchouc synthétique (issu de combustibles fossiles) domine la production mondiale : 15,1 millions de tonnes en 2019, contre 13,7 millions de tonnes pour la production de caoutchouc naturel. 	<ul style="list-style-type: none"> > En France, 93% des pneus usagés sont collectés en 2019. Ils sont principalement valorisés énergétiquement ou recyclés. 	<ul style="list-style-type: none"> > Les importations de caoutchouc naturel figurent parmi les importations de l'UE contribuant le plus à la déforestation dans les pays tropicaux, et donc à l'érosion de la biodiversité dans ces régions. 	<ul style="list-style-type: none"> > La région accueille l'un des principaux fabricants mondiaux de pneus : Michelin. Sa R&D vise à allonger la durée de vie et les performances des pneus, tout en augmentant la part de matériaux renouvelables et biosourcés.

	Souveraineté / autonomie	Décarbonation	Circularité	Biodiversité	Territoire régional / lyonnais
Ciment	<ul style="list-style-type: none"> > Léger déficit de production en France. 45 sites (Lafarge, Vicat, etc.) > Tendance de production et de consommation à la baisse depuis les années 1970. 	<ul style="list-style-type: none"> > La fabrication de ciment représente 20% des émissions de GES de l'industrie française. La quasi-totalité de la baisse de ces émissions (-43% entre 1990 et 2018) est liée au recul de la production et de la consommation. > Matériau très émetteur de CO2 (clinker). Quelques tentatives de changement de matériau (substitution du clinker). 	<ul style="list-style-type: none"> > Matériau dont le recyclage est aujourd'hui limité (remblais de routes). Besoin de nouvelles filières. > Matériau non renouvelable. Développement timide des bétons végétaux (substitution incertaine eu égard aux volumes en jeu). > Enjeu de disponibilité du sable à moyen terme pour le béton 	<ul style="list-style-type: none"> > Symbole de l'artificialisation des sols (bétonnage)... même si l'asphalte est plus impactant (en surfaces). Le ciment reste le matériau clé de la construction aujourd'hui. 	<ul style="list-style-type: none"> > Très nombreux acteurs consommateurs (toute la filière BTP) et quelques acteurs producteurs. > Quelques acteurs du béton bas carbone ou recyclé
Matériaux en plâtre et terre cuite	<ul style="list-style-type: none"> > Une abondance de gisements en France qui permet une production locale. > La production nécessite une gestion raisonnée qui inclut le recyclage et la recherche de nouveaux sites (cf. argile) 	<ul style="list-style-type: none"> > Acteurs engagés dans la décarbonation de son industrie et de celle de la construction avec des améliorations constantes. > Faible impact 	<ul style="list-style-type: none"> > Globalement, les plâtres et terres cuites s'intègrent dans une économie de proximité. > Politique de filière : gestion du recyclage des déchets (en phase d'amélioration constante) 	<ul style="list-style-type: none"> > Les carrières sont soumises à des réglementations environnementales strictes. 	<ul style="list-style-type: none"> > Bonnes capacités en approvisionnement avec plusieurs sites d'intérêts nationaux et régionaux et des potentiels de réserves.
Verre	<ul style="list-style-type: none"> > Bonne indépendance à l'échelle nationale et européenne (verres creux, plats, fibre optique), sauf la fibre de verre et certains verres spéciaux. 	<ul style="list-style-type: none"> > Procédés très consommateurs d'énergie. > Matériau mobilisé dans le photovoltaïque. 	<ul style="list-style-type: none"> > Verres creux (⅓ des verres) très recyclés, mais des verres plats (30% des verres) très peu et mal recyclés. > Enjeu de disponibilité du sable (moyen terme) ? 	<ul style="list-style-type: none"> > Pas de lien direct. 	<ul style="list-style-type: none"> > Industries historiquement présentes sur le bassin lyonnais (Givors, Forez, Saint-Gobain...).
Matériaux composites	<ul style="list-style-type: none"> > La France importe deux fois plus de fibres de carbone et biens intégrant de la fibre de carbone qu'elle n'en produit. > Une dizaine de producteurs de fibre de carbone se partagent 90% de la production mondiale (USA, Japon, Chine) > Plusieurs industries à forte consommation : aéronautique, voiture, éolien. > Forte croissance de la demande. 	<ul style="list-style-type: none"> > Bilan très ambigu : des matériaux mobilisés pour alléger les véhicules (avion, voitures) et pour les pales d'éoliennes, mais une production très énergivore (en particulier la fibre de carbone). 	<ul style="list-style-type: none"> > Filières de recyclage encore peu développées, gros enjeu de recyclage (ex. pales d'éoliennes pour les fibres de verre et de carbone). > Les matériaux composites sont très complexes à recycler. 	<ul style="list-style-type: none"> > Pas de lien direct. 	<ul style="list-style-type: none"> > Quelques entreprises produisent de la fibre de carbone en Isère et dans l'Ain. D'autres, plus nombreuses, en sont consommatrices. > La production de carbone est présente dans la région (Carbone Savoie).

	Souveraineté / autonomie	Décarbonation	Circularité	Biodiversité	Territoire régional / lyonnais
Plastiques	<ul style="list-style-type: none"> > Forte dépendance aux importations étrangères de pétrole (La France ne produit que 2% de son besoin). > Consommation de matière plastique nécessaire à tous les secteurs d'activité. 	<ul style="list-style-type: none"> > Un cycle de vie extrêmement polluant. > Toxicité : les sites de transformation du pétrole sont nocifs pour les habitants et pour les salariés. > Le plastique est néanmoins un composant essentiel en raison de ses nombreuses propriétés (résistance, légèreté, etc.). 	<ul style="list-style-type: none"> > Les industries doivent anticiper l'interdiction du plastique à usage unique d'ici 2040. > Des problématiques économiques et techniques au recyclage du plastique et un problème de volumes grandissant difficilement absorbable pas les industries du recyclage. > Retard de la France en matière de recyclage. 	<ul style="list-style-type: none"> > Présence de microparticules et de déchets de l'environnement notamment dans les océans. Peu d'études sur le poids de ces particules dans les terres agricoles (engrais, bâches, etc.) ou sur la santé. > Impact sur la faune. 	<ul style="list-style-type: none"> > 1^{ère} région française. Des pôles emblématiques : Plastic Vallée; Vallée de la Chimie (Lyon). > Des industries porteuses de projets de recyclage ou de substitution. > La Vallée de la Chimie cause 26 % des émissions de gaz à effet de serre de la métropole lyonnaise.
Métaux	<ul style="list-style-type: none"> > Aucune production primaire de métaux en France métropolitaine. > Forte concentration géographique de la production pour la plupart des métaux. 	<ul style="list-style-type: none"> > Nickel, cobalt, cuivre, lithium et certaines terres rares sont essentiels aux stratégies de décarbonation. 	<ul style="list-style-type: none"> > Possibilités de recyclage variables selon les métaux et leurs usages (conditions techniques et économiques, besoin d'une filière complète). > Recyclage insuffisant pour faire face aux hausses anticipées des besoins en métaux. 	<ul style="list-style-type: none"> > Emprise au sol des mines et des infrastructures associés (routes, usines, ports). > Pollutions de l'air, des sols et de l'eau à court et long terme inhérentes à l'activité minière. 	<ul style="list-style-type: none"> > Acteurs industriels dans le secteur de l'automobile. > Prospection minière. > Stratégie de la Métropole en matière de réduction des émissions CO₂.

Légende :

	Enjeu faible
	Enjeu modéré
	Enjeu fort
	Enjeu non pertinent ou peu signifiant

Annexe

RESSOURCES RARES, CRITIQUES, STRATÉGIQUES : LE CAS DES MÉTAUX. DÉFINITIONS.

Gisements, ressources et réserves

Les **gisements** correspondent des concentrations naturelles de minéraux supérieures à la concentration moyenne des roches, à un niveau de concentration permettant d'en envisager l'exploitation. Les **ressources**³¹ minières rassemblent l'ensemble des gisements connues (estimées à partir de sondages ou extrapolées à partir de données géologiques) avec des perspectives raisonnables d'extraction économique à terme. Les **réserves** correspondent à la part des ressources qui peut techniquement et économiquement être exploitée dans les circonstances actuelles. Elles varient dans le temps en fonction des conditions économiques et de l'activité d'exploration et de production. Les ressources peuvent donc être beaucoup plus importantes que les réserves.

Métal stratégique

Il n'y pas de définition unique d'un métal stratégique. Le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières)³² indique que métal stratégique est un « métal indispensable à la politique économique d'un État, à sa défense, à sa politique énergétique ou à celle d'un acteur industriel spécifique ». Une matière stratégique s'éloigne de critères géologiques ou de marché. Par exemple, bien qu'abondant, le fer, indispensable à l'acier, est devenu stratégique pour la Chine dans le cadre de sa politique d'urbanisation. En France, le COMES (Comité des métaux Stratégique) a été créé en 2011 afin « d'assister le ministre chargé des mines dans l'élaboration et la mise en œuvre de la politique de gestion des métaux stratégiques, en vue de renforcer la sécurité d'approvisionnement nécessaire à la compétitivité durable de l'économie ».

Métal critique

La criticité d'un métal s'évalue selon deux critères principaux : son importance économique et les risques d'approvisionnement (risques pesant sur la pérennité et la suffisance des approvisionnements). C'est une notion très relative et variable dans le temps. Elle dépend des intérêts économiques (commerciaux, technologiques, financiers) et/ou politiques (sécurité, défense, politique étrangère) de l'entité consommatrice considérée.

Depuis 2011, la Commission européenne publie un rapport avec la liste des métaux et minéraux industriels considérés comme critiques³³. Au niveau national, le BRGM réalise des fiches de criticité³⁴. Les entreprises peuvent également évaluer la criticité des matières premières dont elles s'approvisionnent, par rapport à leurs propres enjeux. Cependant, la complexité des systèmes et des filières de production, le développement de chaînes de sous-traitance à multiples niveaux et la généralisation de la production en flux tendu font que beaucoup d'industriels produisant un produit fini n'ont qu'une visibilité très limitée des métaux et ou des ressources minérales entrant dans leur composition.

L'évaluation de la criticité dépend de l'**échelle géographique** considérée (mondiale, régionale, nationale), de la **nature de l'entité consommatrice** considérée (une entité politique, une industrie, une entreprise, voire une technologie) et de ses intérêts économiques (commerciaux, technologiques, financiers) et/ou politiques (sécurité, défense, politique étrangère) ainsi que de l'**échelle temporelle** considérée (car d'une part les évolutions technologiques, les processus de production et la mise sur le marché de nouveaux produits engendrent des variations en offre et demande, et d'autre part la flexibilité de l'offre minière pour répondre à une hausse importante de la demande est limitée par les délais nécessaires à la mise en œuvre de nouveaux projets miniers, qui sont en moyenne de 10 à 20 ans).

Bonnet et al.³⁵ indique que si la littérature économique sur la question de la criticité est importante, le champ d'analyse reste mal défini, les études pouvant se focaliser sur des champs disciplinaires différenciés (économie, environnement, stratégie d'entreprises, analyse de cycle de vie, etc.), utiliser des indicateurs variés de mesure de criticité (ratio R/P, présence de substituts, risque, externalités environnementales, etc.) et travailler sur des horizons temporels multiples (du court au moyen voire très long terme).

Derrière le risque d'approvisionnement, ces sont des **risques géologiques** (défaut de disponibilité des matériaux à la suite d'une pression de la demande), **géopolitiques** (concentration géographique des ressources, de la production minière, de la métallurgie, du raffinage), **économiques** (embargo, politiques de restrictions commerciales, manipulation de marché, etc.), **liés à la production** (sous-investissement, production jointe comme co-produit ou sous-produit, etc.) et **environnementaux ou sociaux**³⁶ (émissions de polluants liés à la production, conséquences sanitaires, etc.). Les risques d'approvisionnement se distribuent ainsi sur toute la chaîne de valeur, de la découverte géologique d'une ressource valorisable à la fabrication d'un produit.

Bonnet et al. pointe une lacune analytique en matière géopolitique derrière le fait que la stabilité politique soit un indicateur constamment mobilisé dans les études de criticité³⁷, sans être pourtant tout à fait opérant car ne prenant pas en compte la nature complexe et évolutive des relations et du rapport de force entre le pays client (ou le pays dans lequel l'entité/entreprise considérée possède ses intérêts) et le pays fournisseur. Une méthodologie plus robuste en termes de criticité, devrait selon eux inclure les **relations politiques et stratégiques** entre les différents acteurs des marchés étudiés et les **relations d'interdépendance** entre pays exportateurs et importateurs.

Métaux abondants et métaux rares

La « rareté » d'un métal est définie relativement à leur abondance dans la croûte terrestre :

- Les métaux dits **abondants** sont ceux à plus de 1000 g/t (gramme par tonne) : silicium, calcium, sodium, magnésium, potassium, fer, aluminium, titane.
- Les métaux **rares** ou **peu abondants** sont ceux compris entre 1 et 1000 g/t, ce sont les plus nombreux dans lesquels se trouvent notamment le plomb, le cuivre, le zinc, le nickel, le cobalt, le molybdène, le tungstène.
- Les métaux **très rares** sont ceux dont la teneur est inférieure à 1 g/t et comprennent les métaux précieux (or, argent et les 6 platinoïdes – platine, palladium, rhodium, iridium, ruthénium, osmium) ainsi que l'antimoine, le sélénium et l'indium.

Dans un gisement exploité, la teneur sera supérieure à la teneur moyenne de la croûte terrestre. Si pour le fer ou l'aluminium, ce sont plusieurs centaines de kilos de métal qui sont récupérés par tonne de roche extraite, ce ne sont que quelques kilos pour le cuivre et quelques grammes pour l'or, le platine ou l'argent.

31. Une ressource peut-être classifiée plus finement en fonction du degré de connaissance que l'on en a. Voir [Wikipédia, Ressource minérale](#)

32. Service géologique national français. C'est l'établissement public français de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol.

33. [European commission, Critical raw materials](#)

34. Mineralinfo.fr, [Les analyses par substance](#)

35. Clément Bonnet, Samuel Carcanague, Emmanuel Hache, Gondia Sokhna Seck, Marine Simoën, « Vers une Géopolitique de l'énergie plus complexe ? Une analyse prospective tridimensionnelle de la transition énergétique » [working paper], 2018.

36. Selon Bonnet et al., ce sont des éléments de géopolitique plus locaux qui devraient de plus en plus s'immiscer dans ce débat. Le partage des ressources en eau risque d'être un élément fondamental dans la dynamique de transition énergétique car les procédés de production en sont gourmands et les principales zones de production de matériaux stratégiques sont implantées en zone de stress hydrique.

37. Selon Bonnet et al., « la relation causale entre instabilité politique et risques d'approvisionnement mériterait de plus amples recherches empiriques. Le cas de la République démocratique du Congo, où les liens entre l'exploitation des minerais et l'instabilité politique chronique apparaissent pour le moins complexe, illustre ce besoin d'approfondissement. »

Retrouvez
toutes les études sur

www.
millenaire3.
com

Métropole de Lyon
Direction de la prospective
et du dialogue public
20 rue du Lac
CS 33569 - 69505 Lyon Cedex 03