

PROSPECTIVE DES MATÉRIAUX

3/4

Les impacts des procédés techniques sur les matériaux



MÉTROPOLE

GRAND LYON

Juin 2023

SOMMAIRE

Introduction générale :

Les matériaux, un enjeu d'avenir pour le territoire métropolitain3

Introduction aux procédés techniques..... 4

Définitions de base.....5

Rétrospective et grandes tendances en cours7

Panorama des tendances sur les procédés techniques.....10

Extractions des matières premières11

Fabrication13

Transport & utilisation15

Utilisation15

Fin de vie.....16

Focus sur quelques procédés clés..... 19

Les procédés de lithographie dans la filière électronique21

Les procédés de fabrication de la filière photovoltaïque31

Les procédés de récolte et de lavage de la filière laine.....37

Les procédés de remanufacturing dans l'industrie manufacturière.....43

Analyse transversale 51

Annexes55

Tableau des étapes du cycle de vie.....56

Sources.....68

JUIN 2023

Métropole de Lyon

■ **Coordination**

Direction de la prospective et du dialogue public

Nicolas Leprêtre et Jean-Loup Molin

■ **Rédaction**

DPDP/réseau de veille prospective

Rédaction étude : Aurélien Boutaud, Claire Deligant, Grégory Richa

Rédaction fiches focus : Aurélien Boutaud, Claire Deligant, Grégory Richa,

Gauthier Roussilhe

■ **Réalisation**

Nathalie Joly (DPDP)

Illustrations : AdobeStock

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

Introduction aux procédés techniques

DÉFINITIONS DE BASE

Procédés techniques, opérations unitaires et génie des procédés

Un procédé technique (ou process de fabrication) est une succession d'opérations unitaires consécutives qui permettent de transformer des éléments entrants (matières premières, ingrédients et additifs) en éléments sortants (produits finis et co-produits¹). Les procédés techniques peuvent concerner l'élaboration et le recyclage de matériaux, de composants et de produits finis mais aussi la transformation des ressources énergétiques.

Le génie des procédés est la science de la transformation de la matière et de l'énergie à l'échelle industrielle : c'est ainsi l'ensemble des connaissances et des savoir-faire nécessaires à la conception, la mise en œuvre et l'optimisation des procédés industriels de fabrication de produits et de production d'énergie². Il s'applique à tous les procédés dans lesquels la matière change (Villermaux et al., 1993) :

- de forme, d'état d'agrégation ou de dispersion,
- d'état physique ou de propriétés physico-chimiques,
- de nature chimique.

Les ingénieurs en génie des procédés utilisent les mathématiques, la physique et également les sciences chimiques et biologiques pour concevoir et améliorer les procédés industriels qui fournissent les produits et l'énergie de notre quotidien : le chocolat, l'essence, les médicaments, les matières plastiques, l'eau potable, l'électricité, la liste serait sans fin. Le génie des procédés s'occupe aussi du recyclage des effluents, de la diminution des rejets et des déchets et de la réduction de la consommation énergétique industrielle.

On regroupe sous le terme d'opérations unitaires les étapes d'un procédé de fabrication permettant de réaliser un même type d'opération. Le concept d'opérations unitaires permet de simplifier l'étude des équipements face au développement de technologies de plus en plus nombreuses.

On pourra ainsi découper un atelier de production en une succession d'opérations, chacune pouvant être étudiée à l'aide d'outils et de concepts unifiés. Réciproquement, on peut concevoir une nouvelle ligne de fabrication, en assemblant de manière modulaire les opérations unitaires nécessaires à cette fabrication.

Les différentes manières de transformer la matière

Puisque l'objectif d'un procédé technique consiste à transformer la matière, il n'est pas inutile de rappeler qu'il existe deux voies principales de transformation de la matière : la transformation physique et la transformation chimique. Cette distinction ne sera pas utilisée par la suite, car les procédés à l'intérieur de ces voies de transformation sont très divers et peuvent se combiner à l'infini ; elle permet néanmoins d'introduire une distinction utile à la compréhension.

La transformation physique consiste à modifier les caractéristiques physiques d'un matériau, sans en changer les caractéristiques chimiques. Il s'agit par exemple d'en changer la forme ou l'état. Parmi les procédés de mise en forme de la matière, on peut par exemple dissocier ceux qui procèdent :

¹ Voir : <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/procede>

² Les informations fournies dans la section Introduction aux procédés techniques proviennent essentiellement du livre *Les industries de procédés 1 : entreprise durable*, bases managériales et scientifiques aux Éditions ISTE, publié en 2020 sous la direction de Jean-Pierre Dal Pont et Marie Debaçq. Les autres références sont indiquées au fur et mesure de leur apparition dans le texte.

- Par enlèvement de matière : on part d'un bloc de matière et on le taille pour obtenir la forme voulue (ex. taille de silex, usinage de pièces métalliques, décolletage, sciage).
- Par ajout de matière : on part d'un support neutre et on ajoute de la matière pour obtenir la forme désirée (ex. impression 3D).
- Par transformation, ou moulage : on coule de la matière rendue plastique dans un moule, avant solidification (ex. injection plastique).
- Par déformation : on plie un matériau sous la contrainte physique d'une presse (ex. presse à découper, pliage).

Ces techniques ne sont pas exclusives et se combinent souvent. Par exemple, un potier met en forme une pièce à partir d'argile en combinant ajout de matière, enlèvement, transformation, déformation...

La transformation chimique consiste quant à elle à modifier les caractéristiques chimiques d'un matériau, en agissant au niveau moléculaire. Cette transformation peut s'opérer en mobilisant là encore une très grande variété de procédés, dont les plus classiques font intervenir des changements de température (séchage, cuisson, fusion, etc.). Mais de nombreux procédés sont mobilisables, comme la catalyse, la filtration, la distillation ou encore l'électrolyse.

La transformation biologique de la matière fait partie des transformations chimiques, mais elle s'opère par le biais de processus biologiques. Les deux procédés principaux sont la fermentation (aérobie et anaérobie) et la culture cellulaire.

Là encore, les techniques de transformation chimique peuvent se combiner entre elles, ou avec des transformations physiques : par exemple, une fois l'argile mise en forme (transformation physique) le potier va procéder à sa cuisson (transformation chimique). Autre exemple, celui de la métallurgie, qui consiste à créer des métaux et des alliages à partir des minerais extraits dans les mines. Les procédés de fabrication de ces métaux et de ces alliages combinent des transformations chimiques et physiques.

Il existe une troisième voie qui est la transformation nucléaire. Plus marginale dans les procédés industriels, elle ne sera pas abordée dans ce document.

Produits, étapes de fabrication et cycle de vie

Les procédés techniques ont pour finalité la production de produits destinés à satisfaire les besoins d'un client.

Comme indiqué précédemment, les opérations unitaires sont les différentes étapes de fabrication nécessaires à la fabrication des produits. Les étapes de fabrication se comptent par centaines, si bien qu'il est impossible d'en dresser une liste exhaustive, en particulier dans le cadre de ce document. En guise d'illustration, on peut toutefois citer quelques exemples d'étapes de fabrication :

- La distillation,
- Les réactions chimiques, biologiques (culture cellulaire, fermentation, ...) ou enzymatiques (catalyse, ...),
- Les séparations mécaniques fluide/solide (décantation gravitaire, centrifugation, filtration, ...),
- Le formage des métaux (laminage, tréfilage, fluotournage, cintrage, pliage, profilage, forgeage, emboutissage, extrusion, frittage, moulage par injection, moulage au sable, le moulage à la cire perdue, ...),
- L'usinage des métaux (perçage, fraisage, tournage, rectifiage, cisailage, oxycoupage, poinçonnage, électroérosion, ...)
- Les traitements thermiques (ex. cémentation, recuit, revenu, trempe, ...)
- Le formage des plastiques (thermopliage, injection, thermoformage, extrusion, rotomoulage...)
- L'usinage des matériaux ligneux (dégauchissage, rabotage, toupillage, tournage sur bois, ...)
- Le formage des matériaux composites (moulage basse pression, ...)

- Le formage du verre et de la céramique (soufflage, procédé «float», laminage, ...)
- Les assemblages directs (clouage, vissage, ...)
- Les assemblages indirects (coinçage, forçage par compression, ...)
- Etc.

Le cycle de vie d'un produit est l'ensemble des étapes de sa vie. L'analyse du cycle de vie d'un produit permet d'établir son profil environnemental pour l'ensemble des étapes de son cycle de vie : depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit, qui peut être son recyclage, sa mise à la décharge ou son incinération. Les cinq étapes du cycle de vie d'un produit sont l'extraction des matières premières, la fabrication, la distribution, l'utilisation et l'élimination en fin de vie. Ces différentes étapes ont été utilisées dans la suite du document pour dresser un panorama des procédés techniques.

Secteurs de production et typologie d'industrie

L'économie française est divisée en 3 secteurs de production distincts³ :

- Le secteur primaire regroupe l'ensemble des activités dont la finalité consiste en une exploitation des ressources naturelles : agriculture, pêche, forêts, mines, gisements.
- Le secteur secondaire regroupe l'ensemble des activités consistant en une transformation plus ou moins élaborée des matières premières comme les industries de procédés, les industries manufacturières mais également la construction.
- Le secteur tertiaire regroupe les activités de services (commerce, administration, transports, services aux entreprises, services aux particuliers, éducation, ...) qui ne seront pas abordés dans ce document.

L'industrie fait partie du secteur secondaire et regroupe des activités très diverses telles que l'agroalimentaire, l'automobile, les métiers du bois ou encore du papier, la plasturgie, le textile, l'aéronautique, l'électronique, les métiers du pétrole, ou encore la construction. Au sein de l'industrie, on peut distinguer deux types d'industries, les industries de procédés et les industries manufacturières.

Les industries de procédés transforment des matières premières ou l'énergie par voie chimique, biochimique ou physique (chimie, cosmétique, pharmacie, métallurgie, etc.). L'industrie lourde concerne spécifiquement la chimie, la métallurgie et l'industrie des matériaux de construction. Les industries de procédés ont un poids considérable dans l'économie notamment parce qu'elles alimentent les industries manufacturière et la construction.

Les industries manufacturières assemblent et produisent des objets bien identifiés sous la forme de biens intermédiaires et finaux (automobile, aéronautique, électroménager, etc.). Elles font très souvent appel aux industries de procédés : les composants d'une voiture sont fabriqués à partir de matières issues de l'industrie chimique (pare-brise, tableau de bord, sièges, canalisations, gaine de câbles électriques, etc.), le châssis et la carrosserie sont fabriqués à partir de matières issues de l'industrie métallurgique, etc.

³ Selon les sites <https://www.entreprises.gouv.fr/> et <https://www.vie-publique.fr/fiches>

RÉTROSPECTIVE ET GRANDES TENDANCES EN COURS

Les procédés de transformation ont évolué dans le temps au gré de l'évolution des techniques, qui elles-mêmes ont beaucoup interagi avec l'évolution des sociétés (Cresswell, 1996). Si on laisse de côté le cas particulier de l'alimentation, on peut ainsi faire remonter les premiers procédés de transformation de la matière à 2,6 millions d'années avec le début de la taille de la pierre, le broyage ou encore le polissage. Il s'agit alors plutôt de techniques de transformation physique. La maîtrise et l'utilisation du feu vont permettre ensuite la généralisation de procédés mettant en œuvre une transformation également chimique. À partir du néolithique, il y a 15 000 ans environ, la terre cuite et la poterie vont ainsi apparaître, puis l'invention de l'agriculture va générer la création de nouveaux outils, jusqu'à la maîtrise de la métallurgie avec l'âge du bronze (20^e siècle av. JC), puis l'âge du fer (9^e siècle av. JC). Il est intéressant de noter au passage que ces âges sont aujourd'hui nommés en référence à un matériau dont la production a été permise par la maîtrise de procédés techniques de plus en plus complexes.

La révolution industrielle va considérablement accroître et accélérer le nombre, la diversité et l'intensité d'usage des procédés de transformation. Cet accroissement exponentiel s'accompagne d'une complexification de plus en plus grande des procédés qui, en particulier dans la seconde moitié du 20^e siècle, est allée de pair avec une spécialisation et une plus grande concentration capitalistique.

Le revers de la médaille est une plus faible autonomie des États, qui prennent le risque d'une dépendance accrue à l'égard de certains matériaux et procédés, pourtant devenus stratégiques, notamment pendant la période de mondialisation des échanges opérée à la fin du 20^e siècle.

Dans le même temps, l'efficacité et la complexité toujours accrue des procédés se sont accompagnées d'une augmentation exponentielle des flux de matière et d'énergie, mais aussi des impacts liés à ces flux (extraction de matières, rejets de polluants, atteintes aux milieux, etc.), ce qui correspond à une période que les historiens de l'environnement appellent la « grande accélération » (McNeil et al., 2016). La complexification des procédés se traduit également par une plus grande difficulté à recycler certains matériaux (Bihouix, 2014).

Le tournant du 21^e siècle est marqué par au moins deux transitions majeures et potentiellement conflictuelles, qui entrent en résonance avec cette histoire des sciences et des techniques : la transition numérique et la transition écologique. De nombreux débats interrogent leur compatibilité, puisque le numérique participe en grande partie de la continuation de l'accélération et de la complexification susmentionnées, tandis que l'écologie s'impose comme un facteur potentiellement limitant de la grande accélération (Pochet, 2017). Dans tous les cas, ces deux transitions impactent et sont impactées par quasiment tous les secteurs d'activité mettant en jeu des procédés de transformation de la matière.

Une lecture assez rapide et transversale de la presse généraliste et spécialisée permet par ailleurs de se donner une idée des motivations qui animent aujourd'hui les innovations de procédés. Parmi ces nombreux procédés se présentant comme innovants, il est difficile de juger de ce qui relève de l'innovation susceptible d'avoir des effets massifs et ce qui relève du marketing. En revanche, les motivations avancées par leurs promoteurs sont intéressantes à analyser et font apparaître en particulier deux tendances :

1. Les motifs traditionnels d'innovation, à savoir l'efficacité et les gains économiques (productivité, coûts, performance, etc.) sont assez rarement mis en avant, alors qu'ils ont été moteurs jusqu'à présent dans l'histoire des techniques. La numérisation, qui est pourtant au cœur de l'évolution de nombreux procédés et facteur de nombreux gains de productivité, est également assez peu mise en avant.

2. Les motifs aujourd'hui avancés pour légitimer une innovation relèvent très souvent de la transition écologique et énergétique (circularité, recyclabilité, biosourcing, énergies renouvelables, efficacité...) et, peut-être dans une moindre mesure, d'un accroissement de l'autonomie et de la relocalisation de la production (circuits courts, réindustrialisation, etc.).

La lecture de ces argumentaires laisse ainsi penser que, aux yeux de ceux qui innovent aujourd'hui, la transition numérique pourrait servir à relever les défis de la transition écologique. C'est également la position de la plupart des acteurs économiques⁴.

Enfin, pour compléter ce rapide panorama des tendances, on peut également remarquer que de nombreux observateurs pensent au contraire que la numérisation est devenue un obstacle à la transition écologique, et en particulier à l'effort de sobriété que cette dernière impose. Ils préconisent un ralentissement des flux de matière et d'énergie qui passerait notamment par une simplification des procédés techniques. Ces low-techs, ou technologies de basse intensité, auraient par ailleurs l'avantage de pouvoir être plus facilement appropriées par les citoyens et pourraient être plus facilement relocalisées (Bihouix, 2014).

Bien que pouvant paraître encore marginale, cette tendance gagne aujourd'hui en popularité et, comme nous allons le voir à travers certaines illustrations, elle commence à prendre des formes très concrètes, qui combinent souvent innovation technique et innovation sociale.

⁴ On peut lire par exemple la position du gouvernement français à ce propos <https://www.ecologie.gouv.fr/numerique-comme-levier-transition-ecologique> ou encore celle de l'UE à travers l'étude *Toward a Green and Digital Futur : Key requirements for successful twin transitions in the European Union*.

Panorama des tendances sur les procédés techniques

Pour comprendre l'impact des évolutions de procédés sur la consommation de matériaux actuelle et à venir, nous avons établi un panorama des procédés techniques (voir annexe). Pour ce faire, nous avons listé les grands procédés techniques à l'appui des cinq étapes du cycle de vie d'un produit. Classer les procédés techniques par étapes du cycle de vie d'un produit permet une meilleure prise en compte de la matérialité des procédés et apporte une vision transversale des procédés, plutôt qu'un classement par type d'industries ou par secteurs d'activités.

Nous avons ensuite décrit les procédés techniques (actuels et à venir) selon leurs caractéristiques organisationnelles et matérielles : quelle intensité technologique ? Quelle complexité organisationnelle ? Quel niveau de mise en œuvre et de déploiement ?

Une dernière étape a consisté à analyser les procédés techniques en fonction de leurs impacts sur les enjeux de productivité, souveraineté, et transition écologique. Cette dernière étape nous a permis de mettre en exergue les procédés problématiques vis-à-vis de ces enjeux et ceux ayant un impact positif sur ces enjeux.

Au vu de la quantité des procédés techniques existants et en cours de développement, ce panorama ne se veut pas exhaustif mais illustratif des grandes tendances en cours.

EXTRACTION DES MATIÈRES PREMIÈRES

Les matières premières peuvent se répartir en deux catégories :

- les ressources non renouvelables telles que les ressources minérales, les ressources géosourcées (argile, calcaire, etc.) et les ressources fossiles (charbon, pétrole et gaz) ;
- les ressources renouvelables végétales (bois, lin, coton, chanvre, etc.) et animales (cuir, laine, crin de cheval, etc.).

On peut distinguer une troisième catégorie de ressources, celles issues des déchets non exploités dans le cadre de l'organisation linéaire des activités industrielles (mines urbaines¹, résidus organiques naturelles et industriels, etc.).

Les procédés techniques qui soutiennent l'extraction et l'exploitation des ressources diffèrent en fonction de ces trois catégories.

L'extraction des ressources non renouvelables

Les procédés d'extraction des ressources non renouvelables sont de plus en plus efficaces et permettent d'accéder à des ressources inexploitées auparavant (exploitation marine par exemple). Cependant, ces techniques nécessitent toujours plus d'énergie au fur et à mesure que les ressources sont moins accessibles.

Malgré les progrès techniques et les mesures de protection de l'environnement plus contraignantes, l'extraction des ressources non renouvelables reste problématique car les procédés utilisés impactent écologiquement et socialement les milieux concernés : perte de biodiversité, pollutions chimiques, droits des autochtones, droits des enfants, etc.

En France, une relance des activités minières est envisagée pour réduire la dépendance à d'autres États. C'est le cas par exemple avec le projet d'ouverture d'une mine de lithium dans l'Allier par Imerys.

Une alternative à l'extraction des minéraux est la fabrication de minéraux synthétiques. Imerys développe ainsi des cristaux de synthèse tels que l'alumine, le zircon et le silicate à l'état pur. Le procédé repose sur la synthèse hydrothermale, connue depuis le 19^e siècle, mais perfectionnée à l'ère de la technologie des fluides supercritiques, avec des précurseurs dilués dans de l'eau à 300 bars de pression et 600 degrés. Le procédé de synthèse n'exclut pas l'extraction : il faut extraire des sels de silicate pour fabriquer le silicate parfait.

L'exploitation des ressources renouvelables

Le développement de l'agriculture et de l'exploitation forestière intensives ont permis d'accroître considérablement la productivité des parcelles. Cependant, ces procédés intensifs impactent fortement les écosystèmes du fait des monocultures et de l'emploi d'engrais de synthèse et de pesticides.

Les alternatives basses technologies à ces procédés intensives sont des modes de culture extensif tels que l'agroécologie et l'agroforesterie qui apportent des solutions concrètes à la perte de biodiversité, aux perturbations des cycles de l'azote et du phosphore et aux pollutions chimiques avec l'avantage d'être des modes de culture déjà matures. Aujourd'hui, les freins au développement de ces procédés ne sont pas tant techniques que juridiques (Lombardon et al., 2018) et organisationnels afin de mener cette transition.

L'exploitation des ressources locales peut aussi passer par la mise en œuvre de procédés qui modifient leurs propriétés, tels que la sélection génomique. Dans un autre registre, dans la filière bois, le projet Woodtech a pour objectif de développer un procédé innovant permettant de renforcer la résistance à l'humidité du bois français dans un objectif de réduire l'importation des bois tropicaux dans la construction en valorisant les bois locaux. Ce procédé consiste à produire une réaction d'estérification dans des conditions particulières de température et de pression.

On peut observer que les ressources naturelles d'origine animale sont de moins en moins exploitées depuis le début du siècle dernier au profit des ressources pétrochimiques. L'exemple de l'élevage ovin est caractéristique de ce phénomène. Jusque dans les années 1950, la graisse des moutons était utilisée pour fabriquer des chandelles et du savon, les os pour fabriquer de la colle et la fumure pour enrichir les sols. Quant à la laine, elle est aujourd'hui délaissée alors que ce coproduit des élevages ovin français pourrait être avantageusement utilisé en remplacement des matières synthétiques dans les secteurs du textile et de l'ameublement (voir le focus sur les procédés de récolte et de lavage de la laine).

Les ressources issues de l'élevage bovin telles que le cuir pourraient être amenées à décroître dans le futur du fait d'une part des considérations en faveur de la souffrance animale et d'autre part de la contribution importante de l'élevage bovin dans les émissions de méthane, un puissant gaz à effet de serre. En effet, près de 70% des émissions de méthane sont dues aux bovins en France du fait d'un processus de digestion particulier - la fermentation entérique - et de la gestion de leur déjection (The Shift Project, 2022). D'autres procédés de fabrication de cuirs sont déjà disponibles à partir de peaux animales (agneaux, moutons, chèvres, poissons) mais aussi à partir de résidus végétaux. C'est le cas par exemple de la [tannerie lctyos](#) qui propose des cuirs marins issus de peaux de poissons voués à la destruction ou encore de [La Tannerie Végétale](#) qui développe un cuir végétal fabriqué à partir d'extraits de graines et des additifs végétaux.

L'exploitation des déchets, nouvelles mines d'or des années à venir ?

Les enjeux de préservation des ressources mettent sur le devant de la scène des procédés qui permettent d'utiliser des matières considérées habituellement comme des déchets. Ces procédés peuvent être déployés à grande échelle ou développés spécifiquement dans le cadre d'initiatives locales. Des acteurs comme Atelier Luma ou encore [Neo-Eco](#) identifient les matières et les déchets d'un territoire mobilisable localement dans un objectif de re-territorialisation des savoirs faire et de création de valeur. Atelier Luma développe ainsi des projets dans la région d'Arles autour de matériaux tels que la laine, le sel, les plantes invasives ou encore la paille de riz. De son côté, Neo-Eco accompagne ses clients dans leur démarche d'identification de gisements locaux.

La section consacrée à l'étape de fin de vie des produits détaille des exemples de procédés permettant la valorisation de déchets.

L'exploitation de nouvelles sources énergétiques ?

Cette étude se concentre sur les procédés visant l'extraction de matériaux. Pour autant, il ne faut pas oublier d'autres procédés utilisant des matériaux innovant en vue de produire de l'énergie.

Dans la filière énergétique, un [pilote de centrale osmotique dans le delta du Rhône est en cours de construction](#) par Compagnie nationale du Rhône (CNR) et Sweetch Energy. Il permettra de produire de l'électricité en captant l'énergie dégagée naturellement par la rencontre de l'eau douce et de l'eau salée à l'embouchure des fleuves. Ce procédé utilise une membrane semi-perméable qui sépare l'eau douce et l'eau de mer. Ce gisement représente 30.000 TWh inexploités à l'échelle de la planète.

FABRICATION

La fabrication regroupe des procédés aux profils très différents. Il est intéressant ici de distinguer les procédés de l'industrie de procédés de ceux de l'industrie manufacturière.

Les procédés de l'industrie de procédés

Les procédés de l'industrie lourde : chimie, métallurgie et ciment-béton

L'industrie dans sa globalité représentant 20% des émissions de gaz à effet de serre en France. Au sein de l'industrie, l'industrie lourde (chimie, métallurgie et ciment-béton) émet 75% des émissions de gaz à effet de serre (*The Shift Project, 2022*). Afin de limiter le poids de l'industrie lourde dans les émissions de gaz à effet de serre de la France, plusieurs innovations technologiques de rupture sont attendues. Ces innovations viendraient en complément des améliorations de procédés (efficacité énergétique, substitution des combustibles fossiles, etc.) et d'usage (sobriété dans les autres secteurs afin de réduire la demande auprès de l'industrie lourde).

On peut ainsi citer dans le domaine des matériaux de construction, la rupture qui viendrait de la révolution coordonnée du béton et des façons de bâtir. Le béton fait ainsi l'objet d'une importante recherche et développement pour diminuer son impact carbone (le béton bas carbone et les préfabriqués en béton produits à partir de déchets de construction et de démolition recyclés). Des alternatives au béton existent aussi : le béton de chanvre, la terre crue qui est une alternative basse technologie ne nécessitant pas de cuisson, les matériaux fibres-ciments et le bois¹.

Pour la chimie et l'acier, la « rupture hydrogène » permettrait de révolutionner les procédés, à condition que l'hydrogène provienne d'électricité décarbonée. Ainsi, pour la sidérurgie, la réduction du fer pourrait se faire par l'hydrogène, procédé relâchant de l'eau plutôt que du dioxyde de carbone lors du traitement des oxydes de fer (*The Shift Project, 2022*). Dans la chimie, l'hydrogène pourrait permettre de fabriquer des engrais azotés, en remplacement du procédé Haber-Bosch qui consiste à fabriquer de l'ammoniac à partir de gaz naturel comme source de dihydrogène. Toutefois, ces procédés ne sont pas encore matures et ne devraient pas l'être avant 2035 pour la production d'acier et 2045 pour la production d'ammoniac.

Dans le domaine de la chimie, la plupart des procédés utilisent des hydrocarbures fossiles. Environ 60% de ses émissions directes et indirectes sont liées au vapocraquage et à la distillation de l'éthane et du naphta en ses dérivés (éthylène, propylène et autres aromatiques), les précurseurs chimiques de la fabrication des plastiques. Des bioraffineries sont en cours de développement afin de produire des plastiques, des huiles essentielles, des colles, des savons et des détergents à partir de biomasse (Muench et al., 2022).

Toujours dans l'industrie lourde, des procédés de capture et de stockage du CO₂ (CSC) sont également en cours de développement avec déjà une vingtaine de projets opérationnels dans le monde à l'échelle industrielle. Ces technologies ont pour objectif de capter le CO₂ émis en cours de production afin de l'enfouir dans des couches géologiques profondes. Le potentiel en France reste cependant limité².

Les bioprocédés

Au sein de l'industrie de procédés, de nouveaux procédés sont développés afin de produire des matières premières par voie biologique. Les exemples de nouveaux bioprocédés sont nombreux et concernent des secteurs variés. Ces procédés s'appuient sur la culture de bactéries, d'algues et même de champignons. Citons le cas d'[Amoéba](#) qui développe des amibes ayant la capacité de désinfecter les tours réfrigérantes en remplacement des produits chimiques et nocifs pour l'environnement utilisés habituellement. Un autre exemple est le projet [Bio impulse](#) qui vise à développer un procédé de fabrication industrielle d'une résine ne contenant pas de substance préoccupante par la fermentation de matière première issues de la biomasse et ce, à un coût inférieur à son équivalent pétrosourcé.

1. *Les focus techniques de l'ingénieur. Des matériaux innovants pour une construction plus durable*. Novembre 2021.

2. Voir l'avis technique de l'ADEME à ce sujet émis en juillet 2020 : [Le Captage et Stockage géologique du CO₂ \(CSC\) en France, un potentiel limité pour la réduction des émissions industrielles](#)

Les procédés de l'industrie manufacturière

Dans l'industrie manufacturière, les procédés sont très variés. Certains sont spécifiques à un secteur d'activités, quand d'autres peuvent être communs à plusieurs secteurs d'activités, comme c'est le cas de l'impression 3D (voir encadré).

L'IMPRESSIION 3D : Axe de création de nouveaux produits et procédés de fabrication

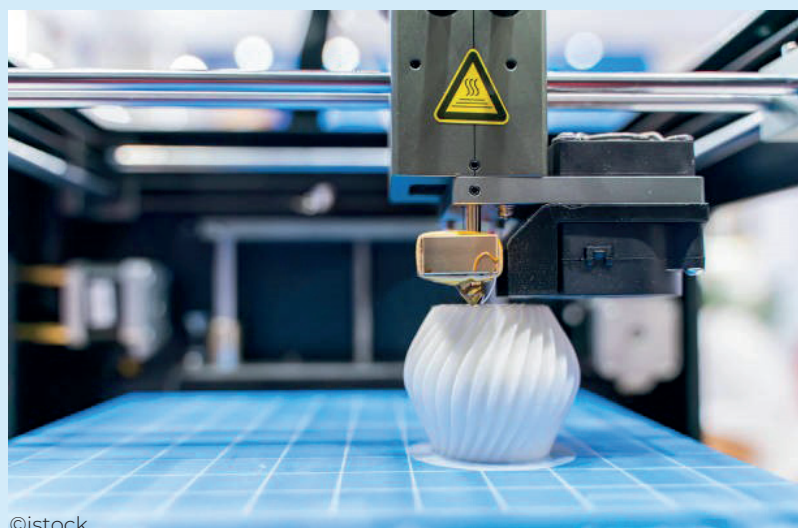
L'impression 3D, également connue sous le nom de fabrication additive, est une méthode innovante permettant de créer des pièces en empilant de fines couches successives de matières. Cette technologie offre une grande liberté de conception, facilitant ainsi la réactivité et la fabrication sur mesure pour répondre aux besoins spécifiques de chaque utilisateur.

Il existe trois principaux procédés de fabrication 3D : la stéréolithographie (SLA), qui repose sur la polymérisation de résines liquides sous l'effet de la lumière et de la chaleur ; le frittage sélectif par laser (SLS) qui chauffe et fusionne des poudres de plastique ou de métal à l'aide d'un laser puissant ; et la technique de dépôt de filament en fusion (FDM), qui consiste à déposer du plastique fondu couche par couche à l'aide d'une extrudeuse pour construire l'objet physique.

Bien que l'attention des médias n'ait commencé à se focaliser sur la technologie de l'impression 3D que dans les années 2000, les premiers procédés de fabrication 3D ont en réalité été développés pour la première fois dans les années 1980 dans le but de faciliter le prototypage rapide. Depuis, les technologies d'impression 3D n'ont cessé de connaître des innovations et des évolutions, devenant ainsi de plus en plus sophistiquées et précises. Par exemple, en 2020, Constellium a lancé une offre de poudre d'aluminium haute performance pour la fabrication additive en partenariat avec Poly-Shape, une filiale du groupe AddUp et leader dans les procédés de fabrication additive métallique. De même, en 2021, 3Deus Dynamics a élargi les possibilités de l'impression 3D avec une technologie hybride protégée par deux brevets, permettant l'utilisation de tous les matériaux disponibles sur le marché sans reformulation ni limite de géométrie.

Ces avancées constantes dans les technologies d'impression 3D ouvrent à ce procédé des applications dans de nombreux secteurs, que ce soit pour accélérer les phases de prototypages (en évitant le développement de moules spécifiques) ou réaliser des pièces spécifiques et sur mesures. Par exemple, dans les industries aéronautique et automobile, elle permet la fabrication de composants complexes, légers et optimisés à moindre coût et avec une faible perte de matière. Dans le domaine médical, elle est utilisée pour créer des prothèses et des implants personnalisés adaptés aux besoins spécifiques de chaque patient. L'impression 3D s'incarne également dans différents modes industriels : de la « micro-usine » locale pour des séries unitaires et sur mesure (fabrication de maison en impression 3D, ou de chaussures en arrière-boutique ou encore de prothèses à partir de déchets plastiques collectés localement) à la ferme industrielle pour des moyennes séries dans la plasturgie ou pour des applications militaires.

En synthèse, l'impression 3D est une technologie qui permet de repenser les méthodes de conception et de fabrication d'objets, avec une production à partir de matières vierges ou sourcées localement. Initialement utilisé pour accélérer et réduire les coûts des phases de prototypage, ce procédé s'étend progressivement à des applications très spécifiques (production de pointe et/ou sur mesure), à de la micro-fabrication locale (agilité, autonomie) et à de la moyenne série (fermes d'impression 3D). L'impression 3D est un procédé en constante évolution avec encore des limites technologiques sur lesquels de nombreux laboratoires travaillent : limitation dans les matériaux utilisables, limites géométriques et limites dans les états de surface des pièces. Enfin les temps de cycle fabrication des pièces peut être encore élevé pour de la fabrication en série par rapport à l'injection plastique par exemple.



©istock

Les innovations de procédés dans l'industrie manufacturière répondent à de multiples objectifs : augmentation de la production, réduction des consommations énergétiques et de matières, substitution des matières problématiques par des matières biosourcées et/ou recyclées, augmentation de la durée de vie et de la recyclabilité des produits.

Dans certains secteurs d'activités, des procédés sont voués à disparaître du fait de l'évolution de la réglementation. C'est le cas par exemple de la fabrication des moteurs thermiques ou des plastiques à usage unique. D'autres procédés sont simplifiés, dans une logique *Low-Tech*. Dans le secteur de l'automobile, l'exemple de [Gazelle Tech](#) est intéressant avec seulement dix éléments à imbriquer contre 300 dans une voiture classique.

Les procédés des filières électronique et photovoltaïque font l'objet de focus spécifiques.

TRANSPORT & DISTRIBUTION

Les émissions de gaz à effet de serre du fret correspondent à 9% des émissions nationales (*The Shift project*, 2022). Les évolutions technologiques en cours sont l'électrification des camions (batterie électrique et hydrogène) en complément d'évolution d'usage (report modal vers le transport fluvial et le train, développement de la cyclologistique en ville, etc.).

Malgré les progrès techniques attendus dans les biocarburants (carburants de seconde génération) qui devraient permettre de meilleurs rendements que les techniques actuelles, la concurrence de l'usage des terres ne devrait pas permettre leur déploiement à l'usage du fret (*The Shift project*, 2022).

Concernant la distribution, cette étape ne sera pas développée dans le cadre de ce document car elle mobilise peu de procédés techniques.

UTILISATION

Dans une industrie linéaire, la durée d'utilisation d'un produit est souvent relativement courte au regard de sa durée sous forme de déchets. Dans le cadre de la consommation et la production de masse caractéristiques des dernières décennies, la recherche de productivité et de rentabilité a eu pour effet la baisse de la qualité des produits et de leur durée de vie de fonctionnement.

Des innovations visant à allonger la durée de vie des produits vont à l'inverse de l'obsolescence programmée. L'[exemple du pneu Michelin increvable](#) illustre bien cette tendance. Cette innovation issue de près de 10 ans de recherche permettrait d'augmenter par trois la durée de vie d'un pneu par rapport à un pneu classique et de réaliser des économies considérables de matière.

Avec le développement de l'industrie circulaire, la seconde main, le reconditionnement et le remanufacturing sont des procédés clés pour allonger la durée de vie des produits. Les procédés de remanufacturing font l'objet d'une fiche procédé spécifique (voir Focus sur quelques procédés clés).

FIN DE VIE

La fin de vie des produits peut se dérouler de trois manières différentes :

- La valorisation matière qui se définit par l'utilisation de déchets en substitution à d'autres matières ou substances.
- La valorisation énergétique : après démantèlement, les matières premières ne pouvant faire l'objet d'une valorisation matière sont incinérées afin de produire de l'énergie (par exemple dans les cimenteries).
- L'élimination des déchets est l'étape ultime quand les autres voies ne sont pas possibles.

La valorisation matière

La valorisation matière est bien connue dans le cadre du recyclage du verre et des métaux car ces procédés sont largement déployés depuis les années 1970. Ces procédés permettent de diminuer la consommation énergétique et les émissions de CO₂ comparativement à l'utilisation de verre ou de métaux vierges.

Les procédés de recyclage rencontrent généralement des limites qui peuvent être résumées de la façon suivante :

- Une consommation énergétique qui reste élevée (même si elle est moindre que celle nécessaire à la fabrication de la matière vierge) ;
- La nécessité d'ajouter des produits chimiques nocifs pour l'environnement ;
- La nécessité d'incorporer un taux minimum de ressources vierges pour réussir à reconstituer une matière aux mêmes propriétés que la matière neuve ;
- Dans bien des cas, le recyclage ne permet pas de fabriquer des produits équivalents avec les matières premières recyclées (sous-cyclage) ;
- Les bénéfices de l'utilisation de matières premières recyclées sont quasiment nuls sur l'épuisement du stock de la ressource en question dans un contexte de croissance de la consommation (Labbé, 2016).

La recherche dans ce domaine y est soutenue, notamment pour tenter de répondre aux limites mentionnées.

- C'est le cas notamment pour le recyclage du plastique qui comporte des verrous technologiques forts. Les procédés de recyclage chimique traditionnel par craquage ou par pyrolyse étant très énergivores, la recherche s'intensifie autour des procédés de dépolymérisation qui consistent à ramener le plastique à l'état de monomères, soit chimiquement, soit par voie enzymatique. Par exemple, la société [Recyc-Elit](#) développe un procédé de dépolymérisation du PET (polyéthylène téréphtalate) dans des conditions de chauffage très modéré et à pression ambiante. Autre exemple, la société [Carbios](#) qui a développé un procédé de recyclage enzymatique mettant en œuvre une enzyme capable de dépolymériser de façon spécifique le PET contenu dans différents plastiques ou textiles.
- C'est le cas également dans le domaine des métaux. La société [Mecaware](#) a ainsi développé un procédé permettant d'extraire, de manière sélective, les métaux et terres rares issus des déchets technologiques. Ce procédé est moins polluant, moins cher et moins énergivore que les procédés actuels et il pourrait être utilisé par les gigafactories de batteries pour les véhicules électriques. Quant à la start-up [MagREESource](#), elle va ouvrir un site pilote de recyclage d'aimants à base de terres rares à Grenoble.
- Concernant les déchets organiques, de nouveaux procédés permettent de valoriser des matières inexploitées jusqu'à présent et même dans certains cas de trouver des substituts aux matières premières non renouvelables.
- Une solution déjà bien maîtrisée est le compostage et la méthanisation afin de produire du biogaz. Ces procédés nécessitent d'être au plus proche des déchets. Les unités de traitement sont donc déployées de manière territorialisée.

- La pyrolyse des résidus de bois et de culture sèche permet de fabriquer du [biochar](#) qui peut être utilisé pour fertiliser les sols et qui a l'avantage de séquestrer le carbone. Ce procédé, prometteur, pourrait être déployé rapidement.
- Les bardages en bois composite de la société [Neolife](#) sont un exemple de substitution intéressant. Les déchets forestiers et de scierie sont réduits en poudre et traités par des industriels qui travaillent d'ordinaire des produits pétroliers pour en faire des billes de plastique. Les billes obtenues après élimination des composants amidonnés et ajout d'un liant et d'un colorant entrent dans un procédé d'extrusion duquel sortent des lames de bardage qui vont pouvoir s'emboîter comme des legos à fixer sur les murs des bâtiments neufs ou en rénovation.
- Certains procédés sont déployés localement, à proximité des gisements, parfois dans des micro-usines comme [Wasterial](#) qui a développé un procédé permettant de recycler les coquilles de moules ou encore [Maltivor](#) qui transforme la drêche de bière en farine.

Valorisation énergétique et élimination des déchets

La valorisation énergétique, l'incinération et l'enfouissement sont des procédés ayant un impact important sur les écosystèmes (traitement des lixiviats pour le premier et des fumées pour le deuxième et le troisième). La [thermolyse](#) est un procédé mature qui pourrait permettre de compléter avantageusement l'offre de traitement des déchets ménagers.

Principales sources utilisées

- Ademe, 2021. *Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat*. Éd. Ademe, Angers. - <https://bibliothèque.ademe.fr/recherche-et-innovation/5072-prospective-transitions-2050-rapport.html>
- Bihoux P., 2014. *L'âge des low tech. Vers une civilisation technologiquement soutenable*. Le Seuil, Paris.
- Cresswell R., 1996. *Prométhée ou Pandore ? Propos de technologie culturelle*. Éditions Kimé, Paris.
- Dal Pont JP. et Debacq M., 2020. *Les industries de procédés 1: entreprise durable, bases managériales et scientifiques*. Éditions ISTE.
- De Lombardon A. & Grimonprez B., 2018. *Les freins juridiques à la transition agro-écologique*. Pour, 234-235, 279-285. - <https://doi.org/10.3917/pour.234.0279>
- Labbé J. (2016). *Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux*. Annales des Mines - Responsabilité et environnement, 82, 45-56. - <https://doi.org/10.3917/re1.082.0045>
- Mc Neil J.R., Engelke P., 2016. *The Great Acceleration : An Environmental History of the Anthropocene since 1945*. Belknap Press. Harvard.
- Muench et al., 2022. *Toward a Green and Digital Future : Key requirements for successful twin transitions in the European Union*. A Science for Policy report by the Joint Research Centre (JRC), the European Commission's science and knowledge service.
- Pochet P., 2017. *Numérique et écologie : comment concilier ces deux récits de l'avenir ? L'économie politique*, n°73, pp. 101-112
- The Shift Project, 2022. *Le plan de transformation de l'économie française*. Édition Odile Jacob.
- Villermaux et al., 1983. *L'actualité chimique*. Page 19 à 27.

Focus sur quelques procédés clés

Pour comprendre complètement ce qui se joue aujourd'hui autour des procédés et de leur évolution, il faut entrer dans le détail des filières afin d'appréhender cette complexité.

Par exemple, la production des éléments qui sont au cœur de la transition numérique et de la transition énergétique, comme une puce électronique ou un panneau photovoltaïque, nécessite de faire interagir jusqu'à plusieurs dizaines de procédés et d'entreprises, le plus souvent répartis sur plusieurs sites de production et d'assemblage dans différents pays ou continents. Ces produits de haute technologie particulièrement stratégiques sont donc très mondialisés, ce qui rend la plupart des États extrêmement vulnérables en cas de ruptures des chaînes d'approvisionnement, comme celles qui ont eu lieu lors de la pandémie de Covid-19. L'étude de cas des procédés clés de la filière électronique (focus 1) et de la filière photovoltaïque (focus 2) permet de comprendre plus finement ces jeux de dépendance, d'identifier les procédés particulièrement stratégiques mais aussi, parfois, d'envisager les innovations de procédés qui pourraient permettre de changer la donne.

D'un autre côté, de plus en plus de voix suggèrent que la transition écologique et le retour à une certaine autonomie passent aussi par une remise en question de la course en avant technologique. Les tenants du low tech imaginent par exemple des technologies plus simples et de basse intensité énergétique, qui peuvent par exemple passer par la réhabilitation et la modernisation de filières largement abandonnées comme celle de la laine (focus 3), ou encore le développement des procédés de remanufacturing dans l'industrie manufacturière (focus 4).

Cette liste très limitée de filières permet de comprendre comment les procédés s'articulent et de quelle manière l'innovation peut être mobilisée autour des grands enjeux actuels de la transition numérique et de la transition écologique (matières biosourcées, réemploi, énergies renouvelables, etc.).

Les procédés de lithographie dans la filière électronique Gauthier Roussilhe.....	21
Les procédés de fabrication de la filière photovoltaïque Aurélien Boutaud.....	31
Les procédés de récolte et de lavage de la filière laine Claire Deligant.....	37
Les procédés de remanufacturing dans l'industrie manufacturière Grégory Richa.....	43



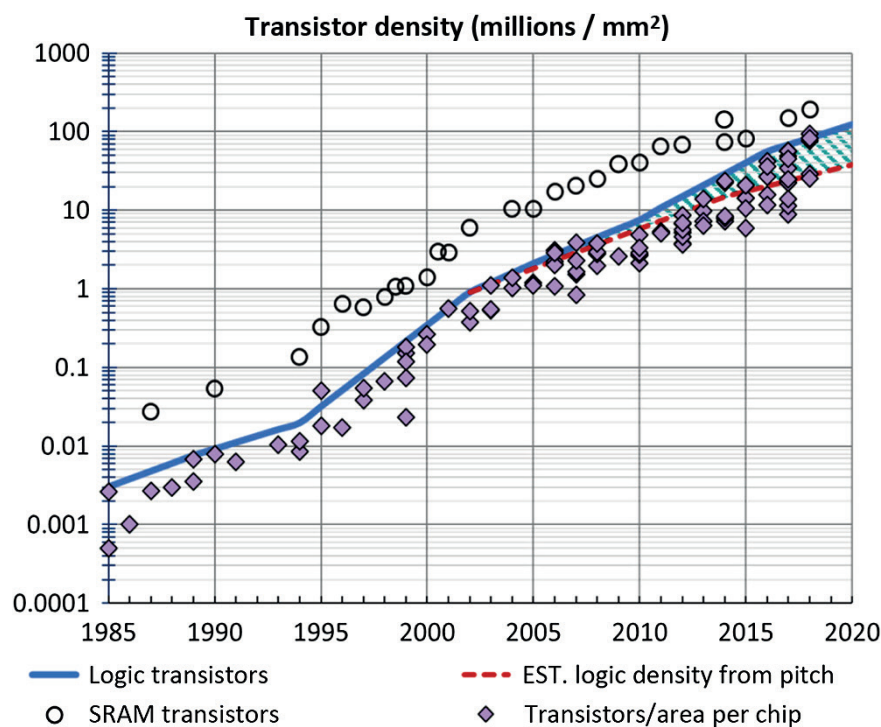
LES PROCÉDÉS DE LITHOGRAPHIE DANS LA FILIÈRE ÉLECTRONIQUE



En résumé – Les procédés de photolithographie sont sûrement les procédés industriels les plus avancés sur Terre, permettant de graver des transistors à quelques dizaines d'atomes de distance. Ils sont les clés de voûte d'une course à la puissance de calcul qui anime la filière électronique et l'informatique moderne depuis 50 ans. Ce sont aussi des procédés très complexes qui font intervenir des niveaux d'investissement colossaux, des milliers de sous-traitants, des matériaux et des chaînes d'approvisionnement globalisées. Deux entreprises se partagent le marché aujourd'hui alors que les limites physiques de ces procédés se rapprochent, obligeant le secteur à trouver de nouvelles voies.

La filière électronique produit chaque année un nombre phénoménal de composants de nature très diverse. Parmi eux, un type de composant, le circuit intégré, a pris une place prépondérante pour augmenter les capacités de calcul informatique et de mémoire des appareils électroniques et numériques. Cette augmentation est due à la capacité industrielle à intégrer de plus en plus de transistors, l'unité de base des composants actifs comme les circuits intégrés, sur la même surface.

En 1975, la fameuse loi de Moore établit en substance que le nombre de transistors par puce doublerait tous les 1,5 ou 2 ans et que le coût d'une chaîne de fabrication doublerait tous les 3 ans (Rieger). La capacité à faire toujours plus petit a donc été cruciale pour réduire les coûts par puce, c'est-à-dire mettre toujours plus de transistors par millimètre carré. Dans ces chaînes de fabrication extrêmement complexes et nécessitant de lourds investissements, un procédé est clé pour réduire toujours plus la taille des transistors : la lithographie.



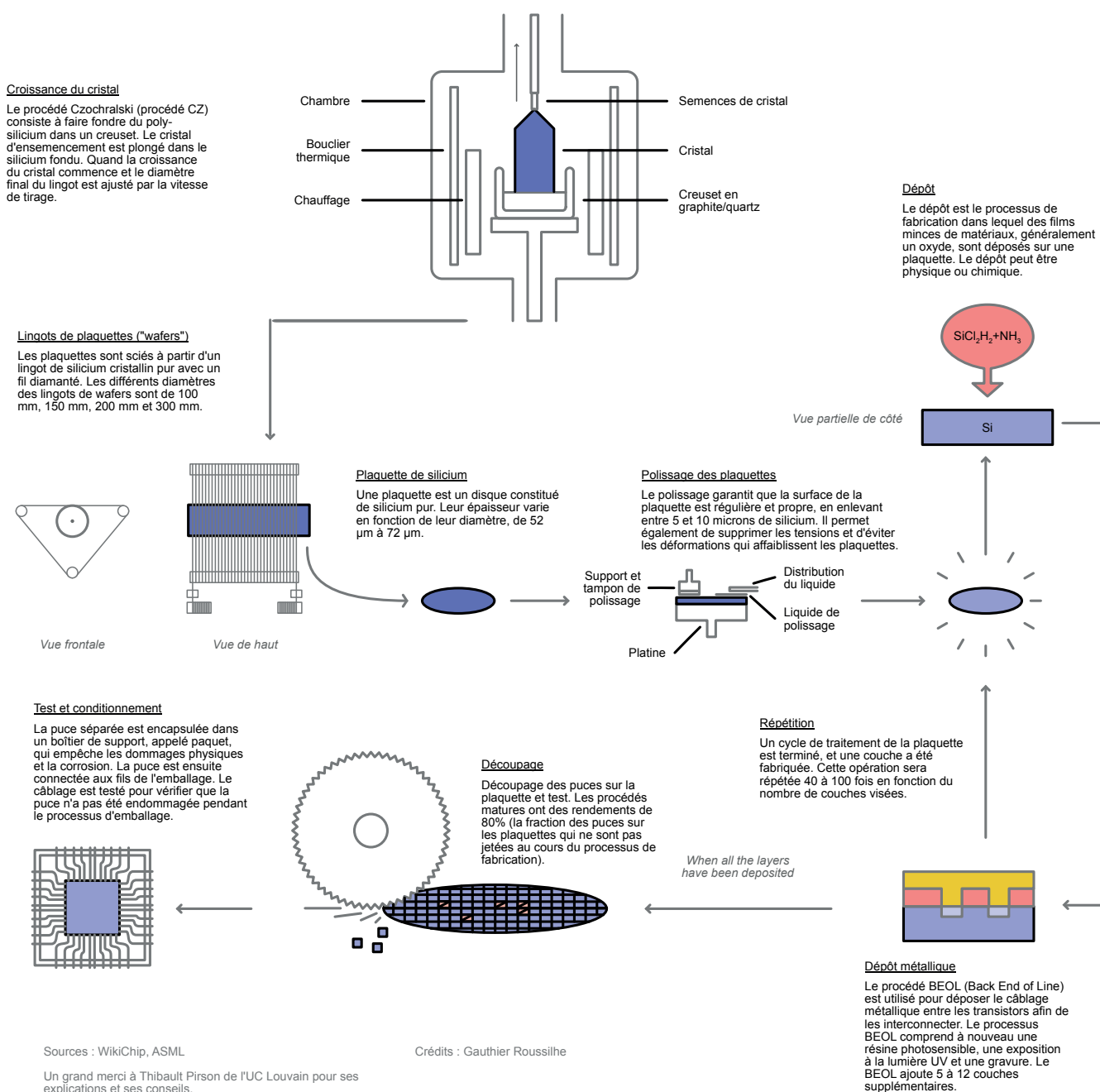
La densité des transistors logiques (ligne continue) a augmenté en moyenne de 2 par génération. La ligne pointillée est la densité estimée à partir de la seule mise à l'échelle. Les densités de transistors SRAM, dérivées de la zone des cellules binaires, supposent 6 transistors par cellule. Les points de données sur la densité des transistors ont été obtenus en divisant le nombre total de transistors déclarés par la superficie déclarée.

LES PRINCIPALES ÉTAPES

Un site industriel produisant des circuits intégrés et faisant usage de procédés de photolithographie a besoin de différents flux pour fonctionner : de l'énergie (gaz et électricité), de l'eau, des produits chimiques et du silicium. Ce même site produira nécessairement des rejets atmosphériques et aqueux, des déchets et autres effets sur son environnement local. Par exemple, une usine de Nanya, fabricant taiwanais de composants mémoire, a consommé en 2020 713 GWh d'électricité, 3,34 millions de m³ d'eau, 6260 millions de m³ de gaz de procédés, 53593 tonnes de produits chimiques pour produire 826 000 *wafers* (voir définition ci-après).

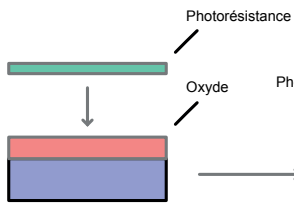
La fabrication de composants électroniques

Vision simplifiée des procédés de fabrication des circuits intégrés



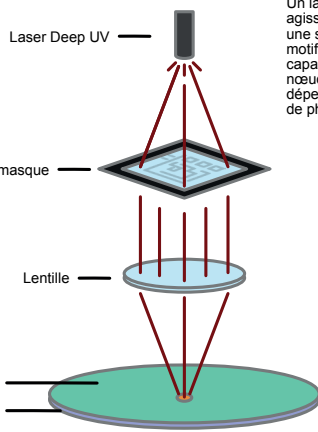
Photorésistance

Un photorésistance, un film de matériau protecteur sensible à la lumière, est appliqué sur le dessus du masque.



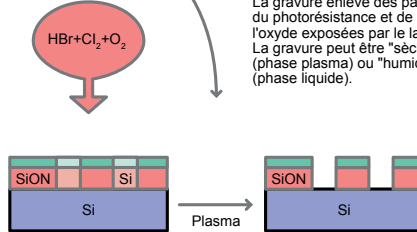
Photolithographie

Un laser traverse un photomasque, agissant comme un photo-négatif, et une série de lentilles pour graver un motif sur la photorésistance. La capacité de réduire la taille d'un nœud, exprimée en nanomètres, dépend de la résolution du processus de photolithographie.



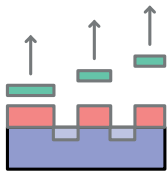
Gravure

La gravure enlève des parties du photorésistance et de l'oxyde exposées par le laser. La gravure peut être "sèche" (phase plasma) ou "humide" (phase liquide).



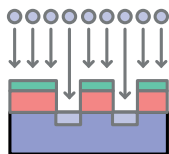
Décapage de la photorésistance

Les couches de la photorésistance indésirables sont retirées de la plaquette. Le décapage peut être "organique", "non organique" ou "sec".



Dopage

Le dopage introduit une petite quantité de particules chargées, par implantation ou diffusion d'ions, sur la surface exposée de la plaquette afin de moduler ses propriétés électriques. Les dopants peuvent être des accepteurs (de type p) ou des donneurs (de type n).



La fabrication de circuits intégrés est très complexe. Elle inclut des centaines de produits chimiques et des douzaines de procédés de types différents qui combinent des centaines d'étapes. La volonté de réduire la taille des composants a complexifié les étapes de fabrication : si la gravure comptait 147 étapes à 350 nanomètres, cela montait à 251 étapes pour graver à 45 nanomètres, et aujourd'hui les fabricants de pointe ont industrialisé la gravure à 5 nanomètres (Boyd).

La fabrication de circuits intégrés nécessite de produire des lingots de silicium qui vont ensuite être découpés en disques de 0,52 à 0,72 millimètre d'épaisseur en moyenne et entre 100 et 300 millimètres de diamètre, appelés *wafers*. Ces *wafers* vont ensuite être nettoyés et polis afin d'avoir la surface la plus homogène possible. Ce processus enlève 5 à 10 microns d'épaisseur au disque en général.

Un film très fin va être déposé chimiquement ou physiquement à la surface du disque, la nature des matériaux déposés dépend de la fonction souhaitée. Avant de démarrer le procédé de lithographie, un masque doit être produit : il est le négatif de la circuiterie conçue pour le composant, comme le négatif d'une photo.

Le procédé de lithographie implique 4 pièces principales : le laser, le masque, les lentilles et le *wafers*. Le laser permet de graver sur le film déposé précédemment les motifs de la circuiterie présents sur le masque. Les lentilles permettent de conduire et modifier le faisceau lumineux selon les spécifications voulues.

Une fois, la lithographie terminée, la surface du disque gravée par le laser va être dopée par des ions pour modifier ses propriétés électriques. On enlève ensuite le film restant sur le *wafers* et le processus recommence jusqu'à atteindre le nombre voulu de couches. En moyenne, un *wafers* compte entre 40 et 100 couches. Le *wafers* va être ensuite découpé en puces.

FOCALE SUR LA PHOTOLITHOGRAPHIE

Il existe différents types de lithographie utilisés dans la fabrication de composants : photolithographie, lithographie par impression, lithographie à faisceau d'électrons ou d'ions, ou encore la lithographie laser. Aujourd'hui, la photolithographie est utilisée pour la production en masses de puces sous trois formes :

- le DUV (Deep Ultra-Violet) à laser à fluorure d'argon (ArF), soit à « immersion » (ArFi), soit à « sec » (dry ArF) ;
- le DUV à laser à fluorure de krypton (KrF) ;
- l'EUV (Extrême Ultra-Violet), employé aujourd'hui pour graver à 5 nanomètres.

Résolution de la source et nœud obtenu en fonction des techniques de photolithographie les plus avancées.

Type	DUV			EUV
	KrF	ArF	ArFi	
Source (nm)	248	193	193	13,5
Nœud (nm)	≥150	≥65	≥7	≥5

L'objectif et les défis de la lithographie sont exprimés par l'équation de Rayleigh. Cette dernière permet de calculer la résolution d'un système d'imagerie. Comprendre cette équation est cruciale pour comprendre comment l'innovation dans les procédés de lithographie a été guidée.

$$CD = k\lambda (\lambda/NA)$$

CD = dimension critique

λ = longueur d'onde de la lumière

NA = ouverture numérique

$k\lambda$ = facteur des autres procédés dont la limite se situe à 0,25.

L'enjeu pour tout procédé de lithographie visant à réduire sa dimension critique (CD) est donc de jouer avec un ou plusieurs de ces facteurs.

- On peut réduire la longueur d'onde (λ) de la lumière en utilisant des ultraviolets. Vers 1990, la longueur d'onde utilisée en lithographie était aux alentours de 450 nanomètres, elle est maintenant de 13,3 nanomètres dans les systèmes les plus avancés.
- On peut augmenter l'ouverture numérique (NA) grâce à une série de lentilles, plus cette dernière sera grande plus elle permettra de contenir des informations.
- Le facteur k_1 dépend de nombreux autres éléments du procédé de lithographie comme les effets de proximité optique, la nature chimique du film déposé ou la température de chauffe. Le but est de réduire k_1 jusqu'à sa limite théorique de 0,25.

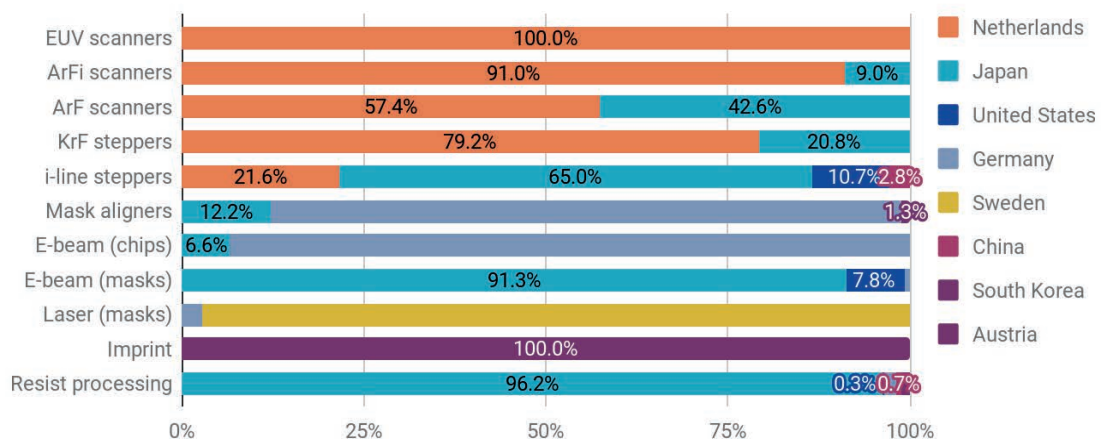
Au final, réduire la longueur d'onde de la lumière est le paramètre le plus efficace pour réduire la dimension critique.

Un autre objectif pour tout fabricant de machines de lithographie est de pouvoir industrialiser l'ensemble des procédés de fabrication, lithographie inclus. Trois critères sont à prendre en compte : la résolution (donnée par la dimension critique de l'équation de Rayleigh), la précision (la capacité à graver sans erreur), et la productivité (le nombre de *wafers* produit par heure par machine, exprimée parfois en *throughput*). Ainsi, un procédé qui aurait une grande résolution et précision doit aussi permettre de produire suffisamment pour réduire les coûts de fabrication par unité.

LES ENJEUX ORGANISATIONNELS ET MATÉRIELS autour de la photolithographie

Les Pays-Bas, le Japon et quelques autres pays détiennent une position de monopole pour la fabrication d'équipements de lithographie, toutes techniques confondues.

Parts des pays produisant des équipements de lithographie en fonction de la localisation de leur siège social



Source: VLSI Research

Trois acteurs historiques sont en position quasi-monopolistique : les japonais Canon et Nikon et le néerlandais ASML. Nikon et ASML détiennent le monopole des systèmes DUV ArFi (immersion) et ASML est seul à proposer un système EUV (Extrême Ultra-Violet).

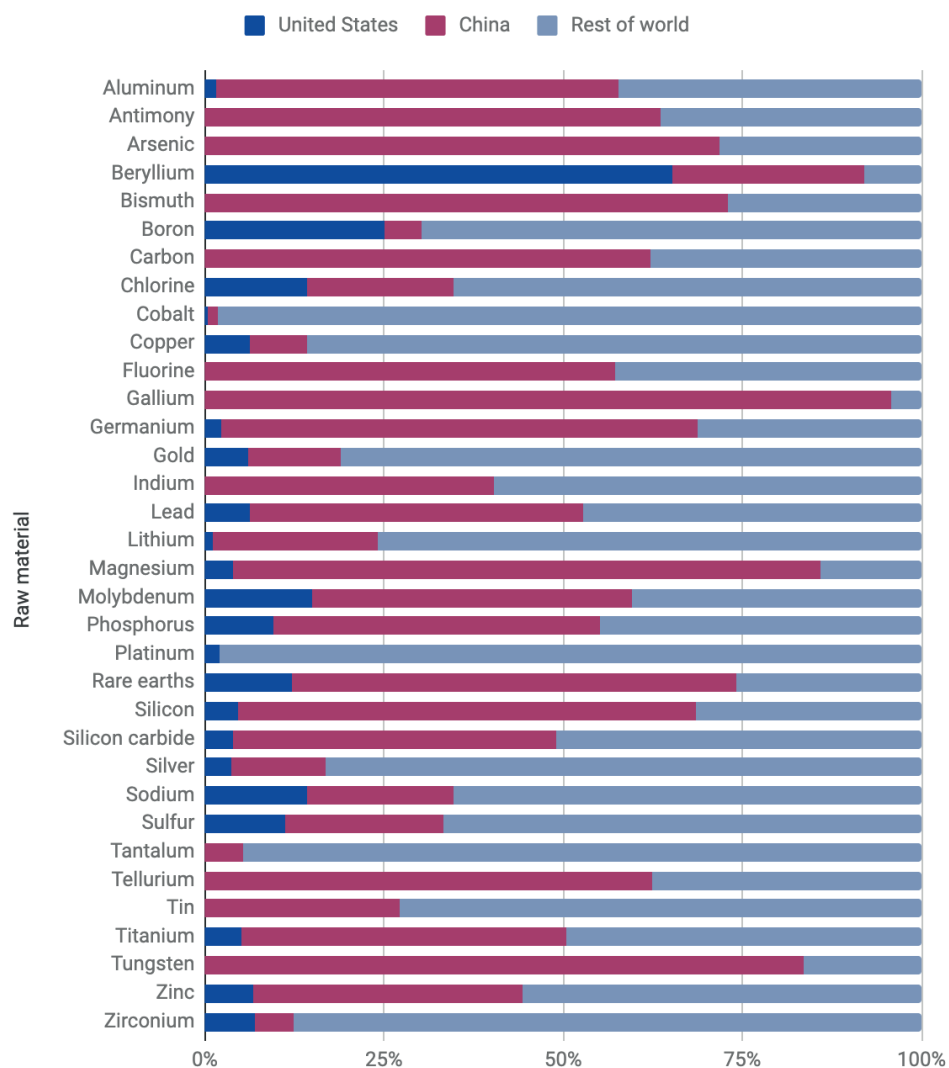
Pour comprendre cette situation de monopole, il faut revenir sur la complexité d'un système EUV. Ce dernier compte 100 000 pièces, 3 000 câbles, 40 000 boulons, 2 kilomètres de tuyaux, et un scanner pèse environ 180 tonnes et est expédié dans 40 conteneurs. ASML vend un seul scanner EUV pour environ 123 millions de dollars. Une usine de 5 nm nécessite plusieurs scanners. Ces machines intègrent des composants de plus de 5 000 fournisseurs spécialisés.

Pour ce type d'équipements, 27% des fournisseurs se situent aux États-Unis comme Cymer qui fournit le système de vaporisation de l'EUV, 32% aux Pays-Bas, siège de l'entreprise, 14% en Europe (hors Pays-Bas) comme le fabricant de laser Trumpf ou le fabricant de lentilles

Zeiss, et 27% en Asie. À partir de 2012, Intel, Samsung et TSMC ont investi massivement dans ASML pour permettre le développement de l'EUV, cela a amené Intel à détenir jusqu'à 11% des parts de la firme. Aujourd'hui, l'entreprise américaine a revu son investissement et ne détient plus que 3% de parts. De plus, l'entreprise européenne reste vulnérable aux politiques commerciales des États-Unis dans le contexte de la guerre commerciale entre ces derniers et la Chine.

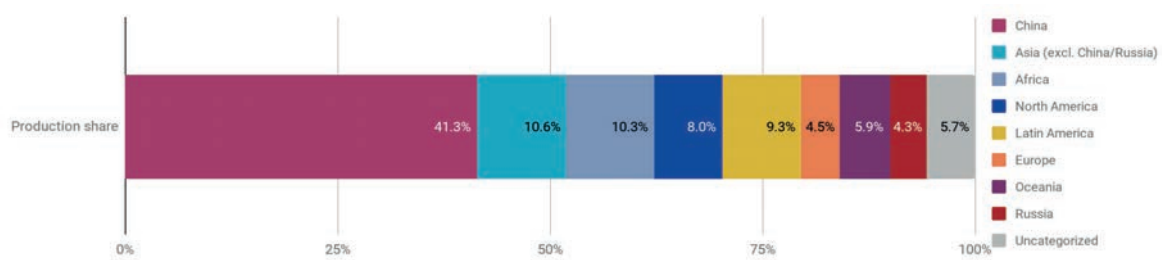
Concernant les matières premières nécessaires à la fabrication de composants et notamment au procédé de photolithographie, une grande partie du tableau périodique de Mendeleïev est mobilisée. La Chine détient le plus grand nombre de matières brutes utilisées dans le procédé, à l'exception du cobalt et du platine. Au niveau mondial, la Chine produit 95,7% du gallium, 83,6% du tungstène, 82% du magnésium et 64% du silicium, la matière la plus utilisée dans le procédé. L'utilisation de gaz est aussi cruciale : néon de haute qualité, argon, krypton et fluor pour le laser, ou encore nitrogène, hélium, dioxyde de carbone pour le refroidissement ou le nettoyage de la chambre de gravure. Si un scanner DUV Arfi ou EUV ne consomme pas une grande quantité de gaz et en recycle une partie, le nombre important de scanners dans le monde crée une demande assez importante pour structurer des filières d'approvisionnement. Ces dernières restent particulièrement vulnérables aux tensions géopolitiques. Par exemple, deux entreprises ukrainiennes fournissaient au niveau mondial 50% du néon à la pureté nécessaire pour les lasers des scanners DUV et EUV. Le début de la guerre en Ukraine a détruit ses capacités de production et une vaste réorganisation de cette chaîne d'approvisionnement est en cours.

Production primaire de matières premières en 2019 par pays/région



Source : Saif M. Khan, The Semiconductor Supply Chain : Assessing National Competitiveness, CSET

Part de la production totale de matériaux en 2019 par pays/région (moyenne non pondérée)



Source : Saif M. Khan, The Semiconductor Supply Chain : Assessing National Competitiveness, CSET

PISTES D'ÉVOLUTION

L'évolution des procédés de lithographie sera guidée par l'équation de Rayleigh ou par le choix d'obtenir des gains d'efficacité hors des systèmes de photolithographie.

La première option est résumée par le vocable « More Moore scaling », c'est-à-dire, plus de transistors par millimètre carré avec de meilleures performances, une consommation d'énergie moindre et des coûts réduits. ASML développe un nouveau système de photolithographie EUV baptisé « High NA ». Ce dernier sera plus complexe et plus cher que les scanners EUV déjà disponibles et permettra une plus grande ouverture numérique, de 0,33 à 0,55. ASML estime que le High NA multipliera la résolution de gravure par 1,7 et la densité des puces par 2,9 par rapport au système le plus avancé aujourd'hui. Ce type de développement industriel très intense en investissements est seulement possible sur des marchés avec des volumes très élevés de ventes comme le smartphone ou l'ordinateur portable grand public. Un marché grand public en contraction ou en décroissance ne rendrait plus viable ce genre d'investissements.

La deuxième option consiste à entrer dans l'ère « Post-Moore » (sortir du doublement du nombre de transistors par puce tous les 1,5-2 ans) et à explorer de nouveaux procédés comme, par exemple, la capacité de créer des composants qui peuvent être à la fois utilisés pour des fonctions logiques et pour des fonctions de mémoire en s'appuyant sur des propriétés magnétiques pilotées par le voltage (Theis et Wong, 2019) alors qu'aujourd'hui les composants sont spécialisés par fonction, d'un côté les composants de calcul logique (processeurs, etc.) et les composants de mémoire (SD-RAM, etc.).

Leiserson et al identifient des gains encore possibles au niveau des composants : stacking 3D, des transistors quantiques (QFET), des transistors optiques (photonics) et l'usage du graphène pour la fabrication des composants.

À défaut de pouvoir maintenir des gains en puissance en améliorant les procédés de photolithographie, de nombreuses innovations techniques ont été développées sur d'autres étapes de la fabrication. Par exemple, Soitec, en coopération avec le CEA-Leti et STMicroelectronics, produit des galettes de silicium (*wafers*) où une fine couche d'isolant est introduite entre deux couches de silicium. Ces galettes dites SOI (Silicium On Insulator) permettent de créer des composants bien plus efficaces à bas voltage.

Global Foundries est en train de créer une nouvelle usine à Dresde pour produire massivement des composants basés sur la technologie de Soitec (FD-SOI, Fully Depleted Silicium On Insulator) de 18 à 22 nm. Ce type de technologies ne permet pas de continuer la course à la puissance mais elles permettent d'avoir d'autres approches pour répondre à des besoins plus spécifiques.

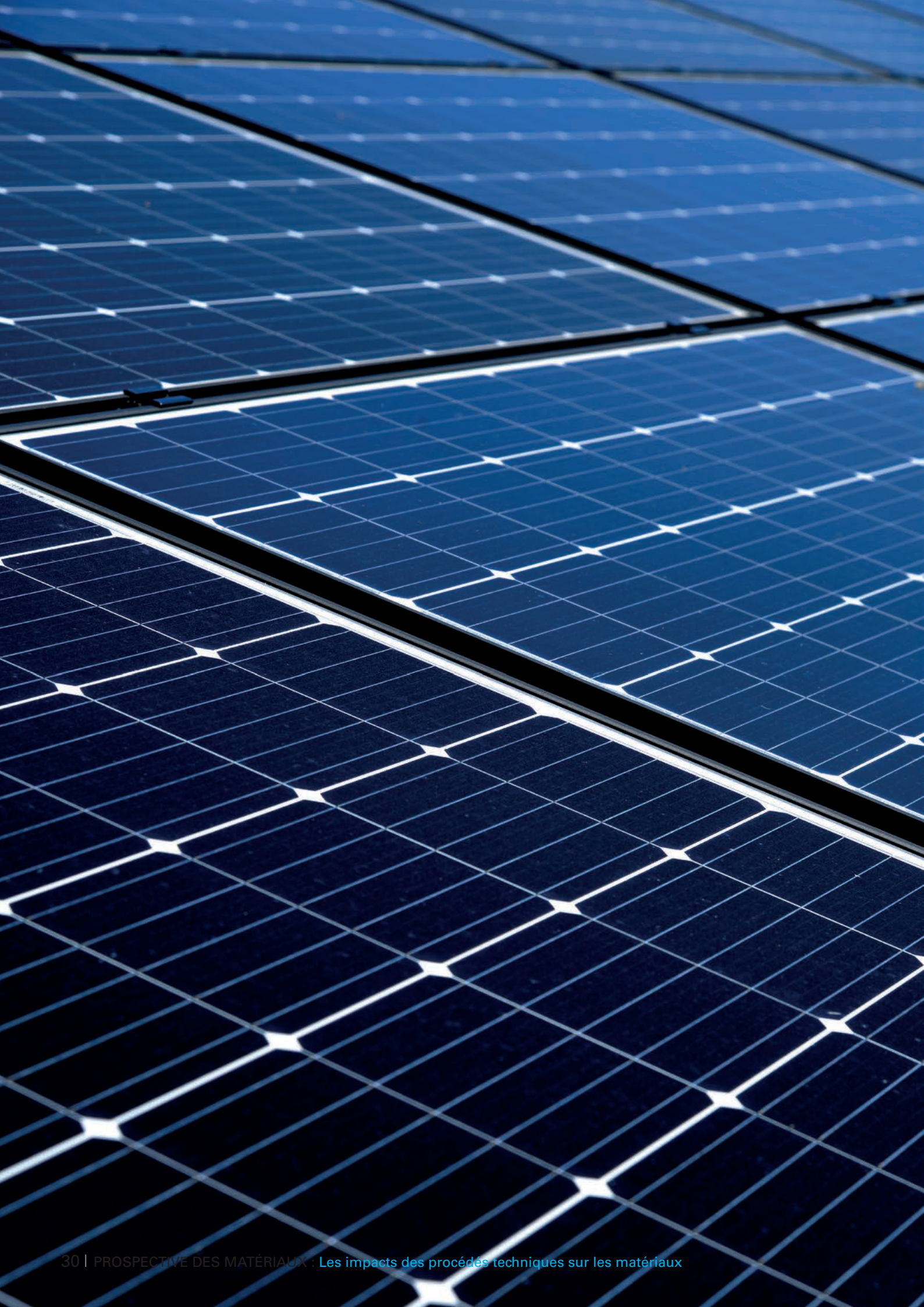
De nombreux gains d'optimisation sont aussi possibles au niveau logiciel : repenser les systèmes d'opération pour qu'ils se comportent au plus près des phénomènes physiques dans les puces ou avec de nouveaux types d'algorithmes. Finalement, les collaborations

entre éditeurs de logiciel de conception de circuits et fonderies pourraient permettre d'augmenter l'efficacité des procédés de fabrication (Design Technology Co-optimization) ainsi que les nouvelles logiques de constitution des circuits, comme la séparation des différentes fonctions entre le recto et le verso des puces (Backside Power Deliver Networks).

Ces deux types d'innovation prennent une place importante dans les feuilles de route établies par le secteur.

Principales sources utilisées

- BCG, SIA (2021), *Strengthening the global semiconductor supply chain in an uncertain era*.
- Boyd Sarah (2012), *Life-Cycle Assessment of Semiconductor*, Springer.
- Khan Saif, Mann Alexander, Peterson Dahlia (2021), *The Semiconductor Supply Chain : Assessing National Competitiveness*.
- Kleinhans Jan-Peter (2021), *The lack of semiconductor manufacturing in Europe*.
- Nanya (2021), *Corporate Sustainability Report*.
- Rieger Michael (2019), *Retrospective on VLSI value scaling and lithography*, Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS n°18.
- Theis Thomas, H.-S. Philip Wong (2016), *The End of Moore's Law : A New Beginning for Information Technology*, IEEE.



LES PROCÉDÉS DE FABRICATION DE LA FILIÈRE PHOTOVOLTAÏQUE

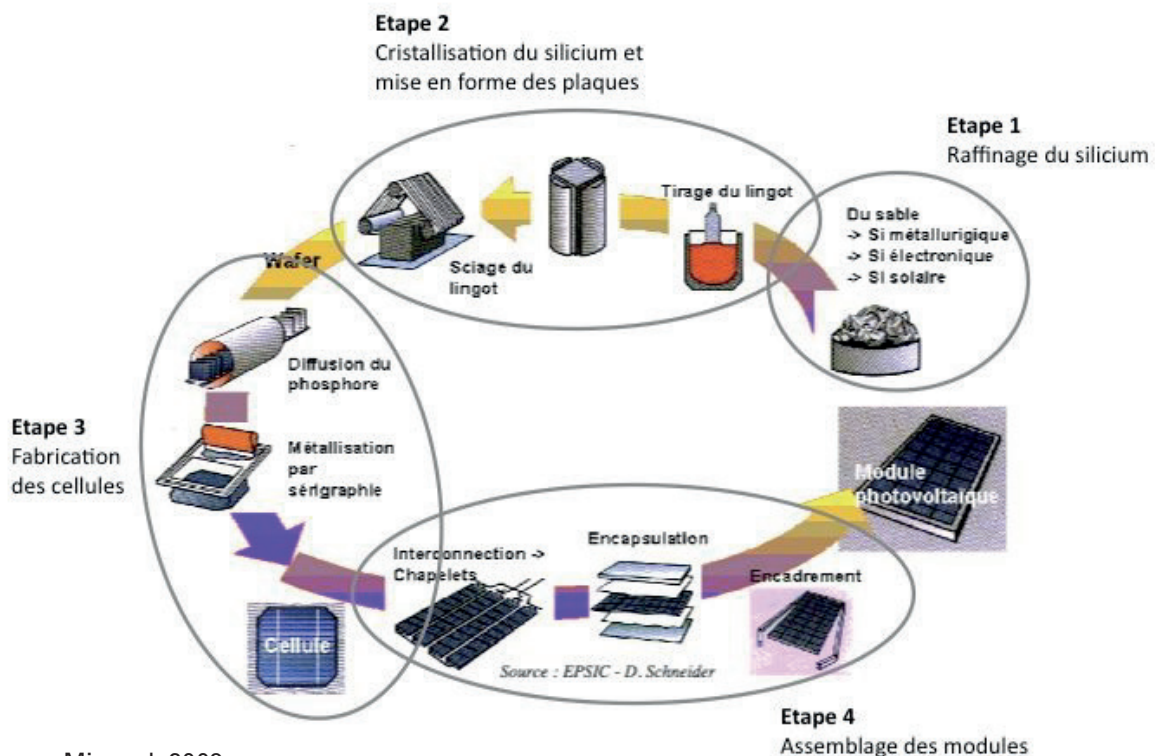


En résumé – L'énergie photovoltaïque (PV) repose sur des procédés utilisant très majoritairement le silicium, un élément chimique abondant dans la croûte terrestre mais nécessitant de lourds procédés industriels pour être transformé en métal suffisamment pur.

La Chine a massivement investi dans la filière, faisant considérablement baisser les coûts de production. Elle a atteint un quasi-monopole mondial sur les principales étapes de production des cellules photovoltaïques. Pour s'émanciper de cette dépendance, l'Europe organise la relocalisation de la filière, qui pourrait passer par l'utilisation de nouveaux procédés.

LES PRINCIPALES ÉTAPES DE FABRICATION

Considérée comme un élément central des stratégies de décarbonation, l'énergie photovoltaïque est une technologie complexe qui repose aujourd'hui quasi intégralement sur l'utilisation du silicium. De nombreux procédés sont utilisés au cours des différentes étapes de transformation rappelées ci-après :



Source : Micquel, 2009

0. L'extraction : le silicium métal n'est pas directement extrait de la croûte terrestre, il est produit à partir de matières premières riches en silice (SiO_2) comme le quartz, qui est notamment présent dans la nature sous forme de roche (quartzite), de galets ou de grès siliceux.
1. Le raffinage : le quartz est transformé en silicium métal de qualité solaire (Solar Grade silicium, ou SoG-Si) en deux étapes de raffinage successives :
 - a) La réduction carbothermique : elle s'opère dans des fours à arc électrique à 1700°C , par combustion de quartz et de matières carbonées (houille, bois). La réaction per-

met d'obtenir un silicium de qualité métallurgique d'une pureté de 98 à 99 %.

- b) Le raffinage SoG-Si : il permet d'atteindre une pureté de silicium de 99,999% et se pratique soit par voie chimique (ex. procédé Siemens, faisant intervenir des réactions chimiques utilisant du chlorure d'hydrogène pour gazéifier le silicium, avant de le distiller et de le re-solidifier), soit par voie métallurgique (ex. procédé Elkem, faisant intervenir plusieurs phases de fusion et solidification). Ces procédés sont complexes, coûteux et énergivores.
2. La cristallisation (en lingots) et la découpe (en « wafers ») : le silicium métal très pur est à nouveau fondu pour être refroidi de manière contrôlée, afin de solidifier sous formes de cristaux agglomérés en blocs, ou lingots. Là encore, différents procédés permettent d'obtenir : soit du silicium monocristallin (Sc-Si), plus énergivore mais un peu plus performant ; soit du silicium multicristallin, moins énergivore et un peu moins performant (aujourd'hui en voie d'abandon). Les lingots de silicium ainsi obtenus sont ensuite sciés afin d'obtenir de fines plaques de silicium, appelées « wafers ».
 3. La fabrication des cellules consiste ensuite à retravailler les « wafers » et les associer à d'autres éléments indispensables pour transformer le champ photoélectrique en un courant électrique utilisable. De nombreuses étapes peuvent intervenir : décapage par bain d'acide, texturation, dopage par diffusion thermique de phosphore, traitement antireflet, sérigraphie métallique, etc.
 4. L'assemblage des modules permet enfin de connecter des cellules entre elles puis de les isoler du milieu extérieur pour les protéger et faciliter leur installation, sous forme de panneaux (raccordement des cellules, encapsulation, encadrement, etc.).

FOCALE SUR LA DÉPENDANCE VIS-À-VIS DES PROCÉDÉS DE RAFFINAGE ET DE FABRICATION

Le silicium est très abondant dans la croûte terrestre et, même sous la forme très concentrée de type quartz nécessaire à la production de silicium métal, il ne fait pas l'objet d'inquiétudes particulières quant à sa disponibilité. En France, le BRGM assure que la disponibilité de quartz est suffisante pour permettre plusieurs décennies de production au rythme actuel.

En revanche, le silicium métal est considéré par l'Union Européenne et par le BRGM comme un matériau critique, du fait de son importance économique et stratégique et à cause de la dépendance de cette industrie à l'égard de la Chine.

Plus de 70 % de la production mondiale de silicium primaire (étape 1.a) est réalisée en Chine, contre 6 % en Norvège et 3 % en France. Du fait de ses surcapacités de production, la Chine influence très fortement les prix du silicium métal primaire et exerce une lourde pression sur les producteurs nord-américains et européens. En France, des annonces de fermeture de certains sites ont été récemment faites, notamment ceux de l'entreprise Ferropem en Savoie.

18% de ce silicium métal primaire est ensuite raffiné pour atteindre le grade solaire (étape 1.b), et 1% pour atteindre le grade électronique. Ce silicium très raffiné revêt une importance stratégique plus forte encore, puisqu'il constitue pour ainsi dire la matière première des transitions énergétique et numérique. Il est à ce titre considéré par l'Union européenne comme un matériau stratégique. Or sa production est très capitalistique et concentrée dans les mains d'un petit nombre d'entreprises, pour la plupart chinoises.

Plus en aval de la chaîne de production, le même problème se pose donc, avec une concentration de la production en Asie. La Chine fabrique par exemple 93% des *wafers* dans le monde.

Plus en aval encore, la fabrication des modules est aujourd'hui dominée par la Chine qui produit plus de 70 % des modules, et où sont installées 7 des 10 plus grandes usines de panneaux au monde. Aucune de ces 10 méga-usines, qui produisent chacune plus de 4 GW/an, n'est située en Europe. Là encore, les économies d'échelle ont permis à la Chine d'influencer considérablement le marché, menant à une série impressionnante de faillites d'entreprises européennes dans les années 2010 : alors que 30 % des modules étaient produits en Europe en 2007, ils n'étaient plus que 3 % dix ans plus tard.

ENJEUX ORGANISATIONNELS ET MATÉRIELS LIÉS À CES PROCÉDÉS

Un rapport de l'AIE estime que la part de la Chine dans toutes les étapes clés de la fabrication de panneaux solaires dépasse désormais 80 % et, pour les secteurs clés (silicium SoG, *wafers*) ce chiffre devrait atteindre plus de 95 % dans les années à venir, créant une dépendance technologique et économique de l'Europe, avec des risques de ruptures de chaîne d'approvisionnement et une perte de souveraineté.

L'impact environnemental de la production de modules photovoltaïques est assez lourd, du fait des nombreux procédés utilisés, à la fois énergivores et consommateurs de produits chimiques. L'optimisation de la production a permis de réduire fortement ces impacts, mais la production du silicium et celle des modules photovoltaïques restent très consommatrices d'électricité. Le bilan carbone de la production de panneaux photovoltaïques est, de ce fait, très dépendant du mix électrique des pays producteurs. L'Institut Fraunhofer a montré qu'une chaîne de production en Europe pourrait ainsi réduire de 40 % les émissions nécessaires pour produire un panneau, comparativement au même produit en Chine. Par ailleurs, elle permettrait d'envisager des débouchés pour les filières de recyclage qui commencent à se structurer en Europe.

PISTES D'ÉVOLUTION ET PROCÉDÉS ALTERNATIFS

Face à cette situation de quasi-monopole et aux enjeux qu'elle soulève, l'Agence Internationale de l'Énergie a récemment appelé à diversifier les chaînes d'approvisionnement. En Europe, deux pistes sont particulièrement explorées, que ce soit par les acteurs publics (dans le cadre des plans de relance post-Covid et de planification écologique) ou par les acteurs du secteur (notamment réunis depuis peu dans le European Solar Manufacturing Council).

La relocalisation dans l'optique d'un « Airbus du solaire »

La première piste consisterait à reconstruire une filière européenne de panneaux photovoltaïques allant de l'extraction des matières premières à l'assemblage des modules, en se basant sur la technologie dominante du silicium monocristallin. Aucun verrou technologique n'empêche aujourd'hui une telle relocalisation. La principale difficulté tient ici au fait qu'il serait aujourd'hui très difficile pour l'Europe de devenir concurrentielle face à l'Asie, qui continue sa course aux gains de productivité avec des usines toujours plus grandes et des coûts de production toujours plus faibles. Des investissements massifs accompagnés de protections commerciales pourraient toutefois permettre aux pays européens de préserver une partie de leur marché. Plusieurs méga-usines sont aujourd'hui en développement en Europe – de taille toutefois beaucoup plus modestes que celles des pays asiatiques, c'est-à-dire visant un potentiel de production de moins de 2 GW par an, là où certaines usines chinoises ont d'ores et déjà des potentiels supérieurs à 50 GW par an. Comme le notent de nombreux observateurs, le retard pris est tel qu'un rattrapage ne pourra s'envisager qu'avec un soutien très puissant des acteurs publics. Sur le modèle de l'alliance pour le développement de la production de batteries, l'Union Européenne a ainsi créé en octobre 2022 une Alliance de l'Industrie Solaire Photovoltaïque dont le but est précisément de relocaliser la production au sein de l'UE, avec l'objectif d'atteindre 30 GW de capacité de production d'ici à 2025.

L'amélioration du rendement ou du coût énergétique par l'innovation de procédés

Certains acteurs de la filière pensent toutefois que les écarts de compétitivité avec la Chine sont devenus trop importants pour être rattrapés, si bien que la relocalisation ne pourra s'opérer qu'en changeant de technologie et de procédés. Plusieurs pistes sont évoquées, par exemple :

- **Les cellules à très haut rendement** pourraient être un premier levier. L'industriel français Voltec Solar et l'Institut photovoltaïque d'Île-de-France proposent par exemple d'associer la technologie silicium avec celle d'un autre semi-conducteur : la pérovskite. Cette association permet d'élargir la couverture du spectre de rayonnement solaire exploitable par la cellule photovoltaïque pour atteindre des rendements nettement supérieurs à celui des cellules de silicium. Ses promoteurs présentent cette innovation comme « une révolution technologique qui permet non seulement d'atteindre un rendement de 30 % (...), mais qui réduit également la consommation d'énergie et de matière nécessaires à la fabrication et de valoriser les matériaux issus du recyclage »

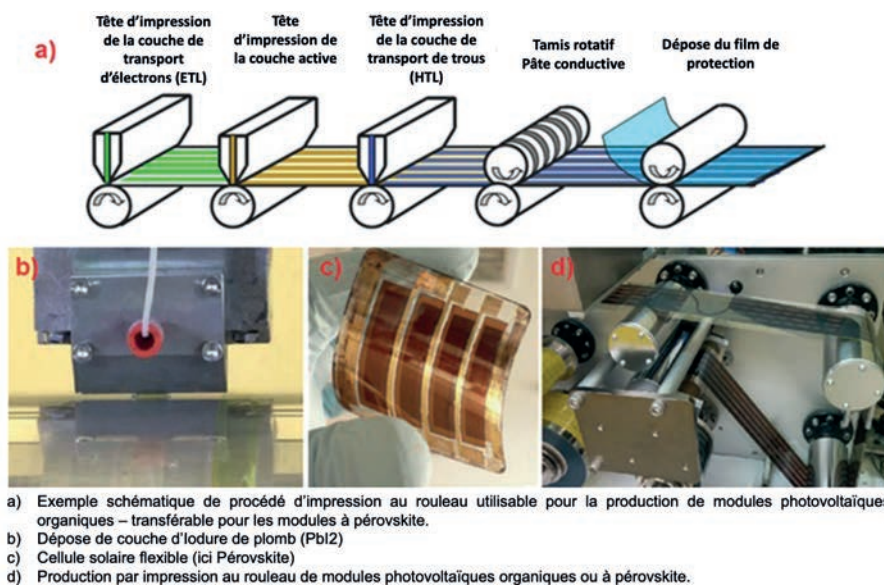
(Drozdowski-Strehl,, cité par IPVF, 2022). Ils affirment également que la technologie est mûre pour passer au stade de l'industrialisation, et ils envisagent une capacité de fabrication en France de 5 GW à l'horizon 2030.

- **Les cellules à hétérojonction** associent une cellule de silicium cristallin prise en sandwich entre deux couches minces de silicium amorphe, ce qui permet d'accroître la quantité d'énergie récoltée par rapport à l'une ou l'autre de ces technologies utilisées seules. Si on en croit ses promoteurs, les étapes de fabrication de cette technologie sont réduites et simplifiées par rapport aux cellules conventionnelles. Le CEA (Liten) et l'Institut national de l'énergie solaire (Ines) ont produit en condition industrielle des cellules affichant 24% de rendement en 2019, et plusieurs usines semblaient intéressées pour industrialiser le procédé en Europe.
- **Les cellules à couche mince** pourraient également percer. Le principe consiste à vaporiser le semi-conducteur sur un support. Si le rendement des modules ainsi obtenu est plus faible, le coût énergétique et les pertes sont en revanche moindres (le procédé de sciage des lingots génère jusqu'à 40% de pertes, non réutilisables). Les supports utilisés sont également beaucoup plus variés, flexibles et légers, ce qui permet des utilisations nouvelles. En revanche, leur durée de vie est jusqu'à présent plus faible. S'appuyant sur les recherches menées par le CNRS et l'Université Paris-Sud, la société SOY PV a réalisé une usine pilote qui utilise une technologie de dépose de la couche de semi-conducteur innovante et à faible coût, s'apparentant aux techniques utilisées dans l'imprimerie. Ses concepteurs imaginent un déploiement permettant de produire 30 GW à l'horizon 2030.
- **D'autres technologies émergentes** pourraient sans doute s'ajouter à cette liste, comme le photovoltaïque organique, constitué d'une couche souple de semi-conducteur synthétisé par voie chimique. Comparable à une encre, ce semi-conducteur peut être imprimé sur un support généralement en matière plastique ou en verre (voir encadré). Beaucoup d'observateurs considèrent cette technologie comme une rupture, puisqu'elle permet de s'émanciper de la filière silicium tout en ayant un bilan plus favorable sur le plan écologique – et sans doute sur le plan économique, à terme. Elle est toutefois encore au stade de développement, avec des applications industrielles encore limitées ainsi qu'une performance et une durée de vie inférieures à celles des cellules traditionnelles.

La production de modules PV par impression : un procédé à bas coût émancipé de la filière silicium ?

Le PV organique et plus généralement à couche mince présente plusieurs atouts majeurs : ils ne dépendent pas du silicium – filière énergivore aujourd'hui trustée par la Chine – et ils peuvent être produits à bas coût, de manière décentralisée et avec une faible empreinte environnementale, en utilisant des procédés inspirés de l'imprimerie. Un support, se présentant généralement sous

forme d'un rouleau de matière plastique souple, est déroulé dans une imprimante pour être enduit de différentes couches de semi-conducteurs ressemblant à une encre liquide. Le tout est ensuite structuré puis couvert d'un film de protection en plastique. Pour leurs promoteurs, les progrès réalisés dans la performance (rendement) et la durabilité de ces technologies pourraient changer la donne dans l'industrie photovoltaïque dans les décennies à venir.



Source :Razza et al., 2016.

Principales sources utilisées

- Beyer M., 2022. «Une usine de production de cellules CIGS en préparation à côté de Paris», PV magazine, mis en ligne le 3 octobre 2022. - <https://www.pv-magazine.fr/2022/10/03/made-in-france-une-usine-de-production-de-cellules-cigs-en-preparation-a-cote-de-paris/>
- Boubault A., 2020. «Le silicium : un élément chimique très abondant, un affinage stratégique», Minéral info/le portail français de ressources minérales non énergétiques, mis en ligne le 10 juin 2020. - <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/silicium-un-element-chimique-tres-abondant-un-affinage-strategique>
- CEA, 2022. «L'essentiel sur... Le photovoltaïque», mis en ligne le 2 mars 2022. - https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-cellules-photovoltaiques.aspx?g_3bda4e72_795b_4e80_9ebc_c6f24183cd3d=2
- Deboyser B., 2020. «Un Airbus solaire permettra-t-il la renaissance de l'industrie photovoltaïque en Europe ?», mis en ligne le 30 avril 2020. - <https://www.revolution-energetique.com/un-airbus-du-solaire-permettra-t-il-la-renaissance-de-lindustrie-photovoltaique-en-europe/>
- Deboyser B., 2019 «Cellules solaires à hétérojonction : l'émergence d'une filière européenne prometteuse», mis en ligne le 20 décembre 2019. - <https://www.revolution-energetique.com/cellules-solaires-a-heterojonction-lemergence-dune-filiere-europeenne-prometteuse/>
- Enkhardt S., 2021. «Frameless glass-glass solar modules made in Europe have the best CO₂ footprint, Fraunhofer ISE says», PV magazine, mis en ligne le 24 septembre 2021. - <https://www.pv-magazine.com/2021/09/24/frameless-glass-glass-solar-modules-made-in-europe-have-the-best-co2-footprint-fraunhofer-ise-says/>
- European Commission, 2022. «Commission kicks off work on a European Solar Photovoltaic Industry Alliance», mis en ligne le 11 octobre 2022. - https://ec.europa.eu/info/news/commission-kicks-work-european-solar-photovoltaic-industry-alliance-2022-oct-11_en
- IEA - International Energy Agency, 2022. *Special Report on Solar PV Global Supply Chains*. IEA. - <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
- IPVF, 2022, «France PV Industrie : un projet industriel photovoltaïque ambitieux pour accélérer la transition écologique en France», mis en ligne le 11 novembre 2022. - <https://www.ipvf.fr/fr/france-pv-industrie-un-projet-industriel-photovoltaique-ambitieux-pour-accelerer-la-transition-ecologique-en-france/>
- Miquel C., Gaidon B., 2009, *Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental*. Hespul, Villeurbanne.
- Razza et al., 2016, «Research Update : Large-area deposition, coating, printing, and processing techniques for the upscaling of perovskite solar cell technology», APL Materials, 4. - <http://dx.doi.org/10.1063/1.4962478>
- Transitions & Énergie (la rédaction), 2020, «Peut-on relocaliser la production de panneaux solaires ?», mis en ligne le 5 mai 2022. - <https://www.transitionsenergies.com/relocaliser-production-panneaux-solaires/>



LES PROCÉDÉS DE RÉCOLTE ET DE LAVAGE DE LA FILIÈRE LAINE



En résumé – La transformation de la laine repose sur des procédés développés en France à partir de la fin du 18^e siècle pour atteindre leur apogée au milieu du 19^e siècle. La filière est marquée ensuite par une phase de désindustrialisation qui a débuté avec l'arrivée des matières synthétiques. Aujourd'hui, 70% de la laine des cheptels ovins est vendue à perte en Chine. Cependant, un regain de la filière s'observe actuellement avec une myriade d'acteurs qui appelle à sa réindustrialisation en France. La nécessité de se passer des ressources pétrochimiques pourrait remettre la laine sur le devant de la scène pour ses qualités environnementales et techniques indéniables. Les quantités de laine disponibles dépendent des races des cheptels ovins (actuellement priorisation en France de races à viande et à lait au détriment des races lainières) et des capacités des procédés de récolte et de lavage à traiter la laine.

LES PRINCIPALES ÉTAPES DE FABRICATION

La laine est une ressource renouvelable naturelle. Les propriétés de la laine (régulation de température et d'humidité, ressorts, peu inflammable) lui permettent d'avoir de nombreuses applications (matelas, isolation, vêtements, etc.). On peut distinguer deux sortes de laine : les laines grossières particulièrement adaptées pour le rembourrage, le feutre et le matelas et les laines fines idéales pour la fabrication de vêtements. Certaines étapes de fabrication sont communes à toutes les applications (la tonte, le tri et le lavage) tandis que d'autres sont plus spécifiques tel que représenté ci-après :

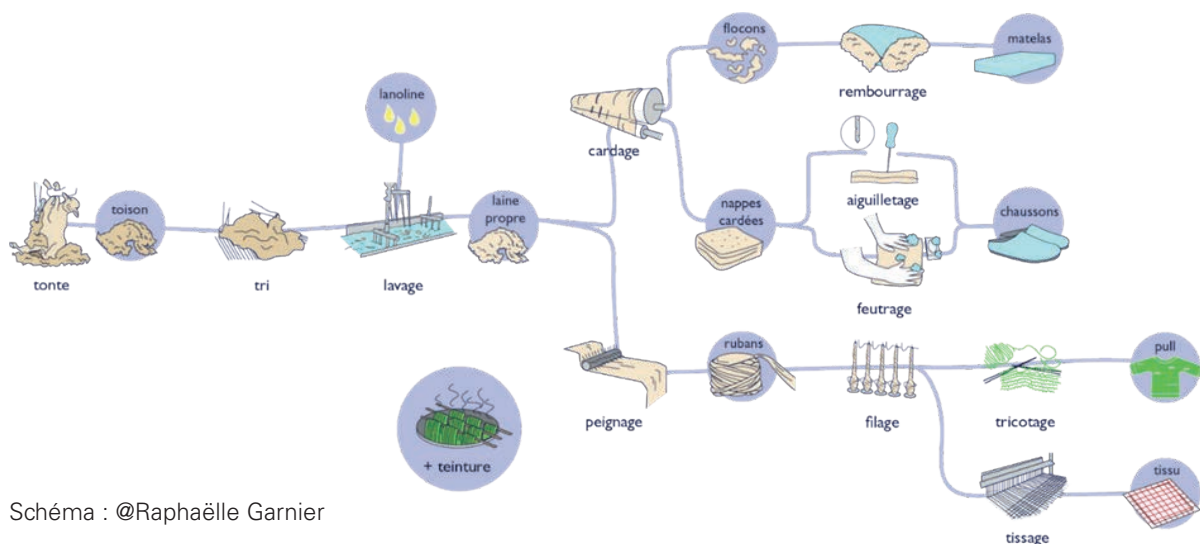


Schéma : @Raphaëlle Garnier

Par ailleurs, la laine est recyclable. Les vêtements usagés peuvent être effilochés et les fibres obtenues réutilisées pour créer de nouveaux fils. Les matelas usagés peuvent être démantelés et la laine réutilisée en tant qu'isolant.

Enfin, la laine est biodégradable. Elle est compostable et fertilise les sols. À ce titre, elle peut être utilisée pour le paillage des cultures.

Les principales étapes de transformation de la laine sont les suivantes :

- **La récolte et le lavage.** Les moutons sont tondus annuellement, étape indispensable pour le bien-être animal. Après la tonte, les toisons sont triés puis pressées en grosse balles avant d'être expédiées vers une station de lavage afin d'éliminer les graisses et les matières minérales et organiques.

- **Le cardage** permet de paralléliser les fibres de laine et éliminer les impuretés végétales restantes après le lavage. Après le cardage, la laine peut être utilisée pour fabriquer des matelas ou encore subir deux autres étapes de transformation distinctes ; **l'aiguilletage** qui consiste à piquer la laine cardée afin de mélanger les fibres et le **feutrage** qui consiste à soumettre la laine aux frottements et à l'humidité afin que les fibres s'entremêlent de façon à ne plus pouvoir être séparées.
- **Le peignage**, quant à lui, consiste à faire passer la laine cardée à travers une série de peignes de plus en plus fins. Les fibres sont alors parfaitement parallèles et on obtient une laine peignée. Les fibres les plus courtes sont éliminées.
- **La filature.** Pour obtenir du fil, on fait subir aux fibres de laine une torsion pour former un fil continu. Pour cela, on peut utiliser en fonction du rendu souhaité soit de la laine cardée, soit de la laine peignée. Deux ou trois de ces fils simples sont ensuite retordus entre eux.
- **Le tricot et le tissage.** Pour réaliser des vêtements ou des tissus, les fils de laine seront tricotés ou tissés.
- **La teinture** peut être effectuée à différents stades : sur la laine lavée, les fils ou en pièces de tissus. Il existe des races de moutons dont les laines sont naturellement colorées (brun, beige, gris, noir) et peuvent être utilisées sans teinture. Depuis la fin du 19^e siècle, les couleurs de synthèse sont de très loin les plus employées. Le blanchiment de la laine est le plus souvent réalisé avec du peroxyde d'hydrogène.

FOCALE SUR LES PROCÉDÉS DE RÉCOLTE ET DE LAVAGE DE LA LAINE

La récolte et le lavage de la laine sont les premières étapes dans la filière laine. Les pratiques de tonte conditionnent grandement la qualité de la laine. Une fois récoltées, les toisons sont triées à la main afin de retirer les parties souillées. Le lavage a pour objectif de retirer les souillures de la toison résultant des conditions d'élevage (paille, foin, ...), les sécrétions naturelles du mouton (graisses de la laine et le suint qui recouvrent la peau du mouton d'un film protecteur naturel et qui imprègne les fibres de laine) et les substances appliquées lors de l'élevage (peintures d'identification, insecticides, ...).

Au niveau mondial, le lavage s'effectue quasiment exclusivement par saponification et émulsion avec des bains successifs de lavage dans de l'eau à 60°C, additionnée carbonate de sodium et de détergent. Les stations de lavage industrielles utilisent parfois la carbonisation pour retirer les fibres végétales. Ce procédé consiste à traiter les fibres de laine avec une solution d'acide sulfurique puis à chauffer à une température supérieure à 100°C. Les fibres végétales endommagées sont enlevées mécaniquement et l'acide est ensuite neutralisé avec de l'acétate de sodium. Des procédés de lavage par solvant existent mais ne sont pas déployés du fait des risques chimiques et environnementaux inhérents à l'utilisation de solvant.

Lors du lavage, la laine perd de 35 à 65% de son poids en fonction du type de laine (les laines grossières contiennent moins de graisse que les laines fines). Les paramètres clés du lavage sont l'humidité et le pourcentage de suint résiduel. Les stations de lavage industrielles permettent de contrôler ces paramètres.

Les effluents des eaux de lavage, même s'ils sont principalement d'origine naturelle, constituent une charge importante de pollution pour l'environnement, en particulier dans une approche industrielle. Un lavage industriel typique produit une charge organique dans ses effluents qui équivaut à une ville d'environ 30 000 habitants. C'est la raison pour laquelle le lavage de laine est strictement encadré par la réglementation européenne pour des capacités de lavage supérieures à 500 kg/jour.

La prise en charge des effluents est très variable d'une installation à l'autre en fonction de sa taille et de son degré de modernisation. Les procédés peuvent combiner séparations physiques, traitements biologiques et traitements chimiques, soit directement au sein de la station de lavage, soit lors d'un raccordement avec la station d'épuration la plus proche.

Plusieurs voies de valorisation sont également possibles. Les eaux de lavage, une fois séparées des graisses de laine, insolubles dans l'eau, sont encore chargées du suint des toisons très solubles dans l'eau. Ces eaux, chargées de potassium et de nutriments, peuvent être épandues dans les champs. La graisse de laine obtenue après le lavage peut être purifiée afin

de récupérer la lanoline, un composant utilisé par l'industrie cosmétique et pharmaceutique (vitamine D) et qui entre dans la composition de nombreuses autres applications (plastiques, lubrifiants, huiles textiles, béton, peintures et encres, ...). Les graisses de laine peuvent également être compostées ou méthanisées.

ENJEUX ORGANISATIONNELS ET MATÉRIELS LIÉS À LA RÉCOLTE ET AU LAVAGE DE LA LAINE

L'Europe compte 98 millions de moutons, un chiffre relativement comparable aux 97 millions de moutons de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande. L'Afrique du Sud est un autre grand pays producteur de laine.

Avec la désindustrialisation de la filière laine qui a débuté avec l'arrivée des matières synthétiques et s'est poursuivie avec la mondialisation, actuellement 70% de la laine française est vendue à perte et lavée en Chine dans un cadre environnemental beaucoup moins contraignant qu'en Europe, avec un coût de main d'œuvre bien plus bas et sans aucune traçabilité. La moindre reprise de ce débouché après la crise sanitaire de la Covid-19 pose actuellement de sérieux problèmes aux éleveurs qui n'arrivent pas à écouler leur stock et qui ont l'interdiction de brûler ou de composter leur laine.

De nombreux acteurs appellent de leurs vœux à une réindustrialisation de la filière. C'est le cas par exemple d'associations historiques telles que Atelier Laines d'Europe et la Maison de la transhumance et plus récemment de l'association Lainamac et du Collectif Tricolor. Des initiatives permettant de valoriser la laine existent localement. Citons le cas de la Maison de la transhumance qui est en train de développer une marque de vêtements techniques fabriqués à partir de laine des moutons Mérinos d'Arles (cf. [La Routo](#)).

La réindustrialisation de la filière laine se heurte cependant à de multiples freins à la fois techniques, économiques et sociétaux qui concernent principalement les étapes de récolte et de lavage de la laine.

La qualité de la laine dépend à la fois de la race des cheptels ovins et des pratiques de tonte. Or, avec la désindustrialisation de la filière laine, les races lainières ont été délaissées en France et en Europe au profit de races à viande et à lait, tandis que les savoir-faire liés à la récolte de la laine se sont perdus progressivement. Le coût actuel d'achat de la laine n'encourage pas les éleveurs à mettre en place les conditions nécessaires à l'obtention d'une laine de qualité.

La filière laine est également dépendante des capacités de lavage. Celles-ci sont en constante diminution en Europe. En France, elles étaient de 10.000 tonnes en 1995 pour atteindre seulement 200 tonnes en 2020. La dernière station de lavage de laine semi-industrielle, située à Saugues, en Haute-Loire, utilise encore des machines datant du 19^e siècle. Sa capacité de traitement ne dépasse pas 2% de la laine française. Les dernières stations de lavage industrielles proches de la France sont situées en Belgique (près de Liège) et en Italie (à Biella). Récemment, plusieurs projets de maintien ou de relance des capacités de lavage en France n'ont pas abouti, notamment du fait de la concurrence des prix dans un marché mondialisé et d'un manque de débouchés pour une laine française.

De par ses propriétés, la laine pourrait avoir un rôle à jouer dans la substitution des matières pétrosourcées. Cependant, des freins psychologiques à revenir à une matière employée par nos grands-parents ou encore à dormir dans une matière animale pourraient contrecarrer cet enjeu. Les controverses autour du réensauvagement et de l'antispécisme pourraient également limiter le développement de la filière laine française. Le cas de la réserve de vie sauvage créée par l'association l'Aspas, à Valfanjouse, dans la Drôme illustre bien cette controverse autour du réensauvagement où les éleveurs ovins et les membres de l'association ne partagent pas la même vision de la place de l'homme au sein des paysages.

PISTES D'ÉVOLUTION ET PROCÉDÉS ALTERNATIFS

Les qualités techniques exceptionnelles de la laine et le faible impact environnemental de l'élevage ovin lui confèrent la capacité d'être une alternative sérieuse aux matières synthétiques. C'est le cas en particulier dans le domaine de la literie, de la mode, des vêtements techniques et du maraîchage. La sensibilité de la laine aux mites pourrait limiter son utilisation en tant qu'isolant dans le domaine de la construction.

Les gaz à effet de serre émis par l'élevage ovin représentent environ 1% des émissions nationales. Ils correspondent à du dioxyde de carbone (énergies fossiles), du méthane (fermentation) et du protoxyde d'azote (déjections). Concernant les déjections, les quantités d'azote sont si faibles que l'élevage ovin n'a pas un impact très significatif sur les phénomènes qui en découlent comme l'eutrophisation des cours d'eau ou l'acidification des sols.

Les pâturages d'une exploitation ont l'avantage de constituer des puits de carbone qui permettent de compenser entre 30 et 100% des émissions de cette même exploitation. Cette grande variabilité est due aux différents types d'élevages rencontrés en France : l'intensif (plutôt rare), où les bêtes sont en bergerie toute l'année et nourries aux intrants ; l'extensif, qui fait transhumier les moutons à l'année ; et enfin le plus répandu : le semi-extensif, qui fait transhumier les bêtes l'été et les garde en bergerie aux périodes les plus froides de l'année.

Les pâturages des élevages extensifs ou semi-extensifs apportent donc des puits de carbone mais ce ne sont pas leurs seuls avantages : ce sont des milieux modelés par les moutons depuis des milliers d'années et qui ont développé une faune et une flore spécifiques. Ce sont souvent des paysages difficiles d'accès où l'action de brouter prévient des avalanches et des incendies. Certains paysages pâturés depuis toujours sont même inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco. C'est par exemple le cas des Causses et des Cévennes.

À l'inverse, les procédés de lavage sont très consommateurs d'eau et d'énergie. Des optimisations de procédés permettent de limiter ces consommations, notamment grâce à la recircularisation de l'eau entre les différentes étapes du lavage.

Le traitement des effluents constitue un défi majeur dans le cadre d'une installation industrielle. Il est difficilement concevable que l'Europe continue à se décharger de cette problématique en laissant la Chine laver la laine Européenne dans des conditions environnementales interdites en Europe.

Des solutions techniques telles que la mise en place de dispositifs d'épuration intégrés au processus de lavage permettent de répondre aux exigences réglementaires européennes mais nécessitent des installations complexes et onéreuses. Une alternative pourrait être de privilégier des installations plus petites couplées à des solutions de valorisation des déchets (compostage, épandage et méthanisation).

Une innovation de rupture potentielle consisterait à utiliser le procédé de CO₂ supercritique pour laver la laine sans utiliser ni d'eau, ni de solvants (extraction à sec). À ce sujet, un projet d'innovation coordonné par le collectif Tricolor est en cours de développement.

Principales sources utilisées

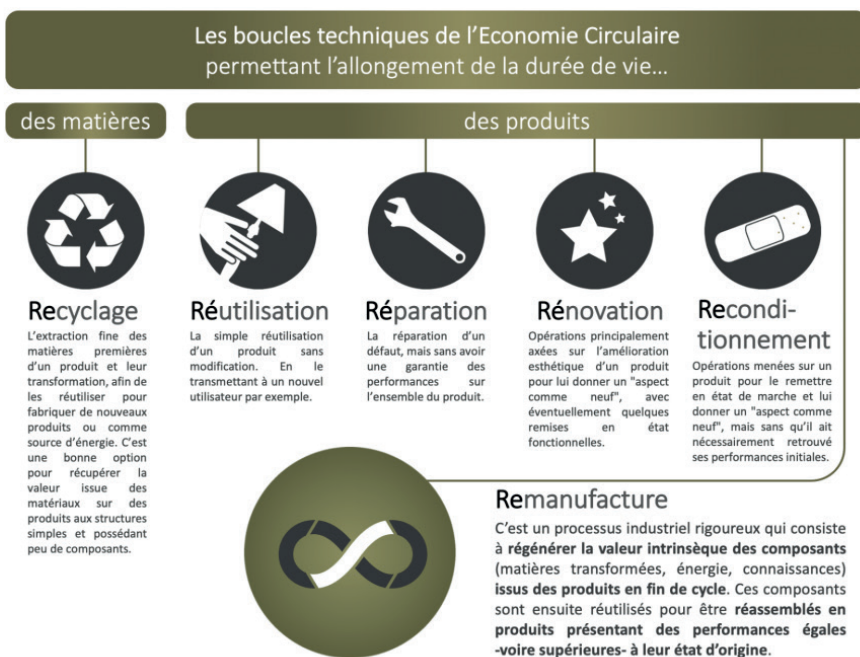
- Association Lainamac. - <https://www.lainamac.fr/>
- Atelier Laines d'Europe, Pôle laine Saugues, Lainamac (2015). *Laver la laine : le lavage des laines en Europe : urgence et avenir écologique*. - <https://atelierlainesdeurope.eu/>
- Boileau S., 220. *Étude de faisabilité : valorisation des eaux de lavage de la laine des Pyrénées*. Octobre 2020. CCI Bayonne Pays Basque. - https://www.orhi-poctefa.eu/wp-content/uploads/2021/03/Traitement-des-effluents-de-lavage-de-la-laine-FR_compressed.pdf
- Cochet, G., & Kremer-Cochet, B. (2020). *L'Europe réensauvagée: vers un nouveau monde*. Actes Sud.
- Collectif Tricolor. - <https://www.collectiftricolor.org/>
- Institut de l'élevage et Interbev (2017). *Comprendre les enjeux environnementaux de l'élevage ovin, 10 fiches*. - <https://www.inn-ovin.fr/comprendre-enjeux-environnementaux-de-lelevage-ovin/>
- Lavage du Gévaudan. - <https://lavagedelaine.fr/>
- Maison de la transhumance. - <https://www.transhumance.org/>
- Le Monde (2020). « "Ils arrivent avec leur pognon et disent : écartez-vous, c'est nous qui allons sauver la nature" : dans le Vercors, tensions autour d'une réserve de vie sauvage », 8 octobre 2020. - https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/10/08/dans-le-vercors-une-reserve-de-vie-sauvage-cristallise-l-opposition-entre-deux-visions-de-la-ruralite_6055200_3244.html
- Le Monde (2022). *Après la fourrure et les peaux exotiques, la laine : le bien-être des moutons mérinos enfin à la mode*, le 9 septembre 2022. - https://www.lemonde.fr/m-le-mag/article/2022/09/09/apres-la-fourrure-et-les-peaux-exotiques-la-laine-le-bien-etre-des-moutons-merinos-enfin-a-la-mode_6140934_4500055.html
- Reporterre.net (2022). *La laine française termine au fumier*, le 16 décembre 2022. - <https://reporterre.net/La-laine-francaise-termine-au-fumier>

LES PROCÉDÉS DE REMANUFACTURING DANS L'INDUSTRIE MANUFACTURIÈRE



En résumé – Le remanufacturing est un procédé industriel consistant à remettre un produit usagé dans un état dont les performances et les caractéristiques sont égales à sa performance d'origine, voire meilleures grâce à des opérations de retrofit, et avec une garantie équivalente à celle du produit équivalent neuf. C'est le procédé qui préserve le plus la valeur des ressources engagées (matière et composants) en permettant la multiple remise en usage du produit dans un état équivalent au neuf. Ce procédé a la particularité de répartir la création de valeur sur des chaînes de valeur « multi-locales », avec des opérations de maintien en conditions opérationnelles proches des lieux d'usage des produits et des opérations plus conséquentes de remanufacturing dans des ateliers régionalisés pour limiter les coûts de transports. En référence au dernier rapport de l'International Resource Panel de l'ONU, ce processus permet également d'obtenir une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 79 à 99% et une économie en matériaux neufs de 80 à 98% par rapport à la fabrication de produits neufs. Cela en fait un procédé stratégique pour la réindustrialisation des territoires, en favorisant l'emploi local avec une empreinte environnementale plus en ligne avec le retour dans les limites planétaires. Ce procédé reste pourtant encore marginal dans nos modes de production et de consommation, du fait de barrières techniques et financières, alors que sa mise en œuvre ne nécessite pas de rupture technologique.

LES PRINCIPALES ÉTAPES



Le remanufacturing fait partie des boucles de circularité permettant une remise en utilisation des produits dans un cycle technique. Une fois la première boucle de vie du produit terminée, celui-ci rentre dans la boucle de remanufacturing lui donnant accès à une deuxième vie.

Les procédés de remanufacturing et de reconditionnement sont associés à des garanties globales de fonctionnement du produit, qui peuvent être équivalentes au neuf dans le premier cas. Grâce à des rétrofits, la performance des produits peut même être augmentée. Ces pro-

Source : www.remanufacturing.fr

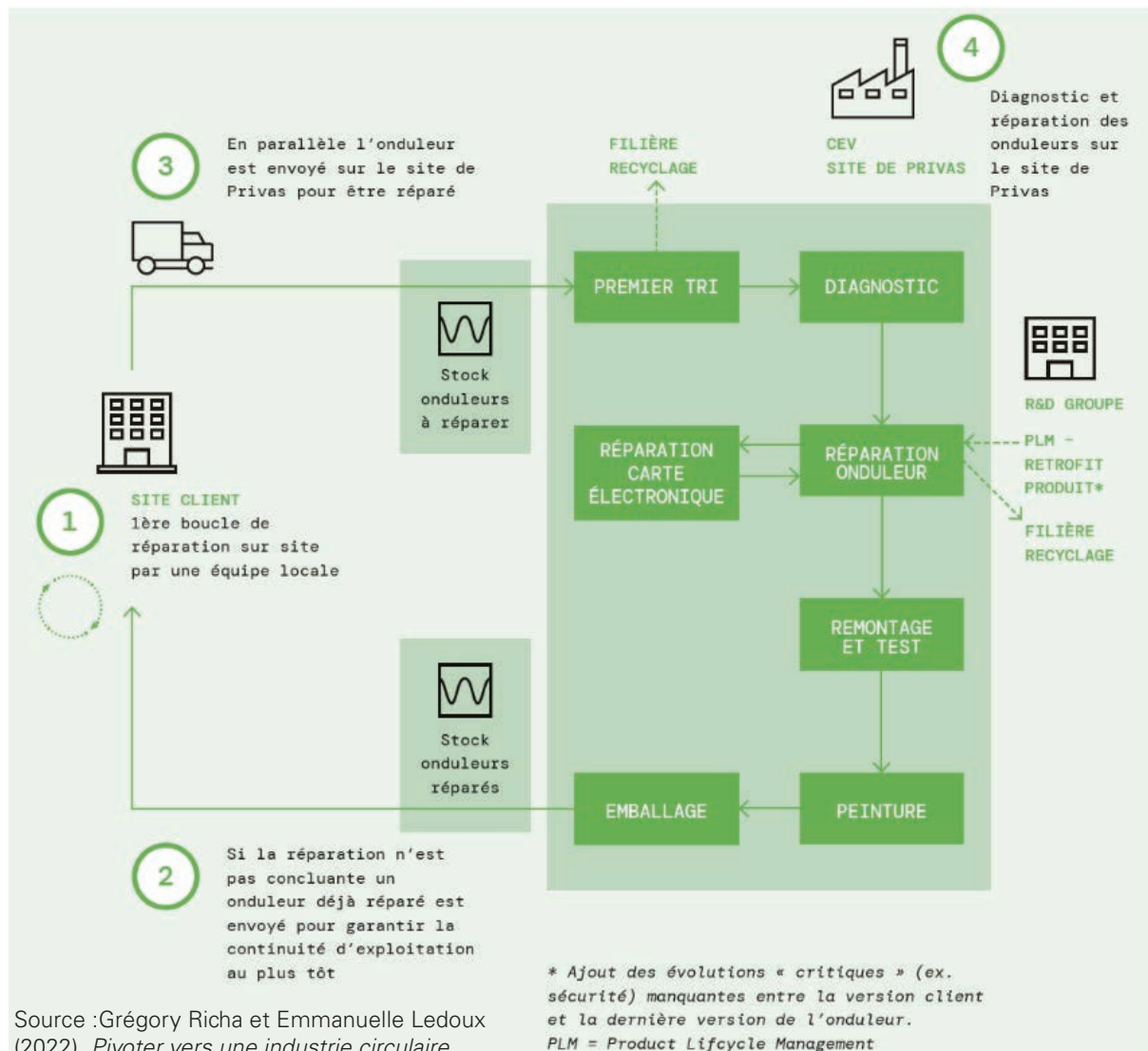
cedés ne sont pas nouveaux : des constructeurs « remanufacturent » des moteurs depuis plus de 50 ans. Il est aujourd'hui répandu dans le secteur des biens d'équipements industriels et dans les équipements de transport, avec une remanufacture des produits comme des composants. Les biens de consommation, notamment les équipements électroménagers présentent quant à eux un potentiel de reconditionnement, un procédé industriel proche du remanufacturing mais moins poussé en termes de remise à niveau.

Dans les modèles économiques de « régénération » des produits et des composants, les étapes de production sont « inversées » : on ne reçoit pas des composants mais des produits finis ou des sous-ensembles, qu'il faut démonter plus ou moins complètement pour les (re) fabriquer avant de les remettre sur le marché. L'intensité des gammes opératoires dépend des produits et de l'offre proposée : du simple reconditionnement du packaging pour des produits invendus à l'emballage abîmé jusqu'à un démontage complet pour proposer un bien « remanufacturé », dont les performances seront équivalentes à celles d'un produit neuf, voire meilleures si celui-ci a bénéficié d'un retrofit. Un travail de « dé-R&D » est réalisé pour industrialiser le démontage et la réparation de produits.

Les flux industriels de remanufacturing suivent globalement les étapes similaires suivantes :

- 1. Collecte** : le produit est en « fin d'usage » pour le consommateur. Il peut être en fin de vie légale, ou bien encore défectueux avant la fin de vie annoncé par le constructeur du produit, ou tout simplement fonctionnel, mais obsolète dans ses usages du point de vue de l'utilisateur. Il est alors collecté par l'industriel qui réalisera son reconditionnement. Cette collecte est maximisée par des mécanismes entre le vendeur et l'utilisateur qui peuvent prendre plusieurs formes : leasing, consigne, rachat direct, contrat de service, etc. L'objectif du circuit de collecte est de garantir au maximum l'intégrité du produit pour permettre sa remise à neuf et d'optimiser les flux et les coûts de collecte, en évitant de les récupérer lorsqu'ils ont été mis en décharge notamment.
- 2. Pré-inspection/tri** : l'entreprise réalise une première qualification du produit à l'aide d'un contrôle qualité standard adapté au produit (machine à laver, écran plat, panneaux solaires, etc). Cela permet d'écarter les produits qui ne seront pas remanufacturés car non rentables à la réparation ou en trop mauvais état pour être remanufacturés. Cela peut être un contrôle visuel (ex. : produit brûlé) ou un contrôle rapide du fonctionnement d'un produit (ex. : s'assurer que le tambour d'une machine à laver fonctionne, en le faisant tourner à la main).
- 3. Stockage** : en attente d'une commande. Les produits/composants non éligibles sont redirigés vers un flux de démantèlement pour recycler un maximum des composants et matières les constituant.
- 4. Désassemblage** : le produit passe alors sur une chaîne de désassemblage, flux qui est dissocié de la chaîne de montage. Les opérationnels monteurs doivent être formés au démontage car il ne suffit pas toujours de monter à l'envers.
- 5. Nettoyage** : les composants et l'extérieur du produit sont nettoyés. Les procédés utilisés usuellement sont le sablage ou l'aérogommage par exemple.
- 6. Inspection** : les composants sont inspectés, afin d'échanger les composants défectueux et de conserver les autres. Il est également possible d'inspecter les composants, pour connaître la version du produit et ainsi pouvoir remplacer un composant par un autre qui sera doté de bien plus de fonctionnalités, permettant à partir d'un même produit, d'augmenter les usages de ce dernier (ex. : capteur, carte électronique, etc.).
- 7. Usinage si besoin** : certains produits peuvent nécessiter de l'usinage. Par exemple des composants comme des roulements industriels ou des sous-ensembles en acier qui ont subi une usure lors leur utilisation peuvent être ré-usinés et remis dans un état comme neuf. Cela suppose que ces éléments aient été conçus avec une sur-côte permettant plusieurs ré-usinages et donc cycles de vie.
- 8. Réassemblage** : le produit est réassemblé. Selon la complexité du produit, il peut même être remonté sur la chaîne de montage classique, tel un produit neuf, en suivant les contrôles qualités usuels pour un produit neuf.
- 9. Inspection finale** : le produit passe les contrôles techniques, tel un produit neuf, afin de garantir la même qualité de fonctionnement au consommateur. Cela lui vaudra alors les mêmes garanties acheteur que les produits neufs à savoir 6 mois ou 1 an par exemple.
- 10. Conditionnement** : le produit remanufacturé est conditionné, stocké et mis en vente ou envoyé directement au client dans le cas d'une commande directe.

Le schéma ci-dessous illustre le flux de bout en bout de l'offre « remanufacturing » de la société Construction Électrique du Vivarais (CEV), filiale de Schneider Electric.



Source :Grégory Richa et Emmanuelle Ledoux (2022), *Pivoter vers une industrie circulaire*.

FOCALE SUR LE REMANUFACTURING DES ÉQUIPEMENTS DE TRANSPORT ROUTIER

Pour limiter l'utilisation des matières premières et l'impact environnemental des véhicules qu'il fabrique, notamment son empreinte carbone, Renault Trucks a adopté une démarche d'économie circulaire qui prend en compte la seconde et troisième vie des véhicules, leur réemploi sous diverses formes et leur recyclage. Cette démarche s'appuie sur trois boucles de circularité :

- **Régénérer** : des véhicules utilisés intensivement pendant trois ou quatre ans sont reconditionnés dans l'un des Used Trucks Centers de la marque et mis à jour avec les logiciels les plus récents. Ils sont ensuite restitués à leur propriétaire pour une remise à la route pour trois années supplémentaires d'exploitation, ou revendus. Ces camions régénérés seront ainsi utilisés au maximum de leurs capacités, pour assurer une pleine exploitation au-delà du million de kilomètres. Une approche marketing spécifique est également adoptée pour créer des séries d'occasion spéciales, qui n'existent pas dans le neuf, et rendent le véhicule d'occasion désirable.
- **Reconvertir** : des camions d'occasion Renault Trucks sont transformés selon des processus industriels stricts pour être destinés à un nouvel usage. À la Used Trucks Factory, atelier spécialisé de transformation des camions d'occasion situé au sein du site industriel de Bourg-en-Bresse, des tracteurs longs routiers deviennent ainsi des por-

teurs ou des camions d'approche chantier. En concession, certains véhicules peuvent également faire l'objet de rétrofit pour devenir compatible avec le biocarburant B100. À terme, la conversion de châssis thermiques en camions électriques est également à l'étude.

- **Recycler** : cela consiste à récupérer les pièces qui peuvent être rénovées pour être ensuite réinjectées dans le circuit après-vente. Aujourd'hui, les opérations de remanufacturing des moteurs, boîtes de vitesses, injecteurs et filtres à particules sont menées dans l'usine du constructeur à Limoges. Le chiffre d'affaires de l'usine est de 50 millions d'euros pour 270 employés, pour un volume de 1500 moteurs, 13000 transmissions et 100 000 sous-ensembles. Le constructeur évalue par ailleurs la mise en place d'une filière de recyclage et de réutilisation de pièces pour poids lourds. Le taux de recyclage d'un camion peut atteindre jusqu'à 95%.

Avec ces démarches, Renault Trucks prolonge la durée de vie de ses véhicules en utilisant des pièces neuves mais également rénovées : une approche doublement durable puisque le recyclage contribue à la fois aux opérations de régénération et de reconversion. À horizon 2025, l'objectif est de faire passer de 14% à 30% la part des « pièces circulaires » sur le total des ventes.

ENJEUX MATÉRIELS ET ORGANISATIONNELS AUTOUR DES PROCÉDÉS DE REMANUFACTURING

Ces enjeux peuvent être résumés en 5 axes :

1. Conception pour le remanufacturing

Pour être opérants, les procédés de remanufacturing nécessitent une attention spécifique dès la conception des produits. On parle de « Design for Remanufacturing » pour maximiser la capacité des procédés industriels. Pour être remanufacturés, les produits doivent pouvoir être démontés et remontés entièrement en changeant les pièces d'usure et éventuellement en installant des rétrofits, pour proposer des produits équivalents à des neufs, voire encore meilleurs.

Pour atteindre un tel niveau, il faut concevoir le produit comme étant entièrement démontable et faire en sorte qu'environ 70 à 80% des pièces soient réutilisables afin que le modèle soit rentable (minimisation des coûts de main-d'œuvre et matières). Dans certains cas, il faudra par exemple prévoir des cotes d'usinage suffisamment hautes pour un ré-usinage multiple de la pièce, ainsi que des kits de réparation pouvant être proposés à des partenaires pour multi-localiser le modèle.

Dans le cas de productions intégrant du numérique, il faut s'assurer de ne pas verrouiller l'usage du produit en cas d'obsolescence des composants. Pour cela, il faut soit intégrer des systèmes simples, interchangeables, soit prévoir une architecture technique qui ne dépende pas de composants ou systèmes obsolètes (mises à jour logicielles à distance et upgrading technologique possible au niveau du système). Enfin les pièces non remanufacturables doivent être pensées pour être démontables et recyclables facilement, les matières doivent donc être choisies en conséquence et séparables aisément.

D'après l'*Étude sur la Remanufacture* de l'Ademe : « Tous les produits ne sont pas remanufacturables. Ceux qui ont un rythme lent d'évolution technologique (machines de chantier *versus* smartphones), ceux qui sont durables (suffisamment solides pour résister à plusieurs cycles de vie et plutôt constituées de métal plutôt que de plastique), ceux qui ont une valeur résiduelle relativement élevée (transmissions automatiques par exemple) et ceux qui sont désassemblables (ordinateurs *versus* téléviseurs) apparaissent comme les plus appropriés à la remanufacture ».

2. Bascule vers des produits ouverts

Le « produit ouvert » (concept développé par le philosophe Gilbert Simondon) désigne un objet qui n'est pas destiné à se transformer en déchet, car il peut toujours être maintenu en état de (re)construction par un utilisateur-réparateur. Cette conception se situe à l'inverse d'un « objet fermé » dont la durée de vie est réduite par la non-possibilité d'agir sur le produit.

Pour permettre l'ouverture des produits, il est nécessaire de garantir une traçabilité de bout en bout.

- Connaître l'origine du produit et sa composition permet de valoriser la circularité développée en amont (matériaux gérés durablement, provenance, ...) et de connaître par avance la nature des matériaux lorsque le produit entre en phase d'usage, de régénération ou de fin vie (avoir l'information sur la biodégradabilité d'un emballage pour savoir quoi en faire en fin de vie, par exemple).
- Connaître les événements ou certaines données d'usage permet de mieux agir pour anticiper les casses ou repérer les pièces critiques.
- Enfin, assurer une interopérabilité des données (plans, informations techniques, recyclabilité, pièces de sécurité, ...) permet à de multiples acteurs d'agir sur le produit sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

Le design de produits « ouverts », en France comme ailleurs, n'a pas été privilégié ces dernières décennies sur les biens de consommations, sauf par quelques acteurs pionniers (Fairphone ou Seb par exemple). La logique de conception a plutôt été tirée par le « design to cost » avec une réduction de la qualité, de la fiabilité et la possibilité de réparer pour « moins cher qu'un produit neuf ». Les freins aux produits ouverts sont l'abaissement des prix de vente et des modèles économiques fondés sur une accélération de la mise sur le marché de nouvelles références, sans recherche d'allongement d'usage. Pour les biens d'équipements industriels (moteurs de camions, pelleteuses, robots industriels), la situation est différente : pour se différencier sur les marchés, certains industriels ont, en complément des approches « design to cost », développé des approches permettant de donner de nouveaux cycles de vie aux produits/composants : retrofit de robots (ABB), remanufacturing de moteurs (Renault Trucks), etc.

3. Structuration des marchés

Selon les procédés, les prix peuvent osciller entre 30% (réutilisation) à 70%, voire 150% (remanufacturing suite à des ruptures conjoncturelles des produits) du prix du neuf. Ils peuvent représenter jusqu'à 20% des ventes par rapport à la vente de produits neufs pour le fabricant d'origine. Certains industriels sont même spécialisés dans le reconditionnement et le remanufacturing d'équipements industriels. Certains industriels poussent que le prix du remanufacturing soit supérieur au prix du neuf, car ces produits sont moins carbonés et ont donc une valeur environnementale supérieure sur le marché.

Pour être écoulés, ces produits demandent une structuration des marchés : mise en place des flux physiques et des réseaux de collecte de réparation, mécanismes de collecte (consigne, rachat, ...), déclinaison de gammes produits sur le marché selon les niveaux de remise à neuf (pièces de rechange en l'état, reconditionnées, remanufacturées, ...). Plusieurs marchés fonctionnent en mode multi-acteurs et se structurent autour de marketplace spécialisées pour mettre en relation industriels et acheteurs et permettre ainsi la massification des flux.

D'après l'*Étude sur la Remanufacture* de l'Ademe, la France et l'Europe présentent de nombreux atouts pour développer le remanufacturing : bassins industriels dynamiques, pôles de compétitivité, présence de leaders industriels fabricants et déjà acteurs de ce modèle (auto, aéronautique, robots industriels, ...) et annonces récentes de projets permettant de promouvoir le concept (usine Refactory de Renault à Flins).

Les freins restent cependant nombreux au développement du Remanufacturing :

- Absence de définition du concept qui ne permet pas une bonne différenciation des produits ;
- Freins réglementaires et juridiques, par exemple interdiction d'utiliser des composants remanufacturés pour entretenir ou réparer des véhicules encore sous garantie ;
- Manque de structuration du marché : pas de cartographie des acteurs, pas d'organisme national ;
- Concept absent des stratégies et politiques industrielles nationales (contrairement à la Chine, l'Écosse, ...) et ne figurant pas dans les objectifs des éco-organismes ;
- Coût de main d'œuvre relativement élevé et innovation technologique peu avancée pour rendre les activités industrielles plus productives et compétitives ;

- Malgré l'annonce de projets, absence de démonstrateurs industriels, poussant chaque entreprise à développer la R&D seule, sans synergie.

4. Valeur environnementale Contrairement au processus de recyclage qui ne récupère qu'une partie de matières et d'énergie contenues dans le produit, le remanufacturing permet de récupérer la majeure partie de la matière, de l'énergie et de l'information qui a été intégrée dans le produit lors de sa fabrication, en les ré-utilisant dans un nouveau cycle de vie. En référence au dernier rapport de l'International Resource Panel de l'ONU, ce processus permet également d'obtenir une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 79% à 99% et une économie en matériaux neufs de 80 à 98% par rapport à la fabrication de produits neufs.

5. Industrialisation des flux

D'après la dernière étude de marché réalisée en Europe le nombre de sites industriels opérant du remanufacturing est significatif :

Secteurs ^a	Chiffre d'affaires (Md €)	Nb entreprises	Emplois ('000)	Nb Cores ('000)	Intensité ^b
Aéronautique	12,4	1 000	71	5 160	11,5%
Automobile	7,4	2 363	43	27 286	1,1%
Engins de chantier	4,1	581	31	7 390	2,9%
Équipements électriques et électroniques	3,1	2 502	28	87 925	1,1%
Machinerie	1	513	6	1 010	0,7%
Équipements médicaux	1	60	7	1 005	2,8%
Industrie ferroviaire	0,3	30	3	374	1,1%
Mobilier	0,3	147	4	2 173	0,4%
Industrie navale	0,1	7	1	83	0,3%
Total	29,8	7 204	192	132 405	1,9%

Tableau 5 : chiffres clefs du marché européen de la remanufacture par secteur (source : EU remanufacturing market study, ERN, 2015)

Chiffre d'affaires (M €)	Allemagne	Royaume-Uni & Irlande	France	Italie	Pays méditerranéens ²¹	Europe de l'Est ²²	Europe Centrale ²³	Pays Nordiques ²⁴	Benelux ²⁵	Total (M €)
Aéronautique	3 814	2 698	2 311	1 127	816	513	399	368	389	12 436
Automobile	2 370	766	754	699	790	692	652	273	395	7 393
Engins de chantier	1 108	509	633	541	380	343	227	242	160	4 142
Équipements électriques et électroniques	646	190	355	592	311	578	230	106	111	3 118
Machinerie	336	90	108	199	70	81	45	53	44	1 026
Équipements médicaux	316	121	112	61	68	104	70	83	36	971
Industrie ferroviaire	61	49	22	39	48	41	46	27	11	343
Mobilier	66	34	24	66	23	52	16	18	10	310
Industrie navale	11	6	3	8	13	15	2	83	11	76
Total	8 728	4 463	4 322	3 333	2 519	2 420	1 687	1 173	1 167	29 813

Tableau 6 : valeur du marché de la remanufacture par pays et par secteur (source : EU remanufacturing market study, ERN, 2015)

Source : EU remanufacturing market study, ERN, 2015

La variabilité des produits entrants rend l'automatisation des processus complexes et les savoir-faire manuels reviennent plus largement dans les cœurs d'usine. Un travail important autour de l'acceptabilité par les employés doit être mené, car la reconversion d'un site classique produisant du neuf en site de remanufacturing peut être perçue comme un déclassement par une partie des employés. Les conditions de travail peuvent être également difficiles, lorsque des déchets sont maniés ou doivent être nettoyés avant réparation. Sans organisation industrielle, l'activité n'est pas rentable et/ou non répliquable à l'échelle. Si des cobots (ou robot collaboratif, un robot destiné à l'interaction directe homme-robot dans un espace partagé, ou où les humains et les robots sont à proximité) peuvent être installés pour faciliter les opérations et le numérique intégré pour piloter les flux, les processus restent cependant intensifs en main-d'œuvre.

Plusieurs industriels ont développé des sites ou des lignes de remanufacturing et qui permettent d'observer ce procédé. Par exemple l'usine Renault Trucks de Limoges (remanufacturing de moteurs), l'usine Schneider Electric de Privas ou celle de Moirans (remanufacturing de transformateurs de puissances).

Par ailleurs, la demande et les approvisionnements sont moins prévisibles que dans le modèle linéaire, entraînant la formation de stocks qui nécessitent eux aussi de la place. Si les surfaces de stockage ne sont pas suffisantes, elles ne feront pas tampon, avec le risque dès lors, de perdre des équipements qui auraient pu être réparés. Le stock de pièces de rechange est également piloté pour mettre de côté des composants de produits en fin de vie, afin de les réintégrer dans des produits qui seraient réparables. L'impression 3D peut également être utilisée sur certains composants pour éviter de stocker et produire à la demande.

Enfin, de nouvelles compétences et une culture spécifique sont à développer : le démontage est souvent plus compliqué qu'un « montage à l'envers », ce qui nécessite la formation des équipes et des procédures de qualification des produits et composants afin de garantir le même niveau de performance que pour la production de produits neufs. Il est crucial d'accompagner les équipes dans une transformation stratégique du linéaire au circulaire, afin de leur apporter la vision et l'engouement qui leur permettront de se projeter dans ces évolutions, ainsi que les formations nécessaires. Cela est vrai également à l'échelle des territoires, le remanufacturing est un métier de savoir-faire industriels comme la chaudronnerie, l'usinage, l'électro-mécanique, etc. ; des métiers aujourd'hui en forte tension du fait de la réindustrialisation et la perte de nombreuses filières de compétences ces dernières décennies.

PISTES D'ÉVOLUTION ET PROCÉDÉS ALTERNATIFS

Le secteur de la réparation en France représente en 2018 environ 125 000 entreprises, plus de 226 000 emplois dont plus de 65 % d'emplois salariés, pour un chiffre d'affaires total de 26 milliards d'euros, hors distributeurs impliqués dans une activités de réparation (ex. : Darty, Boulanger, etc). Deux secteurs réalisent 95 % du chiffre d'affaires de la réparation et représentent près de 90 % de l'emploi : l'automobile et les équipements électriques et électroniques.

Les procédés de remanufacturing utilisés dans ces secteurs sont largement basés sur les procédés de fabrication existants. Leur mise en œuvre dépend essentiellement de la capacité des acteurs à créer les chaînes logistiques de récupération des produits, à conserver les pièces de rechange sur des durées de vie suffisamment longues et à permettre la traçabilité des produits et de leur usage pour permettre leur diagnostic et leur réparation.

Les pistes d'évolution concernent essentiellement l'essaimage de ces procédés à un panel beaucoup plus large de produits. Par exemple, seulement 1 % de l'électroménager mis sur le marché est aujourd'hui issu de filières de reconditionnement. D'autres produits, stratégiques pour le développement de l'énergie verte et des nouveaux usages sont encore loin d'être conçus pour être reconditionnés ou remanufacturés. Citons par exemple les éoliennes, dont les pales sont dans la grande majorité des modèles enfouies en fin de vie, les batteries électriques, qui par manque de standardisation entre les fabricants (une quinzaine aujourd'hui), n'ont pas encore de filière de réemploi, les panneaux solaires dont les filières de recyclage peinent à émerger et dans lesquelles le réemploi est encore marginal (ENVIE pense réemployer 5 % de 4 000 panneaux récupérés chaque année, pour 95 % destinés au recyclage sur son site de Nantes par exemple).

Des réflexions en amont de la création des nouvelles grandes filières technologiques devraient être considérées au niveau politique et dans les plans de développement industriel à l'échelle européenne : penser aux infrastructures et aux filières de compétences nécessaires aux activités de remanufacturing dès le développement des grands filières, forcer la standardisation des produits et donc la réduction de la complexité pour opérer et maximiser les cycles de réutilisation, avec une attention particulière pour les matériaux stratégiques, créer un label autour du remanufacturing pour structurer et développer les marchés. Cela permettrait, à court terme, de gagner en résilience en maximisant les flux sur les produits pouvant déjà être remanufacturés sur le territoire et à moyen terme, de gagner en souveraineté, créer de nouveaux acteurs industriels et emplois locaux tout en réduisant significativement l'empreinte écologique du développement industriel français.

Principales sources utilisées

- Remanufacturing European Network. - <https://www.remanufacturing.eu/>
- ERN, EU remanufacturing market study, 2015
- Plateforme française sur le remanufacturing. - www.remanufacturing.fr
- Ademe, étude sur la remanufacture, 2023. - <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/6249-etude-sur-la-remanufacture.html>
- Ademe, édition 2019, *Les français et la réparation: Perceptions et pratiques*. - <https://harris-interactive.fr/wp-content/uploads/sites/6/2020/06/rapport-francais-reparation-perception-pratique-2020.pdf>
- Grégory Richa et Emmanuelle Ledoux, 2022. *Pivoter vers une industrie circulaire*. Éditions Dunod.
- Sur les batteries électriques. - <https://www.mobilize.com/cycle-de-vie-de-la-batterie/economie-circulaire-de-la-batterie-du-vehicule-electrique/>
- <https://www.clubic.com/transport-electrique/article-892870-1-sr-recyclage-reutilisation-quelle-seconde-vie-batteries-voitures-electriques.html>
- *Sur les panneaux photovoltaïques*. - <https://www.envie.org/nos-actualites/actualites/envie-innove-5-reemploi-de-panneaux-photovoltaïques-aquitaine/>
- <https://objectifaquitaine.latribune.fr/innovation/2022-09-28/panneaux-solaires-un-site-de-reemploi-unique-en-europe-ouvre-en-gironde-934367.html>

Analyse transversale

Le panorama des tendances et les focus illustrent la grande vivacité des innovations de procédé et leur impact sur la production, l'utilisation et la fin de vie des matériaux.

Quelques éléments d'analyse ressortent de la lecture transversale de ces focus.

Les innovations de procédés : à la croisée des enjeux de productivité, de souveraineté et de transition

Le tour d'horizon offert par cette étude permet de constater que les procédés de transformation de la matière ont joué un rôle central dans l'évolution des techniques au cours de l'histoire, avec une diversification et une complexification spectaculaire depuis la révolution industrielle – et plus encore au cours des dernières décennies. Ces innovations ont été en grande partie motivées par une recherche de gains de productivité et d'efficacité au service de modèles économiques capitalistes, globalisés et s'inscrivant dans une idéologie de la modernité et du progrès.

Dans un contexte d'abondance énergétique, de transition numérique et de mondialisation de l'économie, cette course à la productivité a eu au cours des dernières décennies des conséquences qui sont de plus en plus perçues comme négatives – en particulier une perte de souveraineté des États et une accélération de la destruction des conditions de vie (climat, biodiversité, etc.). Les innovations de procédés reposent aujourd'hui en grande partie sur ce dilemme : parvenir à atteindre une certaine compétitivité/rentabilité tout en participant à la transition écologique, et sans mettre en péril la souveraineté des États.

- Le cas des **procédés photovoltaïques** est symptomatique : la filière, qui occupe une place centrale dans la transition énergétique, est parvenue à atteindre un niveau de rentabilité sans précédent au cours des quinze dernières années, au point de faire de l'énergie solaire le moyen de production d'électricité le moins cher. Cette performance a été rendue possible en optimisant des procédés de la filière silicium dans une logique de gains de productivités très classique, passant notamment par l'automatisation, la course au gigantisme des unités de production à tous les stades de la fabrication, et la concentration géographique de ces unités en Chine – ce qui génère des menaces de souveraineté pour le reste du monde. Dans le même temps, des procédés concurrents se sont développés, mais sans parvenir à rattraper les procédés de la filière silicium.
- Le cas des **procédés lithographiques** est tout aussi parlant : au cœur de l'industrie numérique, ils sont parvenus à atteindre des niveaux de performance et de compétitivité qui étaient inimaginables il y a encore quelques années. Mais la concentration des moyens de production qui a été nécessaire pour concilier performance et compétitivité a créé des dépendances extrêmement fortes, qui sont aujourd'hui au cœur des tensions internationales.

Quels niveaux d'intensité technologique pour la transition écologique ?

La complexification des procédés se traduit par une intensification technologique croissante, qui va de pair avec des chaînes de valeur spécialisées et globalisées. Elle entraîne également une « fermeture » des usages (impossibilité de réparer et d'agir en autonomie sur les produits/procédés) et augmente les dépendances des territoires les uns envers les autres. Les logiques de croissance économique et de consommation sont tirées par ces innovations technologiques pour créer de la différenciation « produit » et de la productivité.

À l'inverse, des procédés à plus basse intensité technologique existent. Ils sont pour la plupart déjà disponibles (procédés hydro-mécaniques par exemple), ouverts – au sens de Gilbert Simondon – et en plus, pour les *low tech*, conviviaux, au sens d'Ivan Illich. Ils vont de pair avec des emplois plus nombreux (moins d'automatisation), une territorialisation des chaînes de valeur, une empreinte écologique plus frugale et des modes de

consommations plus sobres. Ils peuvent également, comme c'est le cas des technologies vivantes, s'inscrire dans les cycles biogéochimiques du vivant sans les perturber.

Le choix des procédés induit donc des systèmes sociotechniques et d'infrastructures différents en fonction de leur intensité technologique. Le passage à l'échelle de ces procédés conditionne ainsi les territoires. Par exemple, l'hyperconnexion des machines est lié au déploiement d'infrastructures permettant la 5G et une dépendance aux pays détenteurs de technologies de pointe ; la *fast fashion* est liée à une délocalisation des procédés de fabrication dans les pays à bas coûts et des flux de déchets dirigés vers les pays en voie de développement ; le développement du remanufacturing est lié à la promotion de labels européens, il s'appuie sur des outils industriels en partie déjà existants et le développement de l'emploi local sur des métiers manuels, etc.

- L'exemple des **procédés photovoltaïques** fondés sur les technologies à impression (couches minces) est un exemple intéressant de technologie qui permettrait la production de cellules quasi sur-mesure, dans des usines de production décentralisées ou «de quartier», de type Fab-lab, en opposition avec le modèle très centralisé qui domine aujourd'hui le marché.
- Le cas de **la laine** est un exemple qui illustre bien le concept de technologie vivante. Les bénéfices écologiques des pratiques d'élevage ovins extensif sont bien documentés : puits de carbone, biodiversité, entretien des paysages, etc. La laine française est actuellement largement sous-exploitée alors que ses propriétés techniques lui confèrent la capacité de se substituer à des matières issues de la pétrochimie dans certaines applications (textile, literie, etc.). Une réindustrialisation des procédés de lavage de la laine permettrait de lui trouver un débouché tout en répondant aux impératifs de la transition écologique.

D'autres clivages apparaissent autour de ces enjeux d'intensité technologique : par exemple, en matière de transition écologique, la tendance de nombreuses innovations semble encore s'inscrire dans une optique de soutenabilité faible, caractérisée par l'idée que les innovations technologiques (parfois de rupture) permettront de répondre à l'essentiel des défis écologiques. Pourtant, une part grandissante de la communauté scientifique nous alerte sur la nécessité d'une soutenabilité forte pour maintenir les conditions d'habitabilité de la terre. En termes d'innovation, il s'agirait ainsi de miser tout autant sur l'innovation sociale et comportementale que sur l'innovation technologique – et même dans certains cas d'aller vers une forme de désinnovation.

Ces quelques exemples montrent que, même pour atteindre un objectif aujourd'hui consensuel comme la neutralité carbone, il existe une pluralité de chemins possibles, mobilisant des formes d'innovation, de technologies et de procédés très différents. En la matière, rien n'est encore écrit, comme l'Ademe (2021) a par exemple commencé à l'illustrer à travers ses différents scénarios de transition vers un monde post-carbone.

Un enjeu de temporalité à ne pas négliger : changer vite aujourd'hui, ou de manière disruptive demain ?

La transition écologique et énergétique est aujourd'hui au cœur de nombreux discours sur les innovations de procédés. Or la comparaison des technologies proposées fait parfois apparaître des écarts entre, d'un côté, des technologies de faibles intensités technologiques qui pourraient être rapidement mises en œuvre et, de l'autre, des technologies disruptives qui demandent encore du temps avant d'être déployées – si tant est qu'elles le soient réellement un jour. En contexte d'urgence écologique ou climatique, cette temporalité dans les horizons de déploiement peut jouer un rôle crucial.

- Par exemple, le **remanufacturing** est une innovation de procédé de faible intensité technologique par rapport aux technologies déjà existantes. Un industriel qui sait fabriquer une machine est également capable de la remettre à niveau d'un point de vue industriel, dans la mesure où son produit a été conçu pour. Les procédés de remanufacturing et de reconditionnement ont donc des horizons d'effectuation de quelques mois à quelques années.

- Au contraire, des innovations de haute intensité technologique relevant de la « Deep Tech » (c'est-à-dire visant des ruptures technologiques), comme par exemple la **rupture hydrogène** dans les secteurs de l'acier ou celui des engrais, ne peuvent être déployées qu'à l'horizon de plusieurs années ou décennies, du fait de leur faible maturité actuelle.

Des limites physiques longtemps ignorées et des chaînes de valeurs mondialisées obsolètes qui vont imposer une certaine sobriété/frugalité ?

Les évolutions de procédés se sont opérées jusqu'à présent sans parvenir à diminuer les flux de matière et d'énergie. Ce contexte de disponibilité des ressources est aujourd'hui remis en cause. Tout laisse en effet à penser que la confrontation avec certaines limites physiques nous amène à devoir composer avec moins d'eau disponible, moins d'énergie et sans doute moins de ressources matérielles. La rareté et les pénuries vont ainsi devenir une nouvelle donne à prendre en compte tant la consommation exponentielle des ressources va devenir de plus en plus impossible, pour des causes d'approvisionnement ou de réglementation. D'ores et déjà, on a pu voir certains procédés se retrouver à l'arrêt du fait de ces conditions dégradées : des centrales nucléaires arrêtées en période de canicule et de sécheresse, des entreprises grosses consommatrices de gaz obligées d'arrêter leurs fours du fait de la guerre en Ukraine, etc. Certains procédés sont plus résilients que d'autres face à ces menaces de pénurie.

- Les procédés de **remanufacturing** ont par exemple l'avantage de soutenir des modes de consommation moins carbonés (allongement de la durée de vie des produits, réduction des quantités d'énergie nécessaire à la production des biens), de réduire la pression exercée sur les ressources et la biodiversité (réduction des approches extractives, réduction des quantités d'eau nécessaires à la production), de développer l'emploi local et de contribuer à la réindustrialisation et à la souveraineté. Les entreprises développant ces modèles ont également une résilience accrue sur une partie de l'activité, liée à leur capacité à récupérer auprès de leurs clients les équipements après usage pour leur donner de secondes vies et le cas échéant récupérer les matériaux stratégiques pour les recycler, en se découplant des chaînes de valeur mondiales.

Une relocalisation des procédés engagée, mais qui reste confrontée à de puissants freins

Enfin, les relocalisations de certains procédés (et plus généralement la réindustrialisation) sont depuis quelques années avancées comme des solutions pour répondre aux enjeux de souveraineté et de transition écologique (mix énergétique moins carboné en Europe, réglementation plus stricte du point de vue environnemental, réduction des émissions liées au transport, etc.). Mais si cette relocalisation des procédés industriels semble faire l'unanimité, elle est en réalité confrontée à de réels freins, comme la concurrence des coûts de production, la perte de savoir-faire, la concentration capitaliste des outils industriels et des capacités d'innovation, l'accès aux matériaux, l'acceptabilité sociale des nuisances liées à certains procédés industriels ou d'extraction, etc.

- La **lithographie** du numérique et les **procédés de la filière photovoltaïque** sont des cas symptomatiques des défis posés par une relocalisation de la production en Europe, dont on sait qu'elle ne pourra plus aujourd'hui être compétitive face à la production asiatique en l'état actuel des technologies, de la concentration des moyens de production et de l'ouverture des marchés à la concurrence asiatique.
- La filière textile, notamment la **filière de la laine**, montre la difficulté de réappropriation des outils et des savoir-faire une fois que ceux-ci ont disparu. Elle montre également que la réduction des intermédiaires ne permet pas pour autant de compenser les coûts de production plus élevés liés au coût de la main d'œuvre, à une réglementation plus stricte et à la moindre concentration des procédés.

La relocalisation passera par une réindustrialisation et une vraie volonté publique. Elle devra être pensée à l'échelle des territoires tant l'opérabilité des procédés techniques dépend des bassins de compétences et des capacités industrielles déjà installées. Pour que la réindustrialisation réponde aux enjeux d'autonomie et aux attentes sociales,

la réflexion et la planification des filières devra intégrer l'ensemble du cycle de vie des produits. Pour les procédés, cela voudra dire de penser un développement intégrant, au-delà de la production du produit neuf :

- des procédés de production de matières sur des territoires locaux, à l'échelle de l'Europe et du bassin méditerranéen,
- le développement de procédés frugaux, au-delà de la consommation d'énergie, vis-à-vis des ressources locales, comme l'eau par exemple,
- des procédés permettant les boucles de circularité, bien en amont du recyclage.

Annexes

Étapes du cycle de vie

Sources

Étapes du cycle de vie	Procédés				Caractéristiques			Impacts potentiels du procédé				
	Application	Sous application	Nom et descriptif du procédé	Exemples d'entreprises	Intensité technique (numérique, énergétique, équipements, ...)	Complexité organisationnelle	Niveau de maturité / de déploiement / Lieu d'effectuation	Productivité	Souveraineté	Transition écologique	Préservation des ressources (matière première, énergie)	Biodiversité
Extraction des matières premières	Extraction des ressources minérales	Extraction des roches riches en minéral	Plusieurs possibles : Exploitation à ciel ouvert, souterraine, par dissolution, par lixiviation in-situ.	Vermilion, Lundin, Geopétrol, Petrorep, SPPE, Total, Engie, Oil and Gas Climate Initiative (OGCI), qui regroupe BP, Chevron, ExxonMobil et Shell,	+++	+++	En 2019 : 100 millions de barils de pétrole produits / jour, avec : USA (19%), Arabie Saoudite (12%), Russie (11%) et environ 95 millions de barils de pétrole consommés / jour, avec : USA (20%), Europe (15%), Chine (14%). En 2019, 4 000 m ³ de gaz naturel produits / jour, avec US (23%), Russie (17%), Iran (6%). Les trois plus gros consommateurs sont : USA (22%), Europe (14%), Russie (11%)	Responsables de plus de 40 % des EGES comme le CO ₂ et le méthane. Ce chiffre englobe leur activité au sens large, depuis l'extraction des hydrocarbures jusqu'à leur consommation par le client final.	La monoculture affecte grandement les écosystèmes et la structure des sols : - en limitant la biodiversité, elle rend la culture particulièrement fragile aux maladies. - en ne permettant pas au sol de récupérer les nutriments nécessaires, les plants sont plus vulnérables. La PAC encourage la diversification des			
			La roche est abattue à l'explosif, dans des carrières à ciel ouvert. Les blocs fragmentés sont chargés dans des dumpers pour alimenter des concasseurs.							On estime, en France, que la monoculture de maïs s'étend sur 519 000 hectares et concerne 13 600 exploitations (soit environ 13 % des exploitations françaises cultivant du maïs). En quelques années, la monoculture intensive a profondément bouleversé les paysages de nos		
			Beaucoup plus meuble : est exploitée au moyen d'excavateurs ou de roues-pelles avant d'être transportée par camions.								Grosse productivité depuis des années, mais depuis peu, il y a des contre-exemples : dans le Languedoc-Roussillon et en Provence, une étude sur une parcelle en rotation tournesol/pois/colza a montré que les monocultures affichaient un	
Extraction de pétrole et gaz	Forage de pétrole et de gaz	L'extraction est effectuée par des puits forés dans la roche-réservoir, qui canalisent le pétrole vers les installations de traitement situées en surface : le pétrole jaillit naturellement lorsque la pression du gisement est élevée, mais une pompe doit être installée par la suite après que la pression ait chuté.	Engrais pas produit en France, dépendance au pétrole, ...	++	Tracteurs, engrais, pesticides, ...	Pluôt des céréalières et d'autres : soja, canne à sucre, coton, eucalyptus, pin						
		Calcaire					Avec ou sans la bour					
		Argile						Monoculture : culture d'une seule espèce de plantes sur une même parcelle au cours des années successives				
Biosourcing d'origine végétale												

Non développé

Étapes du cycle de vie	Procédés				Caractéristiques			Impacts potentiels du procédé				
	Application	Sous application	Nom et descriptif du procédé	Exemples d'entreprises	Intensité technique (numérique, énergétique, équipements,...)	Complexité organisationnelle	Niveau de maturité/ de déploiement/Lieu d'effectuation	Productivité	Souveraineté	Transition écologique		
										Décarbonation & capture de CO2	Préservation des ressources (matières premières, énergie) Biodiversité	
Fabrication			Raffinerie Catalyse : accélération de la cinétique de réaction au moyen d'un catalyseur. Ex : synthèse de l'ammoniac NH ₃ à partir de ses éléments H ₂ et N ₂ , catalysée par le fer (procédé Haber) ; synthèse de l'acide sulfurique par le procédé de contact.	Acteurs : la SCF, la Division Catalyse, Brabant, BASF France, etc.	++	++	+++ Très mature, a permis beaucoup d'avancées. La catalyse joue un rôle majeur pour répondre aux défis de notre société. Elle joue un rôle essentiel dans les procédés de fabrication de 90 % des produits sur le marché.	Non développé Permet d'accélérer une réaction chimique, ce qui intrinsèquement fait gagner du temps aux industriels	?	Face à l'impératif de décarbonation de leur activité, les industriels de la chimie étudient la possibilité de valoriser les émissions de CO ₂ en composés chimiques. Pour y parvenir, il sera nécessaire de développer de nouveaux catalyseurs et de nouveaux procédés.	/	
		Pétrochimie	Procédé de Haber-Bosch : catalyse sous haute pression à partir de gaz naturel, source de dihydrogène	/	++	/	Procédé dominant. La première usine de production catalytique d'ammoniac a démarré en 1913 à Oppau, seulement 4 ans après la démonstration de sa faisabilité en laboratoire.	Permet d'améliorer la productivité de l'agriculture (une innovation majeure pour le développement de l'agriculture intensive)	L'utilisation des ammonitrates est une particularité du marché européen, et de la France en particulier. Au total, 58 % de l'azote utilisé par l'agriculture française vient de France et de l'UE. Les ammonitrates en constituent la part majoritaire.		Cette production consomme 3-5 % de la production mondiale de gaz naturel, source de dihydrogène nécessaire pour sa préparation. L'ammoniac est considéré comme responsable de tiers de l'accroissement de la population mondiale depuis le milieu du XIXe siècle grâce aux progrès de l'agriculture et à la disparition des grandes famines.	/
	Industrie lourde		Production de pesticides : les pesticides regroupent plus de 1 000 substances très hétérogènes tant du point de vue de leur structure chimique, de leurs propriétés que de leur mode d'action sur les organismes cibles.	La France compte sur la présence historique de plusieurs des leaders mondiaux basés notamment dans ses bassins industriels.	++		Depuis 2019, les ventes de pesticides en France sont en baisse : en 2021, elles sont inférieures de 19 % à la moyenne de la période 2012-2017. Les ventes de glyphosate ont reculé de 14 % entre 2020 et 2021 et celles de CVMR1 ont chuté de 85 % en 4 ans.	En France, un plan d'actions, Ecophyto, vise à réduire les risques et les effets de l'utilisation des pesticides sur l'homme et l'environnement. L'enjeu est de réduire le recours aux produits phytopharmaceutiques de 50% d'ici 2025	La France est une référence au niveau mondial dans les produits phytosanitaires. Au niveau européen, elle est le 2 ^e pays européen dans la production de fongicides, 2 ^e en herbicides et 1 ^{er} en insecticides.		La contamination des milieux (eau, sol, air) par les pesticides est une problématique majeure qui interpelle + l'usage de certaines substances et leurs conséquences pour la santé	

		Non développé							Cf Textile (dans fabrication des objets)			
		Expérimentation à Bordeaux	Technologie vivante	Récupération des urines dans les logements	Expérimentation en cours à Bordeaux	?	++ : réduction de la dépendance aux engrais chimiques	++	++			
Bioraffinerie pour fournir des plastiques, huiles essentielles, colles, savon, des détergents. Procédés catalytiques utilisant des enzymes pour convertir de la biomasse lignocellulosique.	Alternative à la pétrochimie : Chimie biosourcée	Expérimentation à Bordeaux	++	++	Non déployé : En cours d'obtention des autorisations sanitaires	/	/	/	++	++	++	++
Décomposition de l'urée naturelle, formée dans le foie à partir de l'ammoniaque		Ex : Amoéba (pour réduction de la légionellose dans les systèmes de refroidissement)	++	++	Unités de production biotechnologique	/	/	/	++	++	++	++
Utilisation d'amibe pour réduire la charge bactérienne	Bioproduction		++	++								
Production de fibres textiles												
Traitement en plusieurs étapes. 1. Comminution 2. Concentration. 3. Transformation métallurgique en 2 procédés : la pyrométallurgie (traitement thermique + réaction chimique d'oxydation) et l'hydrométallurgie (électrochimie + solubilisation + électrolyse). La pyrométallurgie se prête bien à des minerais « riches », à forte teneur en éléments valorisables. L'hydrométallurgie est efficace pour traiter des minerais contenant plusieurs éléments métalliques valorisables	Métallurgie	Usine d'aluminium à Dunkerque où sont produits plaques et lingots du métal blanc // Acteurs : ArcelorMittal, Celsa, Dillinger, NLMK, Riva, Saint-Gobain, Schmolz et Bickenbach	++ Technique. Tous les types d'outils employés pour la fabrication de l'acier et des produits en acier sont utilisés en France : hauts-fourneaux, convertisseurs, fours électriques, installations de laminage à chaud, installations de laminage à froid et revêtements métalliques et/ou organiques.	++ Mature - Produits longs : 4,1 millions de tonnes en 2017 (armatures béton, rails) Produits plats en aciers hors inoxydables : 11,5 millions de tonnes en 2017 (construction) Aciers spéciaux : 1 million de tonnes en 2017 (outillage, aéronautique, haute technologie, automobile et mécanique) dont aciers inoxydables (matériaux de hautes performances, superalliages, coutellerie, réfractaires)	Permet de conférer des propriétés mécaniques (élasticité, dureté, résistance, etc.) à un métal tout en lui donnant une forme (barres, fils, pièces matriçées ou forgées) ; étape essentielle pour des marchés exigeants sur la qualité et les performances des métaux comme l'aéronautique, les transports et l'énergie.	La filière française permet ainsi la production de la quasi-totalité des types de produits en acier.	Sans cesse améliorés garantissant l'approvisionnement en matières premières et transformées indispensables notamment à la transition énergétique (mobilité électrique, éolien, photovoltaïque, réduction de l'empreinte environnementale des constructions...)	Exploitation des minerais Les émissions de gaz irritants et corrosifs tels que le dioxyde de soufre, le sulfure d'hydrogène et le chlorure d'hydrogène peuvent causer une pollution de l'air et des effets de corrosion des métaux et du béton tant dans l'entreprise qu'à ses abords immédiats.				
Ciment = liant hydraulique (80 % de calcaire et 20 % d'argile) Les deux éléments sont broyés, cuits à très haute température, puis le résultat (clinker) est à nouveau broyé. Ex. Ciment Portland, ciments Portland composés, ciments de haut fourneau, ciments pouzzolaniques (non fabriqués en France), ciments composés	Construction	Lafarge. etc.	++	++	Les 3 activités (ciments, granulats, bétons) de Lafarge France sont présentes sur l'ensemble du territoire français.	?	La France, premier producteur de ciments Portland de l'UE. En 2016, la France est le deuxième producteur européen de ciments (17 % de la production européenne)	Émission de CO2 ++	Exploitation des ressources			

		Procédés			Caractéristiques			Impacts potentiels du procédé			
Étapes du cycle de vie	Application	Sous application	Nom et descriptif du procédé	Exemples d'entreprises	Intensité technique (numérique, énergétique, équipements, ...)	Complexité organisationnelle	Niveau de maturité/Lieu d'effectuation	Productivité	Souveraineté	Transition écologique	
										Décarbonation & capture de CO2	Préservation des ressources (matières premières, énergie) Biodiversité
			Ciment bas carbone : fabriqué à partir de composés de ciments industriels dont la part de calcaire est réduite, dont l'impact carbone est le plus fort, en raison du processus de carbonatation (chauffage à très haute température). Terres crues : mélanges homogènes du calcaire et de l'argile dans des proportions définies, toujours proches du rapport 80 de calcaire pour 20 d'argile., peut être réalisée suivant différents procédés : par voie sèche, par voie humide, par voie semi-sèche ou bien par voie semi-humide.	Les nouveaux ciments CEM II/C-M et CEM VI. Hoffmann Green s'est engagé pleinement dans cette mission	Green Tech	Mélange de co-produits (laitier, argile, gypse) qui ne sont pas issus de l'exploitation de carrières, mais fournis par des producteurs locaux, dans une démarche de valorisation de l'économie locale et circulaire.	Financé pour deux ans par le programme européen Interreg Grand Région, le projet « CO2REDRES » vise à trouver des solutions pour diminuer de 30 % le bilan carbone du ciment	?	La filière cherche à développer l'usage de ce matériau. Le recours au béton décarboné permet de minimiser le bilan carbone de la construction.	Qualités techniques semblables et son empreinte carbone, en revanche, sera jusqu'à 70% inférieure.	Recyclage des ressources, comme l'argile calcinée, les cendres retombées ou encore des laitiers (issu de la production de l'acier)
			Autres alternatives (chanvre, argile ...)	/	Technologie vivante	Savoir-faire traditionnel	Concerne une large part du bâti ancien. Technique minoritaire de nos jours. La préparation du cru par voie sèche est la plus utilisée en France.	?	?	/	+++
			Électrolyse : un processus d'échange au cours duquel l'énergie électrique est transformée en énergie chimique. La réaction a lieu dans une solution d'eau salée, l'électrolyte. Les ions doivent pouvoir circuler librement dans l'eau pour passer d'une électrode à l'autre. Les deux électrodes sont reliées par l'électrolyte et par un générateur de courant électrique.	Entreprises : ELV4OFF, L'Électrolyse, ECOTDS, Électrolyse Fontenaysienne, H2V Industry	+	+	+++ : Très mature et innovant concernant l'environnement				L' électrolyse de l'eau : une solution d'avenir pour le stockage de l'énergie solaire hors réseau. Le surplus d'énergie produit par les panneaux photovoltaïques par exemple est utilisé pour alimenter l'électrolyse. L' électrolyse au sel, l'une des techniques les plus prometteuses en Europe, est en train de s'imposer face au chlore traditionnel car elle constitue une alternative beaucoup plus économique et écologique.
			Production du chlore		Green Tech	Dépendance avec l'industrie pétrochimique.	Non mûre [2040 - 2050]				Substitution des énergies fossiles par électrolyse de l'eau pour solutionner le stockage d'énergie électrique, et création d'hydrogène
			Production d'ammoniac à partir d'hydrogène vert		++						8 % = part de l'industrie textile dans les émissions carbonées mondiales. Cela représente 1,2 milliard de tonnes de CO2, équivalent selon l'étude de la fondation Ellen MacArthur
			Fabrication d'acier grâce à l'hydrogène : procédé non mature		Gros équipements comme les ensouples pour le tissage.						L'industrie textile représente aujourd'hui 2 % de la valeur ajoutée de l'industrie manufacturière en France et emploie 103 000 salariés. En vingt ans, elle a perdu les deux tiers de ses effectifs et évite la manutention et rend la production plus économique.
			Textile classique à partir de fibres synthétiques. Beaucoup de sous-procédés différents : filature, tissage, tricotage, non-tissés, teinture, finition (non développé ici)		++ Possible avec la canne à sucre, ou le ricin, qui contiennent du saccharose, ce qui permet de les transformer en Bio-MEG.						1 français = 9kg de vêtement / an Pollution des nappes phréatiques par la teinture
			Bio-sourçing : textiles ultra-performants, sans passer par la case pétrole. Il consiste à créer un textile à partir d'une plante	Picture Organic Clothing, U-long, fil biosourcé Sorona® de DuPont, fibres TENCEL™ Lyocell		Circuit avec les déchets des producteurs agricoles à mettre en place	++				Récolte de déchets agricoles, afin de valoriser des matières premières vouées au rebut, ce qui apporte une valeur supplémentaire. Biodégradable + pour éviter l'écueil que représente la déforestation, il faudrait se raccrocher existants à des cultures existantes
			Textile : la chaîne de l'industrie textile est une des plus longues et des plus complexes du secteur manufacturier								60 % d'EGES en moins + gain du CO2 généré par les agriculteurs pour se débarrasser de leurs déchets agricoles (scope 3)
			Fabrication des objets manufacturière, hors industrie des transports)								30% d'énergie en moins pour la production. Marché en croissance
											Marques européennes et françaises

Étapes du cycle de vie	Procédés				Caractéristiques			Impacts potentiels du procédé				
	Application	Sous application	Nom et descriptif du procédé	Exemples d'entreprises	Intensité technique (numérique, énergétique, équipements, ...)	Complexité organisationnelle	Niveau de maturité/ de déploiement/Lieu d'effectuation	Productivité	Souveraineté	Transition écologique		
										Décarbonation & capture de CO2	Préservation des ressources (matières premières, énergie) Biodiversité	
Transport	Transports des marchandises	Fret routier	Moteurs thermiques : 9,3 L = 100 kWh. Rendements mécaniques des moteurs thermiques entre 20% et 47%.	Fret de camions ou voitures Entreprises : DB moteurs, Ford, Volvo, Renault, General Motors, etc.	+	Facile aujourd'hui car déployée	2022, le parc automobile en circulation se compose de 6,3 millions de véhicules utilitaires légers, 616 000 poids lourds et 95 000 autobus / autocars en France.	Décroissance : fin des moteurs thermiques en 2035	L'Europe représente 20,8% de la production en volume de poids lourds et moyens en 2018.	Les poids lourds sont responsables de 8% des émissions de CO ₂ en France. Le facteur d'émission pour une motorisation moyenne, en prenant en compte la combustion et la phase amont du carburant, est de 214 gCO ₂ e/km. Soit 2,2 tCO ₂ e pour 10 000 km.	Rejet de CO ₂ et de polluants atmosphérique.	
			Moteurs électriques.	Fret de camions électriques et voitures	+	+++ Complexe : déploiement de bornes électriques sur tout le territoire français et production de batterie électrique. Avec un camion électrique standard, recharger 80 % de l'autonomie peut prendre entre 90 minutes (chargeur DC ultrarapide, prise CCS2) et 9,5-11 heures (AC 22 kW). Selon McKinsey, les camions électriques auront besoin de 279 000 bornes de recharge d'ici à 2030 : 84 % au niveau des pôles logistiques, le reste le long des principaux corridors autoroutiers.	En 2020, on comptait 312 767 véhicules électriques et hybrides rechargeables en circulation (dont 245 964 selon le ministère de la Transition écologique. Le marché des camions électriques n'est encore qu'à ses débuts, son expansion ne fait que commencer et de nombreux aspects sont à améliorer dont l'accès à la recharge.	/	Estimation d'une demande mondiale de lithium qui augmentera de 42% entre 2020 et 2040. Aujourd'hui, la Chine contrôle plus de 40% des capacités de production et près de 60% des capacités de raffinage de lithium dans le monde.	Le secteur des camions électriques, étant identifié comme responsable de 22% du total des EGES du secteur des transports, est visé dans les politiques publiques liées à la transition énergétique.	Appauvrissement des ressources de lithium	
			Moteur à Hydrogène. C'est un moteur à explosion utilisant le dihydrogène comme carburant. Il utilise l'oxydation du dihydrogène (H ₂) par le dioxygène (O ₂), qui ne produit que de l'eau (H ₂ O) et de l'énergie. Leur rapport prix/équipement n'est pas si éloigné de l'électrique, et leur autonomie atteint 700 km. Le plein d'hydrogène ne prend que quelques minutes, contre plusieurs heures sur prise classique en électrique.	Toyota et Hyundai en 2022. BMW et Jaguar-Land-Rover d'ici 2025. Autres nouveautés : le duo Renault Kangoo et Master H2, les Hyvia ou le trio de Stellantis Peugeot e-expert, Citroën ë-Jumpy et Opel Vivaro-e Hydrogen	+	Le transport du dihydrogène est deux fois plus coûteux que celui du gaz naturel, si bien que 80 % du prix à la pompe est dû au stockage, au transport et à la distribution.	Avec 14 ventes en France en 2021, l'hydrogène est confidentiel. L'offre est effectivement réduite à seulement 2 modèles à pile à combustible, les Hyundai Nexa et Toyota Mirai au tarif élevé. Ces voitures alimentent principalement la flotte de taxis Hype, qui opère actuellement à Paris. 30 stations publiques en 2022, et une dizaine en projet. 10 se trouvent en Normandie, 6 en région Parisienne et 6 dans le carré Lyon-Chambéry-Grenoble-Valence.	Cette technologie a probablement peu d'avenir pour les particuliers, contrairement aux professionnels. L'enjeu sera de baisser le prix de l'hydrogène (de 10 euros/kg aujourd'hui à 6 euros/kg d'ici 2027).	L'UE a de vastes ambitions pour 2030. La commissaire européenne aux Transports, Adina Vălean, veut « une station au minimum tous les 150 kilomètres ». Cela permettrait de fournir un objectif de 60 000 camions sur les routes. France Hydrogène vise 300 000 voitures et utilitaires, ainsi que 5 000 camions et bus.	L'hydrogène produit est aujourd'hui presque exclusivement dérivé d'hydrocarbures (vaporeformage du méthane), mais il peut également provenir de l'électrolyse de l'eau ; il s'accompagne soit d'importantes émissions de CO ₂ , soit d'une consommation électrique considérable du fait de rendements énergétiques faibles. Les moteurs à hydrogène pur eux-mêmes ne rejettent que de l'eau. Cette pollution finale, localement quasi nulle, pourrait notamment permettre de réduire la pollution de l'air en milieu urbain. En pratique, la pollution afférente est « délocalisée » sur les sites de production de l'hydrogène.		
			Autres moyens de transports (bateau, train et avion)									Non développé

Étapes du cycle de vie	Procédés			Caractéristiques			Impacts potentiels du procédé					
	Application	Sous application	Nom et descriptif du procédé	Exemples d'entreprises	Intensité technique (numérique, énergétique, équipements, ...)	Complexité organisationnelle	Niveau de maturité/ de déploiement/Lieu d'éléctation	Productivité	Souveraineté	Décarbonation & capture de CO2	Transition écologique	
Fin de vie		Recyclage des panneaux photovoltaïques	Panneaux photovoltaïques : verre, pastiques, aluminium, silicium, argent, cuivre.	L'unité grondine de Soren est « avant-gardiste » car sa technologie est la seule en Europe à recycler l'argent. Partenariat : Entreprise Envie et éco-organisme Soren	+++	Démantèlement complexe; principe de proximité afin de traiter les panneaux solaires photovoltaïques usagés au point plus proche	Le site de Saint-Loubès est le troisième grand centre de recyclage de panneaux solaires construit en France après celui de Halluin (Nord), toujours opérationnel, et de Rousset (Bouches-du-Rhône), géré par Veolia de son lancement en 2018 à sa fermeture il y a quelques mois. 1 seul partenaire se démarque : Envie/Soren. Pas de grande maturité sur le réemploi, Envie pense réemployer 5% de 4000 panneaux.	16 000 tonnes de panneaux collectés depuis 2015 ; 5 sites de traitements ; 230 points de collecte	D'après l'éco-organisme Soren, 1,24 million de tonnes de panneaux solaires, d'une durée de vie de 20 à 30 ans, sont actuellement installés en France.	++	Plus de 90 % de la masse des panneaux (verre, plastiques et aluminium) sont recyclés dans les filières industrielles existantes. Les composants comme le silicium ou des métaux en bien plus faibles quantités (argent, cuivre, et autres complexes semi-conducteurs) sont, eux aussi, récupérables et recyclables. Certains pourront être réutilisés pour fabriquer de nouveaux panneaux photovoltaïques. ++	
		Recyclage de l'acier : Overband électromagnétique ou à aimant permanent. L'acier sera transformé en boîtes de conserve, canettes, appareils ménagers, chariots de supermarché, armatures pour béton, structures métallique, clefs, trombones.	Recyclage de l'aluminium : le séparateur à courant de Foucault permet de séparer les emballages métalliques non-ferreux des autres. L'aluminium sera transformé en : boîtes de conserve, canettes, papier aluminium, barquettes, bombes aérosols, fenêtres, portes, gouttières, appareils ménagers, ustensiles de cuisine, pièce automobile, vélo, trottinette.	Arcelon/Vittal, Riva Acier, Paprec	++ Recyclable à 100% et à l'infini.		Dans la construction par exemple, le taux de recyclage de l'acier est particulièrement élevé : il atteint 65-70% pour les armatures béton et monte jusqu'à 98% pour les poutrelles.	Malgré l'existence d'un référentiel européen définissant les exigences requises pour le recyclage des ferrailles, leur qualité n'est pas encore fiable ce qui empêche d'augmenter leur taux de recyclage	Recyclé sous forme de ferrailles, il fournit 47% de l'acier français. 62% de l'acier mondial est recyclé en Europe	1,78 tonne équivalent CO2 évitée	1 tonne d'acier recyclé = économie de 1,92 tonne de minerai de fer. 0,63 tonne de charbon, 11,57m³ d'eau. 99% des emballages en acier sont recyclés Pas d'extraction de nouvelles ressources + économie de l'énergie nécessaire à la production de l'acier de première fusion	
	Valorisation matières	Recyclage des métaux	Paprec, les industriels recycleurs de l'Alliance Recyclage. Hydro Aluminium, France Aluminium Recyclage	Recyclable à 100% et à l'infini			En 2015, 472 000 tonnes d'aluminium ont été recyclées en France ; à titre comparatif, la production primaire s'est élevée pour la même année à 450 000 tonnes. Dans les deux secteurs représentant ensemble 63% de la consommation totale d'aluminium en France – le bâtiment et les transports - le taux de recyclage de l'aluminium atteint 95%.	/	Aujourd'hui, près de 47 % de l'aluminium consommé en France est issu du recyclage. Dès 2008, le nombre d'usines de recyclage de l'aluminium en Europe est significatif, avec 273 sites recensés.	1 tonne d'aluminium = économie de 26,59 MWh = 6,89 tonnes équivalent CO2 évitées	En le recyclant, on économise 95% de l'énergie nécessaire à la production de l'aluminium première fusion. 1 tonne d'aluminium = économie de 2,44 tonnes de bauxite, 1,07m³ d'eau nouvelles ressources + économie de 95% de l'énergie nécessaire à la production de l'aluminium de première fusion	
		Recyclage du verre	Eco-organisme (ADELPHÉ, CITEO), les metteurs en marché (Brasseurs de France, Boissons Rafraîchissantes de France, Syndicat français des sirops, etc.), les producteurs de verres, les collectivités	Recyclable à 100% et à l'infini	260 km de distance moyenne entre le lieu de collecte et les verreries et 205 000 points d'apport volontaire sur le territoire		Le taux de recyclage en France 78,7%. 2,25 millions de tonnes de verre ont été collectées. "Charte Verre 100% Solutions" : atteindre 90% d'emballages en verre collectés pour recyclage d'ici 2025. Tendre vers 100% d'emballages en verre collectés pour recyclage à horizon 2029.	/	En France, le verre est recyclé depuis 1974		Le recyclage du verre permet de limiter le rejet de CO ₂ : une tonne de verre recyclé économise plus de 500 kg de CO ₂	Le recyclage du verre permet de diminuer le prélèvement de ressources naturelles : pour chaque kg de calcaire utilisé en remplacement de la matière première, on réalise une économie de 1,2 kg en matériaux vierges, et donc les consommations et émissions associées. Cela permet aussi d'économiser de l'énergie : une tonne de verre recyclé permet une économie d'énergie de 3%.

		Non développé						Non développé					
Recyclage des plastiques		Non développé						Non développé					
	Recyclage mécanique et biologique	Méthanisation : Transformation des déchets biodégradables en biogaz. C'est la dégradation par des micro-organismes de la matière organique, en conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène. Cette dégradation provoque un produit humide, riche en matière organique partiellement stabilisée, appelé digestat, qui peut retourner au sol ; du biogaz, mélange gazeux saturé en eau à la sortie du digesteur et composé d'environ 50 % à 70 % de méthane (CH ₄), de 20 % de CO ₂ et de quelques gaz traces (NH ₃ , N ₂ , H ₂ S).	Procédé très utilisé dans l'agriculture, mais également des biodéchets, des boues d'épuration urbaines et de certains effluents industriels	++	La méthanisation a un coût de traitement deux fois moins cher que l'incinération ou l'enfouissement ; station à réglementaire de 100-200 m par rapport aux habitations. Besoin de proximité des gisements de matières organiques, pour faciliter la logistique et donc limiter les transports ; trouver des opportunités de valorisation du biogaz ; avoir une proximité des réseaux de gaz, d'électricité, de chaleur... ;	++	Appare dans les années 70, la méthanisation des matières est aujourd'hui une technologie mature et vertueuse	/	La part des énergies renouvelables en France devra doubler d'ici 2030 pour représenter 32% de la consommation d'énergie ; le biogaz fait partie intégrante de ces énergies. En 2030, le biogaz devrait représenter 10% de la consommation de gaz en France	Diminution des émissions de gaz à effet de serre par substitution à l'usage d'énergies fossiles ou d'engrais chimiques. Un méthaniseur traite 15 000 tonnes /an = 500 maisons chauffées ou 60 bus urbains alimentés en biocarburant	Double valorisation de la matière organique et de l'énergie : C'est l'intérêt spécifique à la méthanisation, par rapport aux autres filières ; diminution de la quantité de déchets organiques à traiter par d'autres filières ; traitement possible des déchets organiques graisseux ou très humides, non compostables en l'état ; Permet une limitation des émissions d'odeurs du fait de digesteur hermétique et de bâtiment cloé équipé de traitement d'air.	+++ : production d'énergie localement	
	Recyclage des déchets biodégradables	Pyrolyse pour fabriquer du biochar à partir de résidus de bois ou les résidus de cultures sèches (comme les coques de grains de café). Ces résidus, non valorisés, sont chauffés à environ 500 degrés, en absence d'oxygène afin d'éviter leur combustion qui les réduirait en cendres. Le flux gazeux obtenu est utilisé pour produire de l'énergie.	Suez, Carbonloop, NetZero	Green Tech	?	Pas mature (problème de coûts)	Amélioration de la fertilité des sols	++	++ : séquestration de carbone	+++ : production d'énergie localement			
	Valorisation énergétique	Stockage des ordures et déchets dans des décharges, dans le sol. Selon leurs caractères polluants, les déchets sont orientés vers des classes différentes de CSDU. Les lixiviats sont les jus produits sous l'action conjuguée de l'eau de pluie et de la fermentation des déchets enfouis.	Les déchets ultimes représentent actuellement environ 25% du volume de notre poubelle ; ex : centre de stockage de Lantic (Côtes-d'Armor)	++	Prise en charge des lixiviats	330 millions de déchets en France : 8% des déchets industriels non dangereux sont enfouis + 25% des déchets ménagers sont enfouis/incinérés	L'objectif de la Commission européenne qui vise seulement les 10% de déchets enfouis.	Les lixiviats contiennent une pollution de type azotée (ammoniac, NH ₄), de type carbonée (déchets organique, DCO), et des métaux lourds.					
	Élimination des déchets												

Étapes du cycle de vie	Procédés				Impacts potentiels du procédé				
	Application	Sous application	Nom et descriptif du procédé	Exemples d'entreprises	Caractéristiques			Transition écologique	
					Intensité technique (numérique, énergétique, équipements, ...)	Complexité organisationnelle	Niveau de maturité/ Lieux de déploiement/Lieu d'effectuation	Productivité	Souveraineté
		Incinération	<p>Incinération, procédé centenaire : méthode de traitement thermique des déchets qui consiste en une combustion (technologie et température variant selon la nature du déchet) et un traitement des fumées</p>	<p>Veolia, Suez, Paprec, Astria et autres</p>	<p>+++ Très haut niveau de technicité</p>	<p>Technique très énergivore, une des plus onéreuses du marché, traitement sur site nécessitant une surface importante, il est primordial d'atteindre de très hautes températures afin de ne pas dégager une partie des polluants dans l'atmosphère, etc.</p>	<p>En France, en 2018 126 incinérateurs de déchets municipaux non-dangereux brûlaient en moyenne 14,5 millions de t/an de déchets</p>	<p>Peut servir à produire de l'électricité et/ou de la chaleur. Les trois centres d'incinération du SYCTOM Paris (Isséane, Saint Ouen, Ivry) permettent par exemple d'alimenter en eau chaude et chauffage l'équivalent de 300 000 logements de l'agglomération parisienne ; évitant, de fait, le rejet de 900 000 tonnes de CO₂ dans l'atmosphère.</p>	<p>3 produits issus du procédé : 1. Machefer = environ 30 % du poids des déchets ; utilisés comme matériaux de construction ou de terrassement 2. cendres et REFIDOM = environ 3 % du poids des déchets. Leur toxicité, qui dépend du traitement des fumées choisi, est mesurée, ce qui détermine en quelle classe de décharge sont dirigées les cendres. 3. fumées</p>
		Thermolyse	<p>Thermolyse : décomposition chimique causée par la chaleur, une rupture des molécules conduisant à des composés moins complexes, qui peuvent à leur tour se décomposer si la température augmente. L'énergie apportée doit rester dans certaines limites au-delà desquelles d'autres processus interviennent, notamment de combustion ou de calcination.</p>	<p>Entreprises : Nexus Technologie, Thide Environnement, Traidec</p>	<p>++</p>		<p>La thermolyse est utilisée pour le traitement des déchets et cette innovation est testée en France en Eure-et-Loir, mais aussi dans les Bouches-du-Rhône, dans le Pas-de-Calais. Il y a 3 acteurs français qui se positionnent sur cette technique</p>	<p>L'incinération classique, implique des volumes de l'ordre de la centaine de milliers de tonnes, et les grosses installations concentrent la pollution et requièrent le transport des ordures sur de longues distances. La thermolyse permettrait de plus proches et petits centres de traitement des ordures ménagères, moins polluantes et avec un impact carbone en transport moindre</p>	<p>La thermolyse est hautement appréciée dans la production de café, de meilleure qualité, et permettant de réduire les EGES et l'utilisation d'eau, de même que la consommation d'électricité. La thermolyse n'occasionne pas de rejet de fumées</p>

EXTRACTION DES MATIÈRES PREMIÈRES

- https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-01/tome_06_exploitation_miniere_et_traitement_des_minerais_final24032017_1.pdf
- [https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article257#:~:text=L%20extraction%20du%20p%20C3%A9trole%20\(ou,%20C3%A9tre%20install%20C3%A9e%20par%20la%20suite](https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article257#:~:text=L%20extraction%20du%20p%20C3%A9trole%20(ou,%20C3%A9tre%20install%20C3%A9e%20par%20la%20suite)
- <https://www.products.pcc.eu/fr/k/extraction-et-production-de-petrole-et-de-gaz-2/>
- <https://www.ecologie.gouv.fr/ressources-en-hydrocarbures-france>
- <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/les-petroliers-sattaquent-a-leurs-emissions-de-co2-1018633#:~:text=De%20nombreux%20p%20C3%A9troliers%20ont%20C3%A9tabli,de%2040%20millions%20en%202025.>
- <https://www.zdnet.fr/actualites/la-transformation-numerique-levier-incontournable-pour-des-modeles-commerciaux-durables-dans-le-secteur-du-petrole-et-du-gaz-39929517.htm>
- <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques-energetiques/portrait-mondial-production-consommation-biocarburants-petrole-naturel/>
- <https://www.ompe.org/la-monoculture-est-elle-vraiment-rentable/#:~:text=La%20monoculture%20gagne%20du%20terrain&text=On%20estime%2C%20en%20France%2C%20que,les%20paysa-ges%20de%20nos%20r%20C3%A9gions.>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Monoculture>
- <http://moulon.inra.fr/optimix/>
- <https://www.ompe.org/la-monoculture-est-elle-vraiment-rentable/#:~:text=La%20monoculture%20gagne%20du%20terrain&text=On%20estime%2C%20en%20France%2C%20que,les%20paysa-ges%20de%20nos%20r%20C3%A9gions.>
- https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pj/a3/97/bd/ae/379_4227745313914533229.pdfhttps://www.mutualia.fr/agriculteur/infos/economie-et-societe/news/avantages-et-inconvenients-de-la-rotation-des-cultures
- <https://agriculture.gouv.fr/quels-sont-les-chiffres-du-bio-en-2021#:~:text=En%202021%2C%20on%20compte%2058,est%20donc%20franchi%20en%202021>
- https://www.bfmtv.com/economie/consommation/une-agriculture-100-biologique-augmenterait-les-emissions-de-co2_AN-201910240083.html#:~:text=Selon%20les%20auteurs%20de%20l,qui%20ont%20men%20C3%A9%20ces%20travaux.
- <https://territoiresbio.fr/wp-content/uploads/2020/06/Guide-FNAB-Bio-Climat.pdf>
- https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2022/01/Carnet_UE_-_2021.pdf
- <https://www.reussir.fr/lesmarches/les-8-chiffres-cle-du-bio-en-europe>
- <https://www.agroforesterie.fr/agroforesterie-definition/>
- <https://agriculture.gouv.fr/lagroforesterie-comment-ca-marche>
- <https://www.agroforesterie.fr/>

FABRICATION

- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Catalyse>
- <https://fr.kompass.com/a/catalyseurs/21780/>
- <http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/view.php?id=3950>
- <https://new.societechimiquedefrance.fr/produits/ammoniac/>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ammonitrate#:~:text=Les%20ammonitrates%20sont%20des%20engrais,et%20peu%20C3%A9missifs%20en%20ammoniac.>
- <https://www.unifa.fr/actualites-et-positions/la-fertilisation-azotee-en-france-un-atout-rendement-et-qualite-pour-les>
- <https://www.ecologie.gouv.fr/pesticides-pollutions-diffuses>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pesticide>
- <https://planete.lesechos.fr/enquetes/les-pesticides-en-france-tous-vises-tous-concernes-7482/>
- <https://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/pesticides/general.html#:~:text=Les%20pesticides%20sont%20habituellement%20des,des%20plantes%20ou%20des%20bact%20C3%A9ries.>
- https://www.xerfi.com/blog/La-production-de-produits-phytosanitaires-en-France_1402
- Cf vidéo du Low-tech lab : <https://www.youtube.com/watch?v=5PRxBkH7JKk>
- <https://www.mineralinfo.fr/fr/ressources-minerales-france-gestion/activites-de-premiere-transformation#mtallurgie>
- <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/metallurgie>
- https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-01/tome_06_exploitation_miniere_et_traitement_des_minerais_final24032017_1.pdf

- <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/>
- [https://www.lafarge.fr/fabrication-du-ciment#:~:text=La%20composition%20classique%20du%20ciment,clinker\)%20est%20%C3%A0%20nouveau%20broy%C3%A9.](https://www.lafarge.fr/fabrication-du-ciment#:~:text=La%20composition%20classique%20du%20ciment,clinker)%20est%20%C3%A0%20nouveau%20broy%C3%A9.)
- [https://www.insee.fr/fr/statistiques/3589283#:~:text=EAP\)%2C%20Clap.,La%20France%2C%20premier%20producteur%20de%20ciments%20Portland%20de%20l'Union,Espagne%20\(10%20%25\).](https://www.insee.fr/fr/statistiques/3589283#:~:text=EAP)%2C%20Clap.,La%20France%2C%20premier%20producteur%20de%20ciments%20Portland%20de%20l'Union,Espagne%20(10%20%25).)
- <https://monexpert-renovation-energie.fr/professionnel-rge/beton-bas-carbone-composition-fabrication-usage#:~:text=Processus%20de%20fabrication,-Dans%20le%20cas&text=Les%2060%20%25%20restant%20r%C3%A9sultent%20de,former%20une%20sorte%20de%20ciment.>
- <https://www.ciments-hoffmann.fr/dossier-ciment-decarbone/>
- <https://www.infociments.fr/nouveaux-ciments-bas-carbone-la-norme-europeenne-nf-en-197-5-enfin-disponible>
- <https://www.batiweb.com/actualites/developpement-durable/ciment-bas-carbone-un-projet-europeen-utilise-des-argiles-pour-remplacer-le-clinker-39603>
- <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/>
- <https://www.lenntech.fr/electrolyse.htm#:~:text=L'%C3%A9lectrolyse%20est%20un%20processus,une%20%C3%A9lectrode%20%C3%A0%20l'autre.>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyse>
- <https://innowater.fr/lelectrolyse-au-sel-plus-economique-et-plus-ecologique-que-le-chlore-traditionnel/>
- <https://cordis.europa.eu/article/id/418019-water-electrolysis-a-promising-remedy-for-the-off-grid-solar-energy-storage-problem/fr>
- <https://www.europages.fr/entreprises/france/paris%20et%20ile-de-france/electrolyse%20-%20traitement%20de%20surface.html>
- <https://lelectrolyse.fr/traitement-et-valorisation-des-dechets-speciaux/>
- <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/livre-blanc/hydrogene-decarbone-ou-en-est-la-france-85903/>
- https://www.csmotextile.qc.ca/wp-content/uploads/2018/11/fascicule_procedes_fabrication_web.pdf
- <https://mylittlecarbon.fr/2021/05/07/mode-fast-fashion-et-co2/>
- <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3632345>
- <https://www.france-industrie.pro/industrie-textile-2/>
- <https://www.geo.fr/environnement/textiles-biosources-en-finir-avec-la-dependance-au-petrole-202702>
- <https://www.u-long.com/fr/category/Bio-Material-Fabric.html>
- <https://biomaterials.dupont.com/>
- <https://textileaddict.me/mode-et-textile-le-bio-sourcing/>
- <https://textileaddict.me/biofabrication-quelles-sont-les-dernieres-innovations/>
- <https://www.hellocarbo.com/blog/compenser/stockage-co2/>
- <https://www.club-co2.fr/fr/content/comment-capter-le-co2#:~:text=Les%20autres%20techniques%20de%20captage%20postcombustion&text=Le%20captage%20par%20cycle%20calcium,redonnant%20de%20la%20chaleur%20vive.>
- <https://energyfactor.exxonmobil.eu/fr/science-technology/stockage-du-carbone-a-sleipner/>
- <https://www.catf.us/fr/2020/08/six-key-ways-petra-nova-has-shown-that-carbon-capture-works/>

TRANSPORT

- <https://www.businesscoot.com/fr/etude/le-marche-des-camions-France>
- <https://www.hellocarbo.com/blog/calculer/empreinte-carbone-voiture/#:~:text=Empreinte%20carbone%20d'une%20voiture%20thermique%20sur%2010%20000%20km%2F&text=Soit%202%2C2%20tCO2e%20pour,soit%201%20800%20kgCO2e%2F10000km.>
- <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/automobile/la-vente-des-vehicules-neufs-a-moteur-thermique-sera-bien-interdite-en-europe-des-2035-938636.html>
- <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/voiture-electrique/s-2528-difference-de-rendement-entre-electrique-et-thermique.php>
- <https://www.businesscoot.com/fr/etude/le-marche-des-camions-France>
- <https://chargeguru.com/fr/fiches-pratiques/2022/05/24/tout-savoir-sur-les-camions-electriques-en-2022/>
- <https://www.tf1info.fr/conso/bonus-leasing-voitures-electriques-en-france-le-point-sur-les-chiffres-et-les-aides-du-gouvernement-2235652.html>

- <https://www.hellocarbo.com/blog/calculer/empreinte-carbone-voiture/#:~:text=Empreinte%20carbone%20d'une%20voiture%20thermique%20sur%2010%20000%20km%20Fan&text=Soit%202%2C2%20tCO2e%20pour,soit%201%20800%20kgCO2e%2F10000km.>
- <https://www.lasemainedelallier.fr/mine-de-lithium-dans-lallier-une-nouvelle-usine-de-conversion-a-montlucon/>
- <https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/voiture-electrique/s-2528-difference-de-rendement-entre-electrique-et-thermique.php>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_hydrog%C3%A8ne
- <https://www.autoplus.fr/environnement/vehicule-a-hydrogene-on-france-2022-552633.html#item=1>

UTILISATION

- <https://rediv.com/fr>
- <https://harris-interactive.fr/wp-content/uploads/sites/6/2020/06/rapport-francais-reparation-perception-pratique-2020.pdf>
- OPEO
- <https://www.economiecirculaire.org/articles/h/le-reemploi-des-batteries-pour-une-mobilite-durable-pour-tous.html>
- <https://ulys.vinci-autoroutes.com/blog/tout-savoir-sur-le-recyclage-des-batteries-electriques/>
- <https://www.mobilize.com/cycle-de-vie-de-la-batterie/economie-circulaire-de-la-batterie-du-vehicule-electrique/>
- <https://www.clubic.com/transport-electrique/article-892870-1-sr-recyclage-reutilisation-quelle-seconde-vie-batteries-voitures-electriques.html>

FIN DE VIE

- <https://www.20minutes.fr/planete/4002556-20220927-gironde-premier-centre-reemploi-panneaux-solaires-usages-cree-pres-bordeaux>
- <https://www.envie.org/nos-actualites/actualites/envie-innove-5-reemploi-de-panneaux-photovoltaiques-aquitaine/>
- <https://decrypterlenergie.org/les-panneaux-photovoltaiques-sont-ils-recyclables#:~:text=La%20tr%C3%A8s%20grande%20majorit%C3%A9%20des,dans%20les%20fili%C3%A8res%20industrielles%20existantes.>
- <https://objectifaquitaine.latribune.fr/innovation/2022-09-28/panneaux-solaires-un-site-de-reemploi-unique-en-europe-ouvre-en-gironde-934367.html>
- <https://www.20minutes.fr/planete/4002556-20220927-gironde-premier-centre-reemploi-panneaux-solaires-usages-cree-pres-bordeaux>
- <https://www.envie.org/nos-actualites/actualites/envie-innove-5-reemploi-de-panneaux-photovoltaiques-aquitaine/>
- <https://www.soren.eco/re-traitement-panneaux-solaires-photovoltaiques/>
- <https://www.soren.eco/collecte-panneaux-solaires-photovoltaiques/>
- <https://decrypterlenergie.org/les-panneaux-photovoltaiques-sont-ils-recyclables#:~:text=La%20tr%C3%A8s%20grande%20majorit%C3%A9%20des,dans%20les%20fili%C3%A8res%20industrielles%20existantes.>
- <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-recyclage-traitement-dechets-932/page/12/>
- <https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/ferrailles-et-metaux/>
- <https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/matieres-recyclees/recyclage-ferrailles.php>
- https://www.ilec.asso.fr/article_revue_des_marques/11375
- <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-recyclage-traitement-dechets-932/page/12/>
- <https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/ferrailles-et-metaux/>
- <https://www.aluminium.fr/cycle-de-vie-et-recyclage/#:~:text=Aujourd'hui%2C%20pr%C3%A8s%20de%2047,ann%C3%A9e%20%C3%A0%20450%20000%20tonnes.>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Recyclage_de_l%27aluminium
- <https://www.verre-avenir.fr/le-recyclage-du-verre/>
- https://www.verre-avenir.fr/wp-content/uploads/2022/07/Charte_Engagements.pdf

- <https://www.paprec.com/fr/solutions/les-matieres-que-nous-valorisons/verre/#:~:text=En%20France%2C%20le%20verre%20est,%25%20et%20%C3%A0%20l'infini.>
- <https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/ferrailles-et-metaux/>
- <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/passer-a-l'action/valorisation-organique/methanisation>
- <https://librairie.ademe.fr/cadic/6475/guide-pratique-methanisation-en-10-questions.pdf>
- <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/carbonloop-le-biochar-comme-accelereur-de-la-decarbonation-de-lindustrie-113085/>
- <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/le-biochar-permet-une-sequestration-long-terme-du-carbone-116431/>
- <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/le-biochar-ce-nouvel-or-noir-pour-le-climat-qui-fait-rever-les-industriels-de-la-decarbonation-919828.html>
- https://www.lemonde.fr/les-cles-de-demain/article/2018/02/19/les-sites-d-enfouissement-sont-voues-a-disparaitre_5259224_4758288.html
- <https://www.usinenouvelle.com/article/infographie-quand-la-france-met-le-nez-dans-ses-dechets.N898374>
- <https://www.usinenouvelle.com/article/infographie-quand-la-france-met-le-nez-dans-ses-dechets.N898374>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Incin%C3%A9ration_des_d%C3%A9chets
- <https://www.selecdepol.fr/fiche-technique/incineration>
- <https://www.ecologic-france.com/professionnels/activites-service-et-traitement/la-valorisation-energetique-traitement-procedes-et-benefices.html>
- <https://fr.kompass.com/a/exploitants-d-usines-d-incineration-de-dechets-industriels/7257001/>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermolyse_\(chimie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermolyse_(chimie))
- <https://www.usinenouvelle.com/article/environnement-la-thermolyse-pour-traiter-les-dechets-menagers.N90072>
- <http://hydrogenium.eu/2018/09/15/la-thermolyse-une-nouvelle-forme-de-decentralisee-dhydrogene/>
- <https://www.lemoniteur.fr/article/le-traitement-de-dechets-par-thermolyse-entre-en-phase-operationnelle.194599>
- <https://lecourrier.vn/la-technologie-de-thermolyse-beneficie-a-la-filiere-cafe/533880.html>
- <https://www.senat.fr/rap/o98-415/o98-41518.html>
- <https://www.bpifrance.fr/nos-actualites/micro-algues-en-salliant-avec-suez-fermentalg-accelere-dans-la-capture-de-co2>
- <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/carbonworks-une-technologie-de-rupture-pour-valoriser-le-co2-110618/>
- <https://www.ville-poissy.fr/index.php/infos-generales/3461-article-combin-air.html>
- <https://www.hellocarbo.com/blog/compenser/stockage-co2/>
- <https://www.club-co2.fr/fr/content/comment-capter-le-co2#:~:text=Les%20autres%20techniques%20de%20captage%20postcombustion&text=Le%20captage%20par%20cycle%20calcium,redonnant%20de%20la%20chaux%20vive.>
- <https://energyfactor.exxonmobil.eu/fr/science-technology/stockage-du-carbone-a-sleipner/>
- <https://www.catf.us/fr/2020/08/six-key-ways-petra-nova-has-shown-that-carbon-capture-works/>
- <https://www.hellocarbo.com/blog/compenser/stockage-co2/>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9questration_du_dioxyde_de_carbone#:~:text=La%20s%C3%A9questration%20du%20carbone%20par,par%20hectare%20et%20par%20an.
- <https://reporterre.net/Le-mirage-de-la-sequestration-du-carbonearticle>
- https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2020/07/captage-stockage-geologique-co2_csc_avis-technique_2020.pdf
- <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/islande-cette-usine-qui-elimine-le-co2-dans-lair-en-sept-questions-1347202>
- <https://www.rtbef.be/article/en-islande-le-co2-change-en-roche-pour-nettoyer-l-atmosphere-10215345>

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