

PROSPECTIVE DES MATÉRIAUX

2/4

Les évolutions des filières de transformation et de consommation de matériaux



MÉTROPOLE

GRAND LYON

Jun 2023

SOMMAIRE

Introduction générale :

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

Prospective des filières : éléments de cadrage 5

Filières, de quoi parle-t-on ? 5

Quelles clés d'analyse des enjeux prospectifs ? 6

Analyse des enjeux liés aux matériaux par filière 7

Filière construction bois – Boris Chabanel 9

Filière textile – Boris Chabanel 21

Filière papier-carton – Boris Chabanel 31

Filière métallurgie – Boris Chabanel 43

Filière chimie – Marina Bellot et Mylène Martin 57

Filière automobile – Marina Bellot et Mylène Martin 73

Filière énergies renouvelables et réseaux électriques – Yves Marignac 89

Filière électronique - l'exemple des circuits intégrés – Gauthier Roussilhe 105

Analyse transversale – Boris Chabanel 114

JUIN 2023

Métropole de Lyon

■ **Coordination**

Direction de la prospective et du dialogue public (DPDP)

Nicolas Leprêtre et Jean-Loup Molin

■ **Rédaction**

DPDP/réseau de veille prospective

Marina Bellot (Scope), Boris Chabanel (Utopies), Yves Marignac (Institut

Negawatt), Mylène Martin (Scope) et Gauthier Roussilhe

■ **Réalisation**

Nathalie Joly (DPDP)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Méthodologie

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

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

Bonne lecture !

Nicolas Leprêtre

Prospective des filières : éléments de cadrage

FILIÈRES, DE QUOI PARLE-T-ON ?



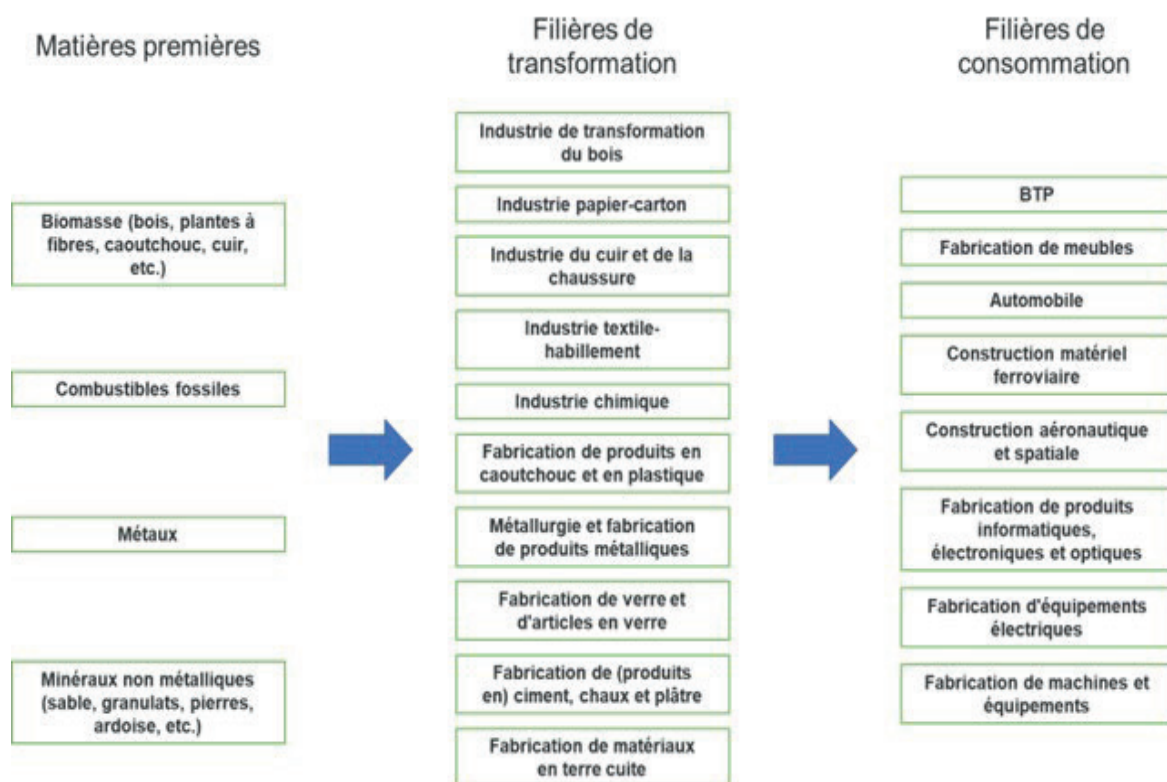
Définition de la notion de filière

Selon l'Insee, la filière désigne couramment l'ensemble des activités complémentaires qui concourent, d'amont en aval, à la réalisation d'un produit fini. On parle ainsi de filière électronique (du silicium à l'ordinateur en passant par les composants) ou de filière automobile (de l'acier au véhicule en passant par les équipements).

Dans le cadre de cette étude nous distinguons cependant deux types de filières :

- **Filières de transformation** : il s'agit de filières intégrant des activités de première et de seconde transformation des matières premières.
- **Filières de consommation** : il s'agit de filières positionnées plus en aval de la chaîne de valeur et consommatrices de différents types de matériaux plus ou moins transformés provenant des filières de transformation.

Cette distinction est bien sûr à nuancer dans la mesure où certaines filières de transformation aboutissent à des produits finaux et certaines filières de consommation peuvent s'organiser selon des logiques d'intégration verticale. Le schéma ci-dessous présente les principales filières de transformation et de consommation.



Quelles clés d'analyse des enjeux prospectifs ?

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

1. **Organisation de la filière** : comment se structurent les activités constitutives de la filière de l'amont à l'aval ?
2. **Dynamique économique** : les activités et les emplois de la filière sont-ils en croissance ou en recul à l'échelle nationale ?
3. **Relations de filière** : quel degré de cohérence/cohésion des relations entre maillons/acteurs de la filière ?
4. **Dépendance/vulnérabilité** : dans quelle mesure la filière est-elle dépendante des importations pour ses matières premières et intermédiaires et quels risques d'approvisionnement associés ? Dans quelle mesure la filière couvre-t-elle la consommation nationale ?
5. **Circularité** : quels enjeux de circularisation de la filière et quel degré de circularité actuel (taux de recyclage des déchets de la filière, taux d'incorporation de matières secondaires) ?
6. **Décarbonation** : les activités de la filière sont-elles fortement émettrices de gaz à effet de serre ? Les activités et produits de la filière constituent-ils un levier des stratégies de décarbonation ?
7. **Substituabilité** : la filière soulève-t-elle un fort enjeu de substitution, soit pour remplacer certains matériaux/produits par d'autres, soit pour venir en substitution à certains matériaux/produits ?
8. **Innovation** : quels sont les principales tendances en matière d'innovation ? Sur quelles catégories de matériaux se concentre l'effort d'innovation ? Quels objectifs principaux guident l'effort d'innovation se concentre
9. **Territoire** : cette filière renvoie-t-elle à des activités présentes en région Auvergne-Rhône-Alpes/lyonnaise ?

Une première phase exploratoire a permis de retenir huit filières soulevant les enjeux les plus significatifs au regard des clés d'analyse précédentes : construction-bois, textile-habillement, papier-carton, métallurgie, chimie, automobile, énergies renouvelables et réseaux électriques, et produits électroniques. La partie suivante synthétise les enseignements clés pour chacune de ces filières.

Analyse des enjeux liés aux matériaux par filière

Filière construction bois

Boris Chabanel9

Filière textile

Boris Chabanel21

Filière papier-carton

Boris Chabanel31

Filière métallurgie

Boris Chabanel43

Filière chimie

Marina Bellot et Mylène Martin55

Filière automobile

Marina Bellot et Mylène Martin65

Filière énergies renouvelables et réseaux électriques

Yves Marignac81

Filière électronique - l'exemple des circuits intégrés

Gauthier Roussilhe95





FILIÈRE CONSTRUCTION BOIS

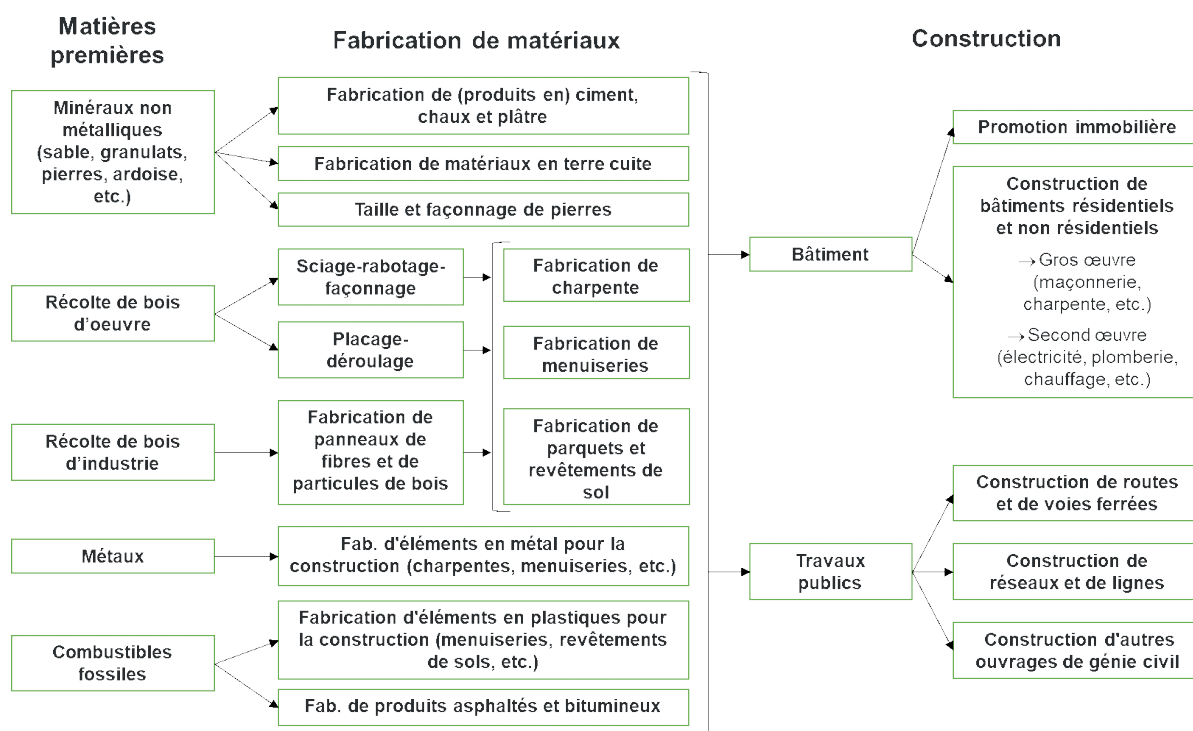
En résumé – La filière construction doit composer avec une baisse tendancielle des mètres carrés de bâtiments construits chaque année ainsi qu'à des enjeux majeurs en termes de décarbonation et de circularité. Le développement massif de la construction bois est un volet clé de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) afin d'amplifier le puits de carbone constitué par les matériaux bois. Mais encore faut-il être en mesure de privilégier le bois made in France, d'accroître la récolte de bois et de la transformer en bois d'œuvre.



Organisation de la filière

La **filière construction** regroupe toutes les activités de conception et de construction des bâtiments et infrastructures (ponts, lignes électriques, etc.), du neuf à la rénovation. Elle comprend également les secteurs amont dont l'activité dépend directement de cette filière : carrières, fabrication de matériaux de construction, etc.

Au sein de la filière, la **construction bois** concerne les projets de construction neuve (résidentiel et non-résidentiel), d'extension, de surélévation, de rénovation et/ou de réhabilitation dont la structure ou l'enveloppe est en bois et/ou dont les aménagements intérieurs ou extérieurs incluent massivement du bois. D'un point de vue économique, l'enquête nationale de la construction retient les activités suivantes : fabrication de charpente et de menuiserie, construction de maisons individuelles, travaux de menuiserie, travaux de charpente.





Dynamique économique

Si l'activité du secteur de la construction progresse en valeur ces dernières années, elle n'a jamais retrouvé son niveau d'avant la crise de 2008. En effet, les surfaces de logements et de locaux non résidentiels demeurent en deçà des niveaux antérieurs ; à l'exception de la construction d'entrepôt, dont les surfaces annuelles ont augmenté de 50% depuis 2007 et représentent 20% des surfaces engagées en 2021). À noter par ailleurs, la construction neuve représente 46% de la production en valeur de la construction de bâtiment.

312 milliards d'euros

Production de la branche construction en 2019 (dont 86% pour le bâtiment et 14% pour les TP)

-7% depuis 2007

38,2 millions de m²

Surface totale de logements mis en chantier en 2021

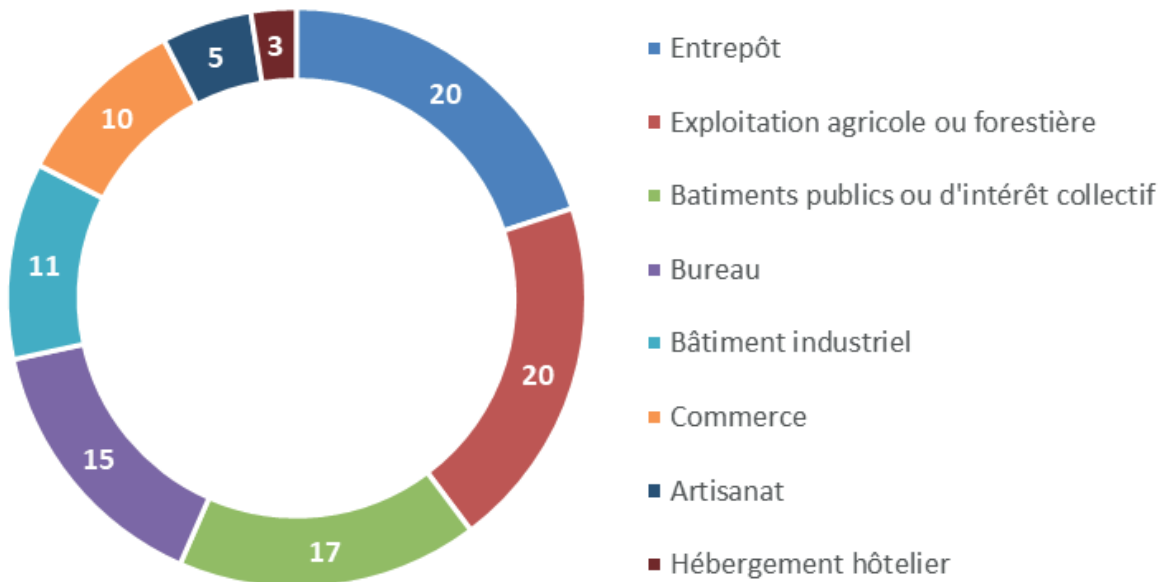
-29% depuis 2007

25,1 millions de m²

Surfaces de locaux non résidentiels mis en chantier en 2021

-39% depuis 2007

Répartition des surfaces de locaux non résidentiels mis en chantier en 2021 (en %)



Source : Ministère de la transition énergétique, Service des données et études statistiques

Concernant plus spécifiquement le marché de la construction bois, celui-ci s'est accru de 2% entre 2018 et 2020 malgré la crise sanitaire, pour s'établir à 1,9 milliard d'euros et fait intervenir environ 2000 entreprises. Les parts de marché de la construction bois augmentent sur tous les segments de marché à l'exception des bâtiments agricoles et des maisons du secteur groupé (voir tableau ci-après), mêmes si elles restent encore modestes. De plus, la construction bois n'échappe pas au recul du nombre de construction.

Par ailleurs, **les entreprises de la construction bois se distinguent de l'ensemble des entreprises du BTP** par un chiffre d'affaires moyen près de six fois supérieurs (2,1 millions d'euros) et un effectif moyen cinq fois supérieurs (14 salariés). Ces écarts s'expliquent notamment par la présence d'une main d'œuvre plus qualifiée et par l'activité spécifique de la construction bois qui nécessite des investissements importants en outils de conception ou de production ainsi qu'une part importante de préfabrication.

Les parts de marché de la construction bois en construction neuve

MARCHÉ DU LOGEMENT						
FRANCE	2018		2020		ÉVOLUTION DES PARTS DE MARCHÉ ENTRE 2018 ET 2020	PRÉVISIONS 2021 (SOLDE D'OPINIONS)
	NOMBRE DE RÉALISATIONS EN BOIS	PART DE MARCHÉ	NOMBRE DE RÉALISATIONS EN BOIS	PART DE MARCHÉ		
Maison individuelle totale	14 955	9,4 %	12 930	9,7 %	↗	↗↗
<i>dont secteur diffus</i>	10 855	9,2 %	9 800	9,3 %	↗	↗↗
<i>dont secteur groupé</i>	4 100	10,3 %	3 130	9,2 %	↘	↗
Logement collectif	10 700*	4,3 %	9 570*	4,6 %	↗	↗↗
TOTAL LOGEMENT	25 655	6,3 %	22 500	6,5 %	↗	↗↗
Extension-surélévation	10 840	27,5 %	10 340	30,5 %	↗↗	↗↗

* Ce nombre peut intégrer du logement intermédiaire ou collectif horizontal. Le nombre de réalisations mixte bois-béton ou bois-métal est prépondérant.

MARCHÉ DES BÂTIMENTS NON RÉSIDENTIELS						
FRANCE	2018		2020		ÉVOLUTION DES PARTS DE MARCHÉ ENTRE 2018 ET 2020	PRÉVISIONS 2021 (SOLDE D'OPINIONS)
	SURFACES RÉALISÉES EN STRUCTURE BOIS (M ²)	PART DE MARCHÉ	SURFACES RÉALISÉES EN STRUCTURE BOIS (M ²)	PART DE MARCHÉ		
Bâtiments tertiaires privés et publics ⁽¹⁾	1 145 000	10,5 %	905 000	10,9 %	↗	↗
Bâtiments agricoles	1 561 500	25,2 %	1 310 000	23,7 %	↘	↗
Bâtiments industriels et artisanaux	717 000	18,8 %	686 000	20,3 %	↗	↗
TOTAL NON RÉSIDENTIELS	3 423 500	16,3 %	2 901 000	16,8 %	↗	↗

(1) Les bâtiments tertiaires privés et publics regroupent les commerces et les bureaux d'une part, et les bâtiments publics (mairie, école, salle polyvalente...) d'autre part.

Source : VEIA, 2021

À l'avenir, le potentiel de développement de la construction bois apparaît important en France en raison de l'importance que lui accorde la Stratégie Nationale Bas Carbone pour atteindre l'objectif de neutralité carbone (voir décarbonation). Celle-ci prévoit une augmentation de 70% de la récolte de bois entre 2015 et 2050 ainsi qu'une forte progression de la consommation annuelle de produits bois à longue durée de vie dans la construction neuve et la rénovation (charpente, bardage, panneaux, isolants, parquets, etc.). Les objectifs de stockage de carbone dans les produits bois se traduisent en particulier par une augmentation de 244% des volumes de sciages et panneaux entre 2015 et 2050.

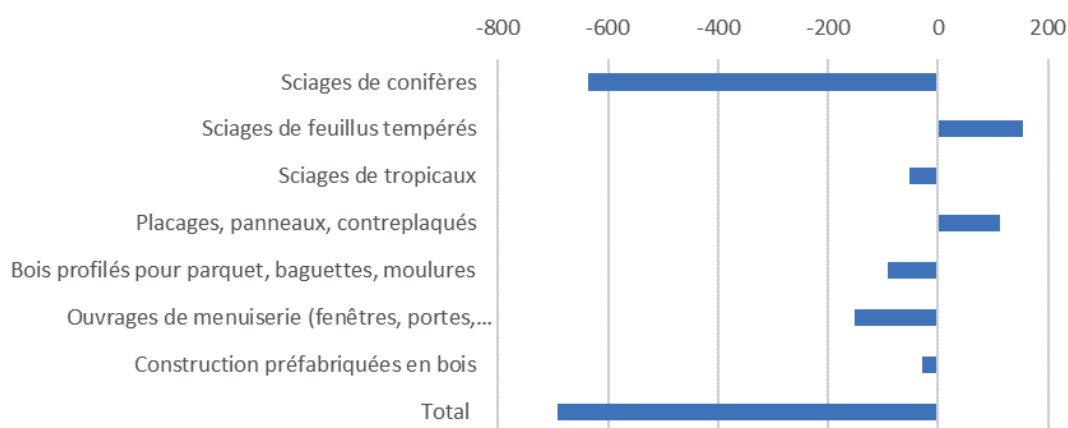


Dépendance/vulnérabilité

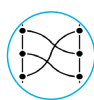
S'agissant des matériaux bois, on estime que la construction de logements et de bâtiments tertiaires a mobilisé environ 1,1 million de tonnes de bois en 2015 (donc hors construction de bâtiments industriels-agricoles et d'infrastructures). Or, la production nationale est actuellement insuffisante pour satisfaire la consommation de matériaux bois du secteur construction : en valeur, en 2019, elle couvre 66% de la consommation de sciages et produits techniques (contreplaqués, lamellés-collés, etc.), 75% de la consommation de panneaux, 20% de la consommation de menuiseries et agencements.

La France présente un solde extérieur déficitaire pour les matériaux bois destinés à la construction : - 693 000 tonnes en 2021 (-1,4 milliard d'euros). Ce déficit se concentre sur les sciages de conifères. Provenant en quasi-totalité d'Europe (à 42% d'Allemagne et de Finlande), ces derniers ne soulèvent *a priori* pas de risques d'approvisionnement, à l'exception cependant des sciages provenant de Russie (9% des importations) pour lesquels l'UE a instauré un embargo depuis avril 2022. Au total, sans mesures volontaristes pour développer l'offre nationale de matériaux bois, le fort développement de la construction bois envisagés dans les années à venir pourrait creuser davantage le déficit extérieur de la France.

Solde des échanges extérieurs de la France (en milliers de tonnes)

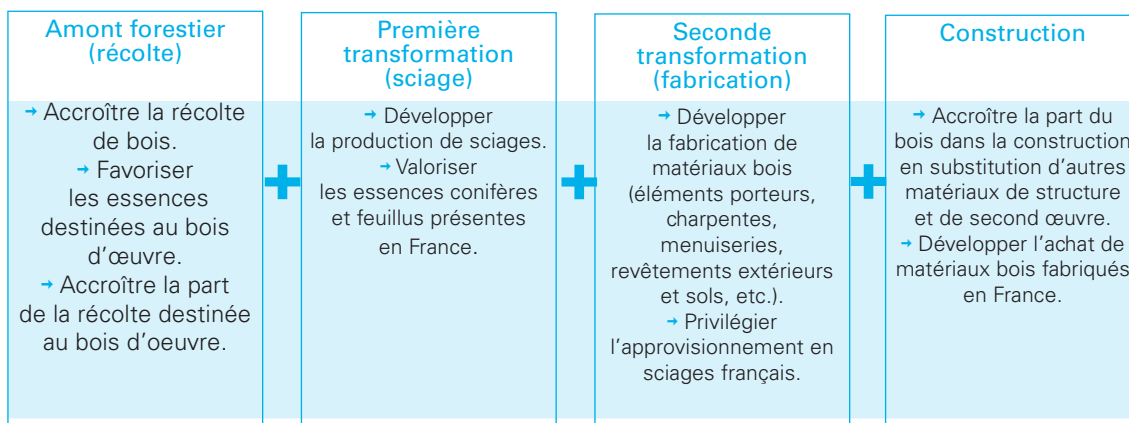


Source : Agreste, Direction générale des douanes et droits indirects (DGDDI)



Relations de filière

L'atteinte des objectifs ambitieux adressés à la construction bois par la SNBC (voir décarbonation) suppose d'articuler plusieurs conditions tout au long de la filière :



Or ces conditions sont loin d'être assurées à l'avenir :

	OPPORTUNITÉS	FREINS
RÉCOLTE	<p>→ Le développement de la récolte de bois d'œuvre constitue un levier important pour assurer le financement durable de la gestion forestière et notamment les actions d'adaptation des forêts au changement climatique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> → Comparativement à différentes études prospectives récentes, la SNBC se rapproche des scénarios de récolte les plus intensifs, décrits comme difficiles à mettre en œuvre au plan technico-économique. De même, le doublement de la part de la récolte valorisée en sciage apparaît très ambitieux. → Hausse de la mortalité des arbres (notamment due aux crises sanitaires liées à des conditions climatiques extrêmes). → Éclatement de la propriété forestière qui n'encourage pas la mobilisation de la ressource. → Prédominance des espèces feuillues jugées moins productives et peu adaptées aux attentes actuelles du marché. → Défaut de renouvellement des forêts conifères dédiés aux usages matériaux (qui fournissent aujourd'hui 73 % de la récolte nationale de bois d'œuvre). → Exploitation forestière freinée par l'augmentation du coût du travail, la pénibilité des métiers et le manque de desserte forestière. → Contestation croissante de l'intensification de l'exploitation de la forêt par les citoyens.
SCIAGE	<p>→ à l'instar des exploitations agricoles, les scieries françaises connaissent une tendance à la concentration, qui se traduit par une baisse de leur nombre (environ 1 300 en 2019, -30 % en dix ans) et une augmentation de leur taille moyenne, ce qui favorise les économies d'échelle.</p>	<ul style="list-style-type: none"> → L'augmentation des volumes de sciage prévue par la SNBC est deux fois supérieure à ce qui est projeté dans les études prospectives comparables, et prend le contre-pied de la baisse tendancielle de la production de sciage observé depuis 2008 (-22 %). → Malgré le mouvement de concentration, les scieries françaises peinent à atteindre une envergure industrielle leur permettant de faire face à la concurrence européenne (Allemagne, pays scandinaves). → La réduction du nombre de scieries affaiblit le maillage territorial et accroît les besoins de transport des bois récoltés (et les coûts associés). → La concentration des scieries se double d'une spécialisation croissante sur les résineux pour répondre aux tendances du marché de la construction bois. → La modernisation des scieries implique des investissements élevés qui bute sur le faible taux de marge des entreprises et la volonté des professionnels de conserver leur indépendance. → Difficultés de recrutement (affuteurs, électriciens spécialisés). → Les scieries peuvent rencontrer des difficultés pour accéder aux bois récoltés dans un contexte où la montée des prix sur les marchés mondiaux peut inciter les exploitants forestiers à exporter leurs bois. → L'ensemble du système d'approvisionnement (en amont et en aval des scieries) repose sur des rapports commerciaux relativement peu stabilisés sur la longue durée, ce qui pose des problèmes pour la sécurisation des volumes et la prévisibilité des prix.
FABRICATION	<p>→ Les activités de fabrication de produits en bois (charpente, panneaux, placages, emballages, parquets, armatures et bâtiments préfabriqués) conservent une dynamique positive (augmentation de 25 % de la valeur ajoutée entre 2000 et 2019).</p>	<ul style="list-style-type: none"> → Le développement de la fabrication de produits bois repose sur un recours élevé aux importations de produits bois : sciages et produits techniques. Pour nombre de professionnels, privilégier les bois français, et <i>a fortiori</i> locaux, n'a pas de sens sur le plan économique dès lors que les bois importés affichent une compétitivité supérieure en matière de coût, de critères de standardisation et de normalisation technique, de fiabilité et de délai d'approvisionnement. → Les matériaux bois affichent un important retard en matière de certification – lié notamment à la lourdeur et au coût des processus de certification – ce qui nuit à la reconnaissance des performances techniques et environnementales des produits bois, et freine l'accès au marché des produits bois innovants.

	OPPORTUNITÉS	FREINS
CONSTRUCTION	<ul style="list-style-type: none"> → En stimulant l'usage de matériaux de construction à faible impact carbone, la mise en place de la nouvelle réglementation environnementale RE2020 (voir décarbonation) encourage l'évolution des modes constructifs en faveur des solutions bois. → Les entreprises générales du bâtiment, les groupes du BTP et les grands promoteurs sont de plus en plus présents sur le marché de la construction bois. → On assiste à des logiques d'intégration verticale à double sens : constructeurs investissant l'amont, de l'achat des bois en scierie à la pose sur les chantiers en passant par la production de produits techniques et la préfabrication d'ensembles constructifs ; charpentiers élargissant leur activité à la construction bois ; scieries se diversifiant vers la fabrication et la construction, etc. → En tant que filière sèche, la construction bois présente potentiellement un facteur de confort supérieur pour les salariés et constitue donc un levier d'attractivité pour les métiers du bâtiment. → Création en 2016 de l'Union des Industriels et Constructeurs Bois (UICB), associant les fabricants, les constructeurs et les maîtres d'œuvre. → Comme l'ont démontré un nombre croissant de réalisations, le bois permet de bâtir le même type de bâtiments que le béton, pour une structure deux fois moins lourde et des possibilités accrues de préfabrication et donc de réduction des délais. Les différences de coûts entre le parpaing/béton et le bois seraient aujourd'hui négligeables. 	<ul style="list-style-type: none"> → La massification des débouchés vers la construction bois prévue par la SBNC (+244 % des sciages et panneaux) apparaît excessive au regard de ce que pourrait absorber le marché de la construction bois. Selon une étude prospective sur la demande de bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments à l'horizon 2035 et 2050 (BIPE-FCBA, 2019), le scénario le plus ambitieux prévoit une augmentation de 138 % des volumes de bois mis en œuvre dans la construction pour atteindre environ 10 millions de m³ par an à cet horizon (contre 4,1 millions de tonnes en 2015). → Les matériaux bois peinent à gagner des parts de marché par rapport aux autres matériaux (et en perdent parfois : par exemple, la part de marché de la fenêtre bois a chuté ces dernières années au profit du PVC et de l'aluminium). Cette situation reflète un déficit de prescription en faveur des solutions bois : si les relations entre les constructeurs bois et les architectes restent empreintes d'une méfiance réciproque, il faut composer plus largement avec un attachement culturel de la population française « à la pierre » tandis que le bois domine 90 % du marché en Scandinavie et en Amérique du Nord. → La difficulté à percer rencontrée par la construction résulte également de l'inertie du marché : l'essentiel de l'ingénierie, de l'appareil productif, des savoir-faire et des réglementations du BTP a été façonné par l'usage prédominant du parpaing en ciment et du béton armé depuis des décennies. → Les standards industriels des produits imposés par la filière ciment-béton nuisent <i>in fine</i> à la prise en compte des caractéristiques spécifiques du bois (matériau vivant, hétérogène). Autrement dit, l'usage du bois dans la construction ne se résume pas à remplacer un matériau par un autre mais implique semble-t-il un changement de regard et de référentiels, et la diffusion des connaissances techniques sur le matériau bois auprès des prescripteurs (écoles d'architecture et d'ingénieurs). → Pour beaucoup de professionnels, la provenance géographique du bois utilisée importe moins que l'augmentation de la part du matériau bois (quel que soit son origine) sur les marchés de la construction. Certains craignent une « confusion des luttes », entre d'une part la défense du bois face aux autres matériaux de construction et d'autre part celle du bois local face aux bois concurrents ; la seconde pouvant conduire à l'échec de la première.

Au total, le développement de la construction bois fait face à un dilemme : rechercher les gains de part de marché à court terme incite à privilégier l'usage de bois importés, tandis que les objectifs de la SBNC conditionnent étroitement ce développement à l'usage de bois français afin de contribuer massivement au puits de carbone national.

Focus : l'enjeu clé de la valorisation des feuillus

Depuis les années 70, la construction se fait plutôt en bois de résineux, ce dernier étant plus léger, plus tendre, plus homogène et moins coûteux que le bois de feuillus. À l'origine de la plupart des développements technologiques qui ont conduit à la mise sur le marché des produits d'ingénierie (bois lamellé croisé, bois collés et contrecollés, etc.), les industriels des pays du Nord de l'Europe jouent un rôle important dans cette impulsion en faveur des résineux.

Pourtant, si en France les forêts de résineux à usage matériaux (sapin pectiné, épicéa commun, pin maritime, douglas) fournissent plus de 70% de la récolte nationale de bois d'œuvre, elles n'occupent que 17% de la surface forestière et offrent peu de marge de manœuvre pour répondre aux besoins futurs de la construction. Selon une étude prospective (BIPE-FCBA, 2019), même avec une sylviculture dynamique, l'offre de bois d'œuvre résineux resterait nettement inférieure à la demande du scénario neutralité carbone.

En revanche, plusieurs études soulignent le potentiel des essences feuillues, largement dominantes dans la forêt française. Selon l'étude BIPE-FCBA, une sylviculture dynamique permettrait de fournir une offre de bois d'œuvre feuillus supérieure aux besoins du scénario neutralité carbone. Progresser vers les objectifs de la SNBC impliquerait ainsi de développer la valorisation des feuillus par la filière bois d'œuvre. Cela suppose d'enrayer le déclin des scieries spécialisées sur les feuillus, soutenir les investissements de modernisation de l'appareil de transformation, amplifier les efforts de caractérisation et de certification des performances techniques des bois feuillus, décliner les produits techniques résineux pour les feuillus (voir innovation), donner un avantage aux produits bois issus de la récolte feuillue nationale par rapport aux produits résineux importés.



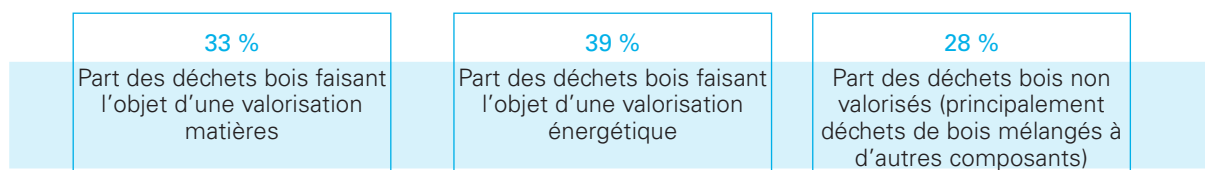
Circularité

La valorisation du bois s'inscrit de longue date dans une logique d'usages en « cascade » de la ressource. Les bois d'industrie et énergie sont souvent des coproduits de l'exploitation des bois d'œuvre et les résidus de la transformation des bois sont généralement valorisés au sein de la filière.

Toutefois, le développement du bois énergie en France et en Europe suscite la controverse lorsqu'il court-circuite cette approche : selon certains, prélever du bois dans la forêt pour le brûler directement n'a aucun intérêt lorsqu'il peut être utilisé en tant que matériau, et le bois ne devrait être utilisé pour produire de l'énergie qu'une fois qu'il a été d'abord utilisé, réutilisé puis recyclé en tant que matériau chaque fois que c'est possible.

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

Bilan du recyclage des déchets bois en 2019



Source : Ademe, bilan national du recyclage 2019.



Décarbonation

La **Stratégie Nationale Bas Carbone** (SNBC) accorde une large attention à la réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à l'utilisation des bâtiments résidentiels et tertiaires (chauffage, cuisson, éclairage, etc.) : représentant 19% des émissions nationales, celles-ci doivent reculer de 49% d'ici 2030 par rapport à 2015, avant une décarbonation complète à l'horizon 2050. De plus, la SNBC prévoit que les émissions de gaz à effet de serre des phases de construction – qui représentent entre 60% et 90% de l'empreinte carbone des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie – soient mieux prises en compte et maîtrisées. Ces impacts amont se concentrent dans la fabrication des matériaux minéraux (ciment, béton) et métalliques (acier).

De plus, la SNBC considère **la construction bois comme un secteur stratégique pour atteindre la neutralité carbone en tant que puits de carbone** : le carbone séquestré lors de la croissance ces arbres peut être durablement stocké dans les produits bois (charpente, panneaux, menuiseries, etc.) tout au long de leur cycle de vie. La SNBC prévoit ainsi une **augmentation très importante du stockage de carbone dans les produits-bois**, grâce à l'augmentation de la récolte et le développement d'usage matériau du bois à longue durée de vie dans la construction. Le puits dans les produits-bois est estimé à 1,9 MtCO₂/an en 2015, et atteint 20 MtCO₂/an en 2050, soit une multiplication par plus de 10.

Focus : la nouvelle réglementation environnementale pour les bâtiments neufs RE 2020, levier de transformation des modes constructifs

En vigueur depuis le 1^{er} janvier 2022, la RE2020 prévoit la mise en place d'un indicateur carbone des bâtiments calculé en analyse de cycle de vie (ACV) : mesuré en kg CO₂/m² de surface, celui ne doit pas dépasser des plafonds d'émissions compatibles avec la trajectoire de réduction des émissions de la SNBC. Ce faisant, la RE2020 vise à accélérer la montée en puissance des systèmes constructifs bas-carbone, ce qui induit un recours accru aux matériaux biosourcés (dont le bois) qui présentent l'avantage d'être peu émetteurs lors de leur fabrication, de contribuer au stockage longue durée du carbone dans les bâtiments, et d'offrir des performances thermiques et phoniques élevées.



Substituabilité

Le développement de la construction bois tel que prévu par la SNBC soulève un fort enjeu de substitution de matériaux de construction carbonés (béton, parpaings, acier, etc.) par des matériaux issus du bois, afin d'éviter les émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication des premiers et permettre le stockage du carbone contenu par les seconds. Ainsi, le recours au ciment/béton et éléments métalliques est appelé à être réservé aux usages où leurs qualités les rendent difficiles à remplacer : fondations de bâtiments, génie civil, etc.

La baisse des activités de fabrication et de construction liées aux matériaux ciment/béton/métaux peut susciter des tensions sociales et un enjeu d'accompagnement des mutations professionnelles pour une industrie composée de 2300 carrières de granulats, 25 cimenteries, 1600 sites de fabrication de béton prêt à l'emploi, 780 sites de fabrication d'éléments préfabriqués (soit environ 45 emplois en France).



Innovations

Regroupant tous les produits dérivés du bois (bois massif abouté, bois lamellé-collé, bois lamellé-croisé, contreplaqué...), les produits techniques (ou bois d'ingénierie) ont progressivement supplanté le bois massif. Leur usage présente en effet de multiples avantages : offrant des performances comparables voire supérieures ; moins onéreux à produire, car moins gourmands en matière première et moins dépendant des propriétés intrinsèques de cette dernière (permet de valoriser des arbres plus fins ou de moindre qualité) ; en capacité de fournir des garanties en termes d'homogénéité du produit et de certifications de ses propriétés mécaniques ; s'ouvrant à une grande variété d'usages grâce à un large éventail de section et de longueur ; facilité de mise en œuvre (préfabrication). Le succès de ces produits techniques n'est plus à démontrer et fait école sur le marché de la construction-bois, au point que les savoir-faire constructifs propres aux bois massifs tendent à se perdre.

Face aux difficultés rencontrées par la filière bois pour rattraper son retard en matière d'industrialisation (compétitivité prix) et valoriser ses bois feuillus, l'innovation apparaît comme un levier clé. Le développement de produits à plus forte valeur ajoutée pour chaque élément constructif (ossature, charpente, bardage, aménagement...) peut permettre de développer des avantages compétitifs hors-prix et l'usage de bois feuillus pour ces produits.

En ce sens, la Feuille de route pour l'adaptation des forêts au changement climatique adopté par le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation en décembre 2020 prévoit le développement de la recherche et de la normalisation sur les essences peu ou pas utilisées (Chêne, Hêtre, Châtaignier, etc.) actuellement pour aider les industriels à adapter les outils de transformation, ainsi que l'élaboration d'une feuille de route stratégique R&D « Bois feuillus » entre acteurs de la recherche et transformateurs. À noter par exemple, les produits Bois Lamellé collé structurel en hêtre développés par l'entreprise normande Manubois Groupe Lefebvre. De même, ces produits innovants peuvent trouver une vitrine de choix à travers la multiplication des immeubles de grande hauteur en bois en France et dans le monde, tel que la tour d'habitation Ascent à Milwaukee qui compte 25 étages et mesure 86 mètres.



Territoire

Le développement de la construction bois concerne tout particulièrement la région Auvergne-Rhône-Alpes, 2^e région française en termes de surfaces forestières, 1^{ère} pour le stock de bois sur pied, 2^e pour la récolte de bois d'œuvre, 1^{ère} pour les sciages commercialisés et 1^{ère} pour la valeur ajoutée et le nombre d'emplois dans la filière bois dans son ensemble. Par ailleurs, la région Auvergne-Rhône-Alpes est la plus dynamique pour la construction de logement bois (4 000 logements en 2020) avec l'Île-de-France. La zone d'emploi de Lyon est la principale pourvoyeuse d'emplois dans les activités de sciages-travail du bois et construction bois.

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

En revanche, l'activité de fabrication de panneaux de bois apparaît sous-développée au regard de l'importance de la filière régionale. L'insuffisance de la production régionale de bois techniques pour la construction (composites, lamellés-collés, bois massifs reconstitués, bois modulaires...) pose également question au regard du potentiel important de ces produits. La construction bois en Auvergne-Rhône-Alpes est partagée entre des acteurs locaux, qui peuvent répondre à des marchés modestes et aux besoins des particuliers, et des acteurs industriels plus importants qui ont une dimension nationale et au-delà.

Plusieurs entreprises régionales développent des produits et systèmes constructifs bois innovants : CCB Greentech en Isère (panneaux préfabriqués en béton de bois), Techniwood en Haute-Savoie (Panobloc : mur rideau préfabriqué bois et isolant biosourcé), Ossabois et Tech&hab dans le Rhône (Système constructif modulaire, préfabriqué en atelier, comprenant l'ensemble de l'ossature du bâtiment, y compris les équipements, réseaux, cloisons,...), CBS-CBT en Savoie (murs et dalles en ossature bois), etc.

À noter également, la mise en place de la Stratégie Forêt Bois du Beaujolais portée par le Syndicat Mixte du Beaujolais, Charlieu-Belmont Communauté et Fibois (Rhône). Contribuant à valoriser l'essence phare du massif, le douglas, elle vise 4 grands objectifs :

- Gérer la forêt pour répondre aux enjeux du 21^e siècle ;
- Mobiliser durablement la ressource forestière ;
- Soutenir la filière bois locale ;
- Mieux faire mieux connaître la forêt et le bois.

Principales sources utilisées

- ADEME, CSTB (2019), *Prospective de consommation de matériaux pour la construction des bâtiments neufs aux horizons 2035 et 2050*.
- ADEME, Devauze Chloé, Koite Alima, Chrétien Anaëlle, Monier Véronique (2021). *Bilan National du Recyclage 2010-2019 - Évolutions du recyclage en France de différents matériaux : métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois*.
- Agreste, Direction générale des douanes et droits indirects (DGDDI), *Échanges extérieurs de bois de la France*.
- BIPE, FCBA (2019), *Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments*.
- FFB (2022), *Le bâtiment en chiffres 2021*.
- CODIFAB (2022), *Observatoire de la construction neuve 2021*.
- CODIFAB (2021), *Enquête nationale de la construction bois 2020*.
- Debouzy Ivan, Leurs Yann (2021), *Une ressource forestière abondante, de fortes spécialisations locales dans sa valorisation*, Insee Analyses Auvergne-Rhône-Alpes, Juin 2021, n°123.
- Le Hub des prescripteurs bas carbone (2021), *Book Innovation Filière Biosourcés*.
- I4CE (2022), *Puits de carbone : l'ambition de la France est-elle réaliste ? Analyse de la Stratégie Nationale Bas-Carbone 2*.
- I4CE (2022), *Réorienter les usages du bois pour améliorer le puits de carbone. Sur quels produits miser en priorité ?*
- Insee, *Nomenclature d'activités françaises*.
- Insee, *Comptes nationaux 2021*.
- Karibati (2022), *Recensement et qualification des producteurs de matériaux bas carbone pour la filière bâtiment durable sur le territoire élargi de la Métropole de Lyon*, Rapport pour la Métropole de Lyon.
- Ministère de la transition énergétique, Service des données et études statistiques (SDES), *Sit@del2 : Surface de plancher des logements mis en chantier ; Surface de plancher commencée par type de local non résidentiels*.
- Ministère de la transition énergétique, Service des données et études statistiques (SDES), *Chiffres clés du logement – Édition 2022*.
- The Shift Project (2022), *Décarboner la filière ciment-béton*.
- Sergent Arnaud (dir) (2018) *La compétitivité des filières locales pour la construction bois : état des lieux, enjeux et perspectives d'évolution*, FCBA et IRSTEA.
- Veille Économique Mutualisée de la filière forêt-bois (VEM-FB), *Tableau de bord de la filière forêt-bois*.
- Syndicat Mixte du Beaujolais - Fibois69 (2021), *Stratégie forêt bois du Beaujolais*.
- VEIA (2021), *Enquête nationale construction bois. Activité 2020*.



FILIÈRE TEXTILE



En résumé – La filière comprend l'ensemble des activités de conception, fabrication et commercialisation des textiles. Si le luxe et les textiles techniques ont conservé une assise productive forte en France, les 40 dernières années ont vu l'industrie d'habillement s'effondrer et placer la France en situation de forte dépendance aux importations. Face aux dégâts environnementaux et sociaux de la « fast-fashion », on assiste cependant à une attente revigorée (mais relative) et à une nouvelle dynamique entrepreneuriale en faveur d'une mode durable et made in France.

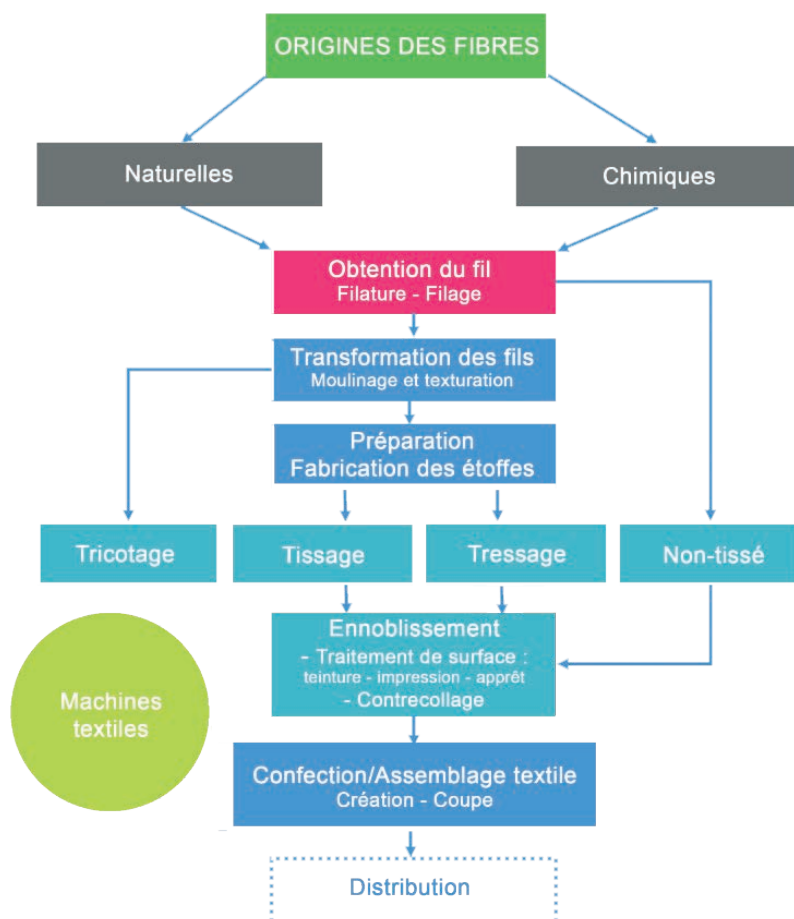


Organisation de la filière

L'industrie textile comprend l'ensemble des activités de conception, fabrication et commercialisation des textiles. On distingue généralement :

- **l'industrie textile** : elle comprend la fabrication de textiles pour les marchés de l'habillement et du linge de maison, mais aussi de textiles techniques dotés de propriété (élasticité, résistance au feu, contention, filtration, etc.) répondant aux exigences de leurs domaines d'application (médical, bâtiment, automobile, aéronautique, défense, sports et loisirs, agriculture, etc.).
- **l'industrie de l'habillement** : positionnée en aval de la fabrication textile, elle recouvre la conception et la confection (prêt-à-porter ou sur-mesure) de tous vêtements et accessoires, en lien étroit avec le commerce de détail. Elle inclut la fabrication de vêtements professionnels et d'équipements de protection individuelle (EPI), à la croisée avec les textiles techniques.

La fabrication de produits textiles nécessite de nombreuses étapes dont les principales sont les suivantes :



Source : Techtera

- **Préparation des fibres et filature** : elle vise à passer de la matière brute à la production de fil. Qu'il s'agisse de fil en matière naturelle (coton, laine, chanvre lin ...), artificielle ou synthétique, chaque fibre a ses spécificités et appelle généralement des techniques de filature et un outil de production spécialisés ;
- **Moulinage/Texturation** : procédé permettant d'assembler par torsion plusieurs fibres et filaments pour en modifier les caractéristiques techniques et lui conférer des fonctionnalités (élasticité, gonflant, résistance...) ;
- **Production des étoffes** : les procédés distinguent le tissage (deux ensembles distincts de fils sont entrecroisés à angle droit pour former un tissu), le tricotage (étoffe constituée de l'accumulation de boucles passées l'une dans l'autre, à partir d'un fil unique), le tressage (étoffes obtenues par l'entrelacement oblique de plusieurs fils) et le non tissé ou intissé (principalement utilisés dans des textiles techniques, ces matériaux sont réalisés à partir de fibres consolidées mécaniquement, chimiquement ou thermiquement) ;
- **Ennoblement** : procédés englobant les différentes étapes de modification de l'aspect de surface des étoffes (blanchiment, teinture, impression, apprêts mécaniques ou chimiques et enduction). Certains traitements peuvent être réalisés sur le fil, sur les étoffes et même sur les produits finis ;
- **Confection** : comprend les activités de fabrication de vêtements à partir des fils et étoffes issues des étapes précédentes (découpe et assemblage des tissus, emballage, etc.).

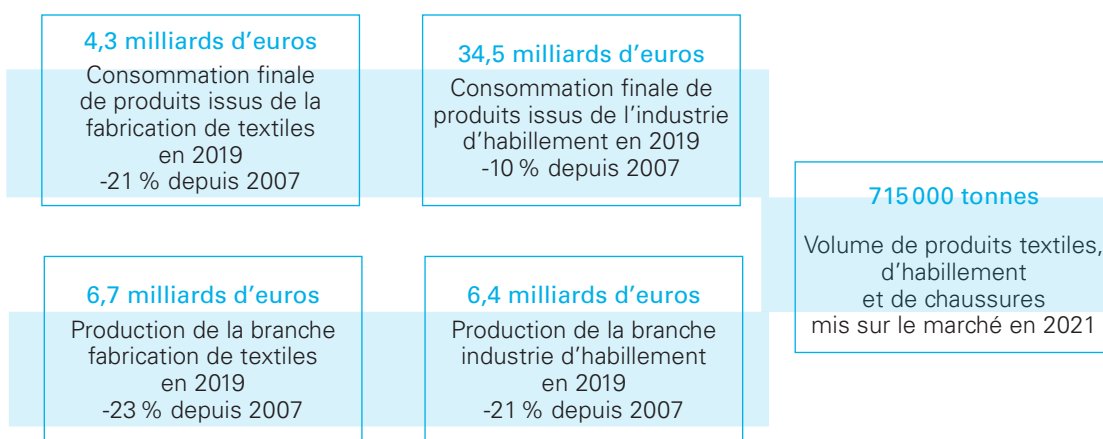


Dynamique économique

En France, on constate une évolution contradictoire de la consommation finale de produits textile et d'habillement. En valeur, on observe un fléchissement depuis la crise économique de 2008. Les dépenses annuelles par habitant se situent en dessous de la moyenne européenne. En revanche, les volumes de textile (et chaussures) mis en marché continuent de progresser entre 2019 (648 000 tonnes, 9,7 kg par habitant) et 2021 (715 000 tonnes, 10,5 kg par habitant) ; +21% entre 2009 et 2019). La croissance de la consommation en volume est tirée notamment par l'essor de la « fast fashion » (ou mode éphémère) depuis le début des années 2000. Celle-ci se caractérise par la mise en vente et le renouvellement très rapide de vêtements bon marché afin de pousser le consommateur à acheter davantage de produits pour suivre la dernière mode. En d'autres termes, avec le même budget, les consommateurs sont en mesure d'acheter davantage de vêtements que par le passé.

Du côté de la production, l'industrie textile-habillement connaît un déclin massif en valeur à partir du début des années 1990, avant de se stabiliser depuis 2009. Ce repli n'est pas spécifique à la France, même s'il y est plus marqué que chez ses partenaires européens.

Bilan du recyclage des déchets bois en 2019



Source : Insee, Comptes nationaux

Concernant l'évolution de la consommation domestique à l'avenir, il semble difficile de dégager une tendance claire. Le marché du textile, technique en particulier, dépend de l'évolution de l'activité des secteurs donneurs d'ordre – construction, automobile, aéronautique, etc. Sur le marché de l'habillement, après le fort recul observé en 2020 et 2021 en raison des fermetures de magasins induites par la pandémie de la Covid-19, la période de forte inflation que traverse l'économie européenne depuis plusieurs mois apparaît peu favorable à un retour de la consommation de produits textile à son niveau d'avant-crise. Toutefois, comme indiqué plus haut, une baisse de la consommation en valeur peut masquer une progression en volume physique.

Par ailleurs, au-delà des aspects quantitatifs, les professionnels (comité stratégique de la filière mode et luxe) observent une inflexion des comportements de consommation en faveur des produits de seconde main, made in France et durables, comme en témoignent :

- l'attention croissante accordée aux dégâts environnementaux et sociaux de la *fast-fashion* (campagnes de communication sur les réseaux sociaux : « #WhoMadeMyClothes », « Éthique sur l'étiquette », etc.) ;
- le succès des plateformes de vente de vêtement d'occasion pour des raisons économiques ou écologiques (en 2019, 40% des Français ont acheté des vêtements de seconde main, et 56% d'entre eux ont fait leurs achats sur Vinted selon l'institut Français de la Mode) ;
- le fait qu'une part croissante des consommateurs se déclare prêt à payer plus cher un produit fabriqué en France et/ou durable (61% des consommateurs déclarent avoir intégré des produits Made in France dans leurs achats mode au cours des 12 derniers mois, et pour 58% d'entre eux, cela représente un critère prioritaire de leurs actes d'achats) ;
- le fait que les grandes enseignes (Leclerc, Carrefour, Auchan, Système U) accordent davantage de place dans leurs rayons aux vêtements fabriqués dans l'Hexagone.

Autant d'évolutions favorables à une réindustrialisation de la filière textile française (voir relations de filière). Le comité stratégique de filière affiche ainsi l'ambition de doubler à terme la part de marché du Made in France dans la consommation de produits textile et chaussures, pour atteindre 25%.

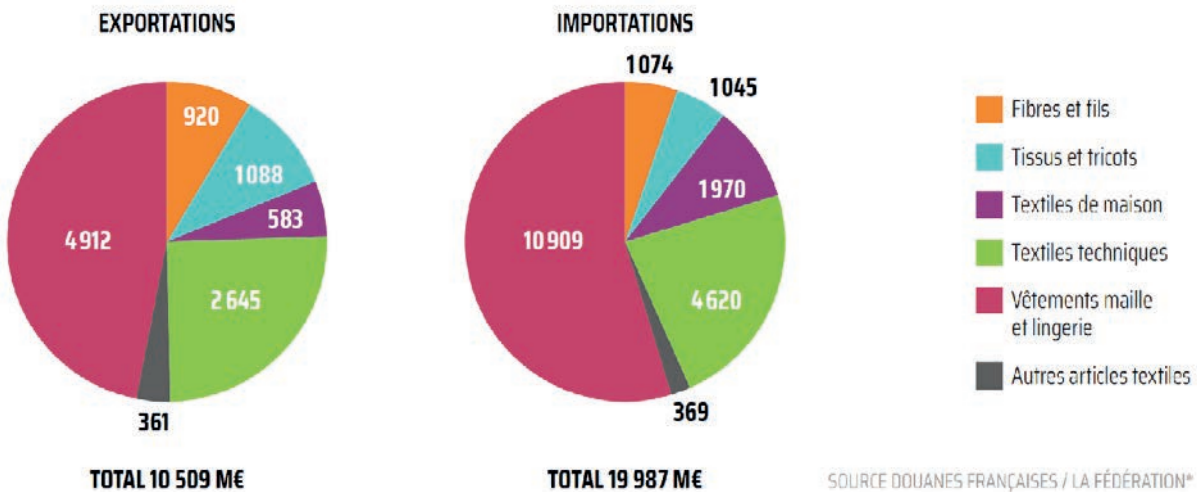


Dépendance/vulnérabilité

Compte tenu du fort recul de la production hexagonale au cours des trente dernières années, la France présente une balance des échanges extérieurs de produits textile et d'habillement nettement déficitaire aussi bien en valeur (-9,5 milliards d'euros) qu'en volume (-853 000 tonnes en 2021). En forte progression ces dernières décennies, les importations de produits textiles et de produits d'habillement représentent respectivement 1,2 et 0,9 million de tonnes. La dépendance aux importations apparaît d'autant plus nette que les trois quarts de la production nationale sont exportés. 54% de ces importations proviennent d'Asie. En valeur, les vêtements, les textiles techniques et les textiles de maison représentent les principaux postes d'importation. Il est important de souligner que la dépendance de la France aux importations concerne aussi bien certains produits finis comme les vêtements que les matières premières nécessaires à la filière textile hexagonale (fils et tissus). Il en résulte une vulnérabilité face aux risques d'approvisionnement pouvant peser sur le devenir de la filière et sa compétitivité sur ses différents marchés d'application, comme l'a mis en lumière la crise de la Covid-19 concernant la fabrication de masques sanitaires.

Exportations et importations de textile en France par catégorie de produits en 2021

Source : Union des Industries Textiles



Relations de filière

La filière textile française s'organise autour de trois grands champs d'activités dominés par des groupes textiles de 250 salariés ou plus, surtout des multinationales :

- **Le luxe et le haut-de-gamme** (haute-couture et mode), largement tournés vers l'export et dont le caractère « Made in France » constitue un atout (leadership mondial) ;
- **Les textiles techniques** à forte valeur ajoutée, comme les textiles renforcés et ultra-résistants utilisés notamment dans l'aéronautique et l'automobile. Ces activités sont également largement tournées vers l'export et reposent sur des chaînes de production fortement ancrées en France ;
- **L'habillement** se distingue par des donneurs d'ordre industriels principalement tournés vers le marché national et opérant la production selon un modèle « fables » (la conception, le marketing et la distribution des produits sont réalisées en France tandis que la majeure partie des étapes de filature, tissage, ennoblissement et confection est sous-traitée à des fournisseurs étrangers, situés pour l'essentiel en Asie).

Si les deux premières composantes développent de longue date leur socle productif hexagonal, la troisième a suivi la trajectoire inverse depuis les années 1980. Toutefois, la fermeture de l'enseigne Camaïeu, ou inversement le succès des marques françaises misant sur la mode responsable et ancrée dans les territoires (1083, Le Slip Français, Loom, etc.) et la multiplication des projets de relocalisation observés ces dernières années montrent que l'industrie de l'habillement « Made in France » et durable semble avoir à nouveau le vent en poupe. Accélérer la dynamique soulève cependant plusieurs enjeux de taille selon le comité stratégique de filière :

- **Compenser les coûts de production structurellement plus élevés en France** que dans la majorité des pays concurrents (en raison de l'intensité en main d'œuvre de la filière textile) en privilégiant les produits nécessitant peu de temps de confection ou dont les processus de production peuvent être automatisés, et en tirant parti des atouts du made in France : bénéfique en termes d'image, qualité des savoir-faire, aide à la conception-prototypage, réduction des démarques et invendus par une réduction des commandes initiales et une réactivité des réassorts (production à la demande), délai de livraison réduit, traçabilité des produits à chaque étape de leur fabrication, meilleure maîtrise des enjeux de décarbonation (production française moins émissive) et de circularité (filière de recyclage), etc.

- **Amplifier et accélérer les projets de réindustrialisation à toutes les étapes de la filière** – filature, tissage, tricotage, ennoblissement, confection, etc. – en encourageant les projets de co-investissements industriels entre donneurs d'ordre et fabricants pour donner de la visibilité à moyen terme et partager les risques et la marge. La modernisation de l'outil de production existant apparaît également nécessaire afin de gagner en productivité et compenser les salaires plus élevés en France.
- **Faciliter le *sourcing* made in France en favorisant la mise en réseau des acteurs tout au long de la chaîne de production** via le développement de plateformes de mise en relation de l'offre et de la demande (par exemple, plateforme Façon de Faire, Salon Première Vision, la construction de partenariats et d'écosystèmes productifs ou encore la montée en compétences en matière de respect des délais.
- **Réduire la dépendance de la filière à l'égard des fibres et tissus importées** en développant la production et la transformation de fibres biosourcées (lin, chanvre, laine) et le recyclage des fibres naturelles (coton) ou synthétiques.
- **Valoriser auprès des consommateurs et acheteurs publics les atouts du Made in France** (qualité, durabilité, savoir-faire, conditions de production, emploi local, etc.) afin de justifier son prix supérieur.



Circularité

La croissance de la consommation et les modes de production à l'œuvre font de la filière textile l'une des plus impactante au monde sur le plan environnemental, aussi bien en amont (production des fibres), qu'aux étapes de transformation (énergie, produits chimiques) et en aval à travers l'accroissement considérable des flux de déchets. Ces pressions s'accroissent sous l'effet en particulier de la « fast-fashion » (voir dynamique économique). Celle-ci entraîne la production massive de vêtements à obsolescence rapide en raison de leur moindre qualité et de l'accélération du rythme des collections – passées de 2 par an en 2000 à 24 dans certains magasins, voire à des nouveaux modèles chaque jour sur des plates-formes de e-commerce. Ceci entraîne à la fois une amplification de la consommation – on estime qu'en moyenne une personne achète 40% de vêtements en plus qu'il y a 15 ans – et une réduction de la durée d'usage des produits.

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

Accroître fortement le réemploi et le recyclage des textiles ainsi que le taux d'incorporation de fibres recyclés dans les produits textile implique des efforts sur l'ensemble de la filière : éco-conception et durabilité des produits en amont, réduction des volumes mis sur le marché afin de réduire le besoin de fibres, information du consommateur sur l'empreinte environnementale des textile (taux de matières recyclées, empreinte carbone, etc.), traçabilité des fibres et substances contenues dans les produits, amplification de la collecte sélective des textiles, développement et investissement dans de nouvelles capacités industrielles de récupération des fibres (voir fiche « Fibres textile » dans le rapport Matériaux), sécurisation des gisements en amont et des débouchés en aval.

Il est important de souligner que la circularisation des produits collectés passe prioritairement par l'**allongement de la durée de vie des produits textiles à travers le développement du réemploi**. Les produits de seconde main peuvent en effet se substituer à des produits neufs et favoriser l'accessibilité prix des vêtements. Cependant, le développement du réemploi bute en pratique sur plusieurs freins : baisse de la qualité des vêtements collectés (effet « fast-fashion » et essor du marché de seconde main), fragilité des modèles économiques des opérations de collecte et de tri qui demandent une main d'œuvre importante et compétentes. *In fine* seule une très faible part des flux collectés fait l'objet d'un réemploi en France. Sur les 244 448 tonnes collectées, seuls 190 000 tonnes sont triées en France, le reste étant en large partie exportés vers des opérateurs de tri situés à l'étranger. Si 58% des produits collectés et triés via Re-fashion sont destinés à la

réutilisation sur le marché de la seconde main, 95% de ceux-ci sont revendus à l'export car leur qualité est jugée insuffisante pour être revendus en France. De plus, la réalité du « réemploi » de ces textiles exportés est de plus en plus contestée par des ONG et journalistes dans la mesure où ils entraînent bien souvent des pollutions massives et la destruction de l'économie textile dans un certain nombre de pays du Sud.



Décarbonation

L'industrie mondiale de l'habillement génère plus de 3 milliards de tonnes d'émissions de gaz à effet de serre par an, soit près de 7% des émissions totales. La poursuite des tendances laisse augurer d'une croissance des émissions de 30% d'ici 2030. Plus de 70% de ces émissions proviennent des activités amont d'extraction des matières premières (combustibles fossiles, coton, etc.) et de transformation (fabrication des fibres chimiques, filature, tissage, etc.). Les 30% restant sont générées par les activités de transport, emballage, distribution, usage et gestion en fin de vie.

La décarbonation de la filière textile nécessite de combiner différents leviers. Le premier est celui de la réduction du recours aux fibres synthétiques (voir fiche « Fibres textile » du rapport Matériaux).

Un autre levier de décarbonation concerne l'énergie utilisée pour fabriquer les produits textiles. À l'heure actuelle, une large partie de la production textile mondiale a lieu dans des pays dont le mix énergétique est fortement carboné (Chine, Vietnam, Bangladesh, etc.).

Or, comme le montre une étude récente, les produits textiles made in France présentent une empreinte carbone deux fois inférieure à celle des produits importés : 28 kg d'équivalent CO₂ par kg de textile contre 54 kg. Produire en France les produits qui y sont consommés constitue ainsi un levier majeur de décarbonation de la consommation textile des français, en plus de réduire les émissions liées au fret international.

Enfin, la réduction des invendus offre également un potentiel de décarbonation important.



Substituabilité

Comme indiqué plus haut, le principal enjeu de substitution concerne la réduction de la production de fibres synthétiques et leur remplacement par des fibres naturelles durables et/ou recyclées. Le comité stratégique de filière « Mode et luxe » promeut le développement de la filière de transformation du lin (dont la France est le 1er producteur mondial), tandis que la loi AGECL prévoit de moduler l'écocontribution versée aux éco-organismes par les metteurs en marché en fonction de l'incorporation de matières recyclées et/ou réemployées dans leurs produits.



Innovations

Les enjeux de réindustrialisation, de circularité ou de décarbonation de la filière textile soulève plusieurs enjeux d'innovation. **L'éco-conception** des produits textiles fait l'objet d'attentes et d'ambitions croissantes pour enrayer la perte de qualité des produits et donc de leur durée d'usage – tenue des couleurs, résistance aux déchirures, durée de vie des fermetures éclair et des coutures etc. L'écoconception peut jouer également un rôle clé dans l'amélioration de la réparabilité et la recyclabilité des produits (qui impliquent notamment des produits plus simples et plus polyvalents) et de l'incorporation de fibres à moindre impact environnemental – biosourcées, recyclées, etc. –, de réduire l'usage de substance chimiques dangereuses à toutes les étapes de production, et de faciliter les processus de recyclage en boucle fermée (traçabilité des matières, éviter le mélange de types de fibres, etc.). La Stratégie de l'Union européenne pour des textiles durables et circulaires prévoit un durcissement de la réglementation en matière d'éco-conception.

Un second enjeu concerne le **développement et l'industrialisation des procédés de tri** (composition, couleur, etc.) et recyclage (défibrage, effilochage, etc.) des textiles non réutilisables en vue d'une valorisation matière (voir fiche « Fibres textile » du rapport Matériaux).



Territoire

L'industrie textile est présente de longue date en Auvergne-Rhône-Alpes, première région textile de France, représentant un peu plus du quart des entreprises, des emplois et du chiffre d'affaires de la filière au niveau national. La région présente une forte spécialisation dans le tissage, le tricotage et l'ennoblissement, avec cependant un déficit de capacités de production sur certaines étapes de la chaîne de valeur, en particulier sur la filature. La filière régionale est principalement tournée vers les marchés des textiles techniques (construction, médical, sport, aéronautique, défense, agriculture), des vêtements de travail et du luxe. Elle compte également des acteurs de l'innovation d'envergure nationale (Techtera, Institut Français du Textile et de l'Habillement, etc.) en lien avec les laboratoires universitaires du territoire, et peut tirer parti de la proximité avec des secteurs connexes très présents localement (chimie, plasturgie notamment) et la présence des syndicats professionnels régionaux (Unitex, Modalyon).

Parmi les principales entreprises présentes en grande région lyonnaise, on peut citer :

- Luxe : Hermès (Rhône), Denis & Fils (Loire), Les Tissages Peyrin (Isère).
- Tissage : Deveaux (Rhône), Les Tissages de Charlieu (Loire), Linder (Loire).
- Textiles ménagers : Thion (Rhône)
- Textiles techniques : Hexcel (Ain), Porcher Industries (Isère), Serge Ferrari (Isère), Saint-Clair Textiles (Isère), Mermet (Isère), Sigvaris Groupe (Loire,), Thuasne (Loire), Gibaud (Loire et Ain).
- Habillement : Devernois (Loire), Fée Maraboutée (Loire), Cotélac (Ain), Lise Charmel (Rhône), Lejaby (Rhône), Zili (Rhône), Robur (Rhône), Cepovett (Rhône), DMD France (Rhône).

Faisant face à des contraintes et opportunités économiques différentes, les industries du textile technique affichent un dynamisme économique tandis que celles de l'habillement se sont globalement effondrées au cours des dernières décennies. Toutefois, les enjeux actuels de sécurisation des approvisionnements, d'écoconception, de circularité, de décarbonation ou de recyclage pourraient favoriser le développement de nouvelles synergies entre elles. En effet, si les gisements de matières secondaires proviennent davantage de la filière habillement, les capacités d'innovation sur les process et les produits sont avant tout du côté de la filière textile.

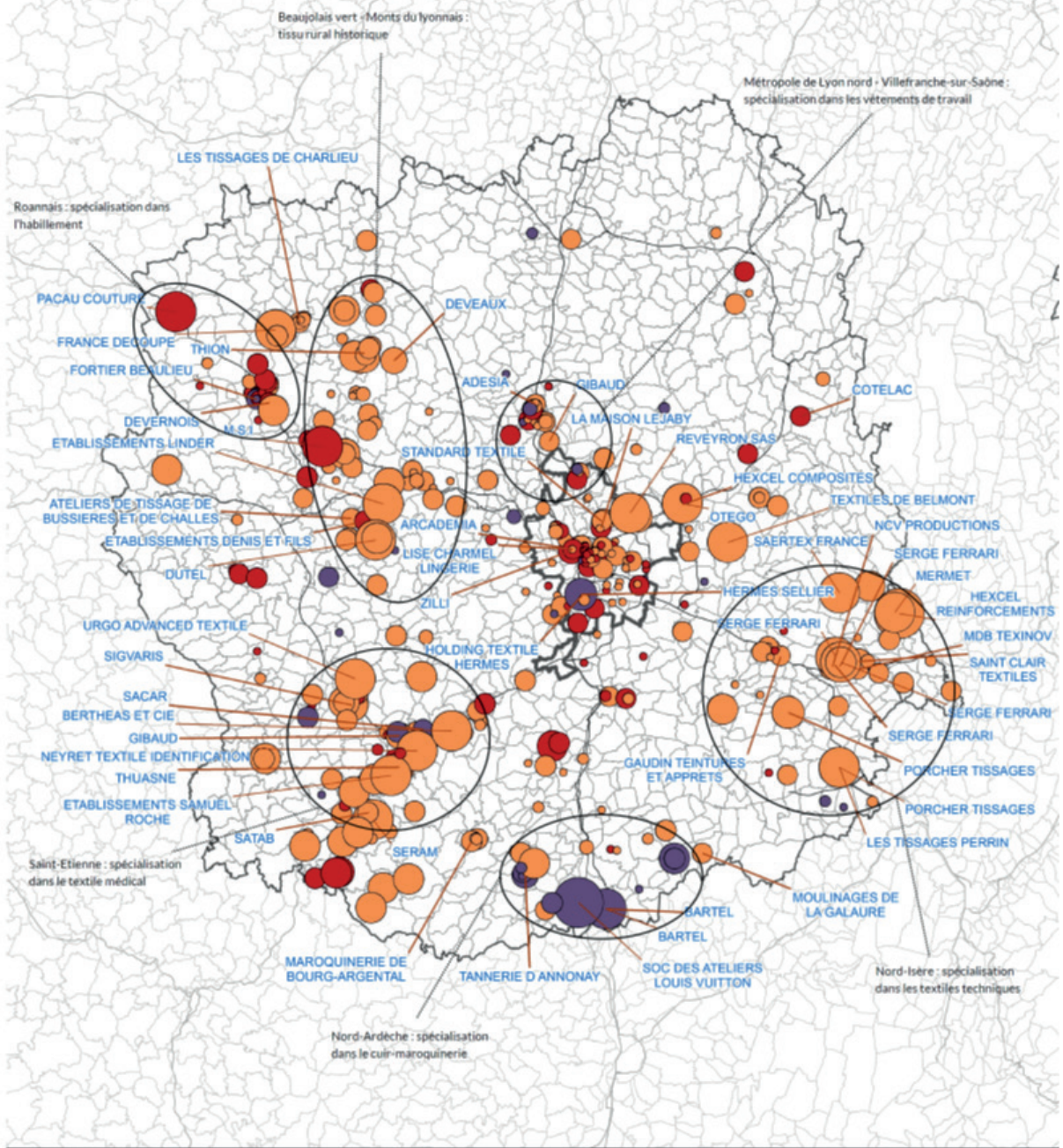
Le développement et l'industrialisation de matériaux biosourcés et alternatifs constitue un élément clé de la feuille de route du pôle de compétitivité Techtera et se traduit notamment par les projets de R&D AGROBOOST (développer des textiles techniques agrosourcés, à biodégradabilité totale et contrôlée) et ECOLASTANE (développer des fibres élasthanne et polyester biosourcées à 70-100% afin de remplacer leur processus actuel de fabrication utilisant du pétrole). À noter également la renaissance de l'entreprise Le jean gaulois (Rhône) qui fabrique des jeans en lin français et cousus, tissés et montés dans son atelier.

Focus : l'atelier de conception et de confection engagé et durable Maison Ma Bille (Lyon)

Créée sous forme d'Entreprise Sociale et Solidaire, Maison Ma Bille accompagne les créateurs, les moyennes et grandes entreprises dans le développement, la production et la commercialisation de leur collection de vêtements et accessoires textiles, conçus et confectionnés de manière éco responsable et intelligente. L'entreprise s'articule autour d'une équipe multiculturelle aux compétences « métier » complémentaires, organisée en 3 :

- Le Bureau d'étude, où l'on imagine, conçoit, développe et optimise les produits textiles pour les amener à l'industrialisation.
- L'Atelier où l'on maîtrise toute la chaîne de production (coupe, assemblage, personnalisation, contrôle qualité, logistique), à la demande ou en série.
- Le pôle Conseil au sein duquel les projets sont testés, incubés et améliorés pour être commercialisés dans les meilleures conditions possibles (positionnement et stratégie commerciale, business plan, valorisation/communication, *upcycling*...).

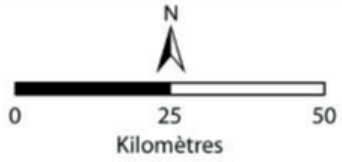
Etablissements du textile, de l'habillement et du cuir-marroquinerie dans le carré métropolitain en 2020



Tranche d'effectif

○	de 1 à 9 salariés
○	de 10 à 19 salariés
○	de 20 à 99 salariés
○	de 100 à 249 salariés
○	plus de 250 salariés

○	Industrie textile
■	Habillement
■	Cuir et marroquinerie



Dénomination des établissements de plus de 50 salariés

Source : INSEE-SIRENE 2021
Novembre 2021 - GUT

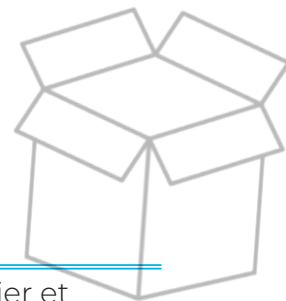


Principales sources utilisées

- Agence d'urbanisme de l'aire métropolitaine lyonnaise (2022), *Textile, habillement et cuir en région lyonnaise. Des industries historiques porteuses d'innovation et de renouveau*, Janvier 2022.
- Ademe (2022), *Le revers de mon look*.
- Breuneval Fanny (2022), *L'effondrement de Camaïeu, symbole d'un élan vers une mode plus responsable*, Novethic, Publié le 07 octobre 2022.
- Chaire Bali (2020), *Les leviers technologiques pour mettre en œuvre une mode circulaire*.
- Commission Européenne (2022), *Stratégie de l'Union européenne pour des textiles durables et circulaires*.
- Comité stratégique de Filière "Mode et Luxe" (2020), *Relocalisation et mode durable*.
- Cook Gary, Rommwatt Maya (2020), *Fashion forward : A Roadmap to Fossil Free Fashion, Stand. earth*.
- CRESS Auvergne-Rhône-Alpes (2022), *Note d'opportunité : textile, ESS et réemploi*, mars 2022.
- En Mode Climat (2021), *Évolution des volumes de consommation textile en France*. Note de synthèse, mars 2021.
- Euratex (2022), *Facts & key figures 2022 of the european textile and clothing industry*.
- European Commission (2021), *Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling*.
- European Environment Agency (2019), *Textiles and the environment in a circular economy*.
- Garnier Juliette (2022), *Coton bio, «made in France» et vêtements recyclés... L'utopie de la mode durable*, Le Monde, 30 janvier 2022.
- Garnier Juliette (2022), *Tous les hypermarchés veulent désormais leurs vêtements fabriqués en France*, Le Monde, 20 mai 2022.
- Insee, *Nomenclature d'activités françaises*.
- Insee, *Comptes nationaux 2021*.
- Insee (2022), *En 2021, la consommation des ménages rebondit mais reste en deçà de sa tendance d'avant-crise*, Insee Première 1908, 29/06/2022.
- Insee (2018), *L'industrie textile en France : une production mondialisée, sauf pour les produits de luxe et les textiles techniques*, Insee Première n°1714, octobre 2018.
- McKinsey, Global Fashion Agenda (2020), *Fashion on climate*.
- Payet Jérôme (2021), *Évaluation de l'empreinte carbone du secteur textile en France*.
- Quantis (2018), *Measuring fashion. Environmental Impact of the Global Apparel and Footwear Industries Study*.
- Refashion (2022), *Cartographie des produits issus du recyclage des textiles usagés*.
- Refashion (2021), *Rapport d'activité 2021*.
- <https://facon-de-faire.fr/>
- <https://refashion.fr/pro/fr>
- <https://www.textile.fr/marches-activites-matieres-textiles>
- <https://www.techtera.org/techtera/presentation-de-la-filiere/chaine-de-valeur-textile/>



FILIÈRE PAPIER-CARTON

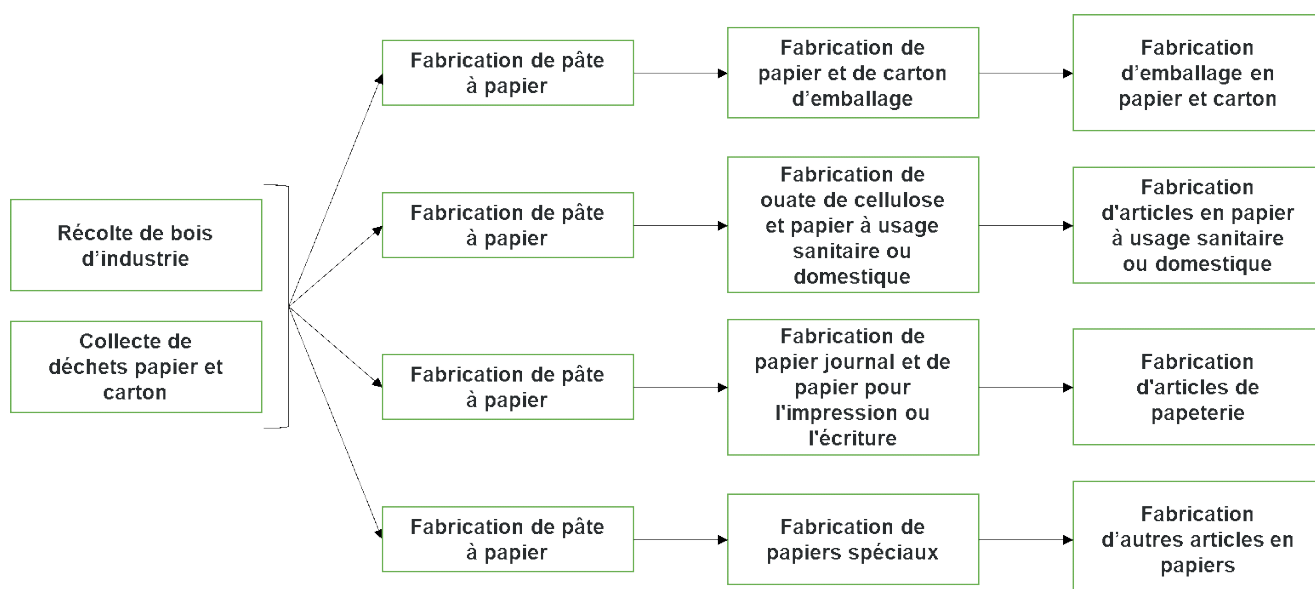


En résumé – L'industrie papetière comprend la fabrication de pâte à papier et de papiers et cartons bruts, complétée en aval par les activités de fabrication de produits finis (emballages, rouleaux de papier toilette, etc.). Comme d'autres industries, la filière papier-carton connaît en France une trajectoire de déclin, avec une production nettement en-deçà de la consommation nationale, d'où une nette dépendance aux importations. Atteignant des performances élevées en matière de recyclage des papiers-cartons, la filière est cependant dans l'incapacité d'absorber une large part des déchets collectés en France.



Organisation de la filière

La filière Papier-Carton comprend plusieurs activités liées entre elles de l'amont à l'aval :

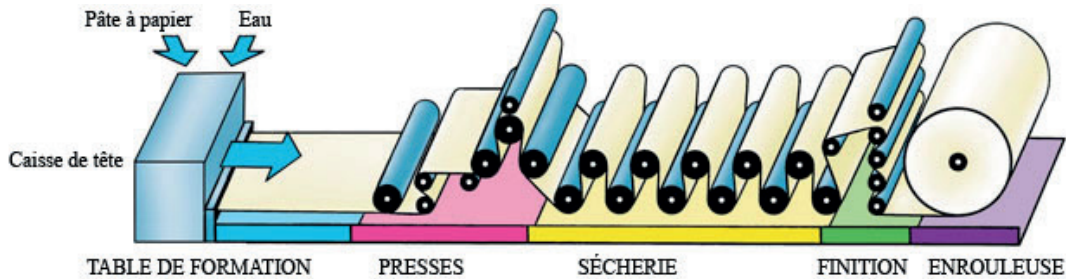


Source : Insee ; Copacel ; CGEDD-CGE-CGEFI, 2021

- **La fabrication de pâte à papier à partir de bois ou de déchets de papier et carton :** lorsqu'elle est réalisée à partir de bois – provenant de faibles sections de bois d'œuvre ainsi que des coproduits (copeaux, sciures, etc.) issus des scieries –, la fabrication de pâte à papier consiste à séparer les fibres cellulosiques contenues dans le bois. Pour ce faire, on distingue deux procédés : la cuisson du bois à haute température dans des « lessiveurs », en présence de produits chimiques (soude, bisulfite, etc.) ; et la désintégration du bois en présence d'eau, à l'aide de disques ou de meules cylindriques (défibreurs). La fabrication de pâte à papier à partir de déchets de papier et carton consiste quant à elle à les dissoudre dans de l'eau chaude (éventuellement additionnée de produits chimiques) et à éliminer les composants non cellulosiques (encres, charges minérales, films plastiques, vernis...).
- **La fabrication de papier et de carton :** La pâte à papier parcourt un long chemin à travers la « machine à papier » (longue de plusieurs dizaines de mètres) avant de devenir une feuille de papier ou carton. Elle est tout d'abord déposée sur une grille mobile en vue de former une feuille continue, avant d'être pressée entre deux cylindres recouverts de feutre absorbant, puis séchée contre des tambours chauffés à la vapeur. Différentes étapes de finition (enduction, apprêt, couchage) permettent ensuite de recouvrir la feuille de matières (pigments, colorants, etc.) afin d'améliorer ses propriétés et égaliser sa surface. La feuille est enfin enroulée en bobines pesant plusieurs centaines de kilogrammes, voire quelques tonnes. À noter, le carton est un

papier au grammage plus élevé, pouvant être supérieur à 200 g/m², parfois appelé « carton plat ». Le carton ondulé est réalisé par l'association de plusieurs feuilles de « papier pour ondulé ». Le terme carton peut aussi recouvrir les emballages, parfois appelés « caisses ».

Représentation des différentes étapes d'une machine à papier



Source : <http://www.lepapier.fr/fabrication.htm>

- **La fabrication d'articles en papier ou en carton** (emballages en papier et carton, papiers à usage sanitaire et domestique, articles de papeterie, papiers peints, etc.). Ces étapes ultérieures de valorisation du papier sont réalisées dans des établissements distincts des usines papetières.

Les grandes étapes de fabrication de la filière s'organisent selon les quatre grandes familles de papiers produits par la filière. Ces dernières correspondent en effet à des usages spécifiques, nécessitant des caractéristiques distinctes – en termes de résistance, densité, opacité, blancheur, douceur, imprimabilité, absorption des liquides, imperméabilité, etc. – qui appellent des processus de production spécialisés.

- **Les papiers et cartons d'emballage** : ils permettent d'assurer la protection et le transport des produits ainsi que la sécurité sanitaire et l'information du consommateur. On distingue les papiers pour ondulé (casse carton, cagette pour fruits et légumes, présentoir pour la grande distribution, etc.), les cartons plats (boîte pour médicaments, articles de luxe, jouets, produits alimentaires, etc.) et les emballages souple (sac de forte contenance tel que sac de ciment, sac pour emballer les fruits et les légumes, etc.).
- **Les papiers graphiques** : ce sont les supports de la communication, de la littérature, de la connaissance et de l'information. On distingue le papier journal et magazine d'une part, et les papiers d'impression-écriture d'autre part (utilisés dans l'édition, la publicité, la bureautique, la correspondance...).
- **Les papiers d'hygiène** : destinés à l'hygiène de la personne comme au maintien de la propreté au quotidien, les papiers d'hygiène ont pour fonction d'essuyer, d'absorber, de protéger et sont par conséquent à usage unique. La ouate de cellulose est le papier le plus couramment utilisé dans la fabrication du papier toilette, de l'essuie-tout, des produits d'essuyage industriel, des mouchoirs, des serviettes de table...
- **Les papiers spéciaux** : ils font appel à des techniques de fabrication de pointe pour différents types d'usage, tels les usages fiduciaires (papiers d'identité, billets de banque...), les usages graphiques spécifiques (papiers transferts...), les usages industriels (papiers pour stratifié, papiers abrasifs...), et d'autres usages spécifiques (papiers à cigarettes, filtres, papiers-peints...).



Dynamique économique

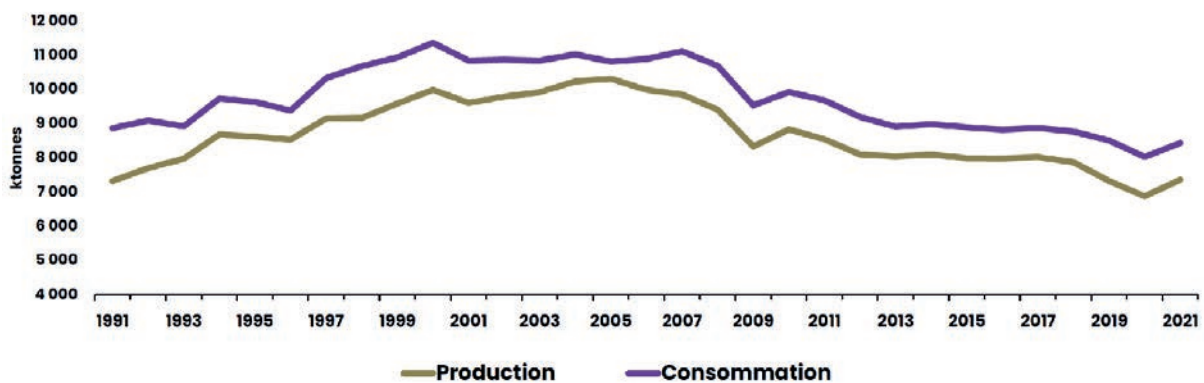
Les chiffres de consommation et de production présentés ci-dessous sont issus des statistiques publiées par l'Union Française des Industries des Cartons, Papiers et Celluloses (COPACEL). Ils portent sur la consommation de papier et carton bruts avant transformation en produits finaux.

On observe une diminution de la consommation de papier par habitant dans les pays développés au cours des dernières décennies, ce qui n'est pas le cas à l'échelle mondiale. En France, elle est passée de 149,1 kg/hab. en 2011 à 124,7 en 2021. Multipliée par près de 8 depuis 1950, la consommation totale a connu un pic en 2000 (environ 11,5 millions de tonnes). Stable jusqu'à la crise de 2008, elle connaît une lente diminution depuis et se situe à 8,4 millions de tonnes en 2021.

Les évolutions sont cependant contrastées selon les familles de produits. Le déclin de la presse papier, du courrier et la numérisation des processus d'échanges entraînent une baisse de la consommation de papier graphique. Inversement, le développement du e-commerce, l'augmentation des échanges mondiaux et les vertus écologiques du carton comparé au plastique favorisent la croissance de la consommation de papier et carton d'emballages. Relativement stable avant la crise de la Covid-19, la consommation de papier d'hygiène connaît un net rebond en 2020 et 2021. Les papiers spéciaux connaissent quant à eux une croissance faible.

La production française de papier est quant à elle en déclin. Ce constat n'est pas spécifique à la filière, la France étant l'un des pays les plus désindustrialisés d'Europe. Après un pic à 10,5 millions de tonnes en 2005, la production se situe à 7,4 millions de tonnes en 2021. Cette évolution défavorable de la production en France n'est pas observée dans le reste de l'Europe. La France a vu sa part de la production européenne reculer de 3 points entre 2000 et 2019, en faveur de l'Espagne, de l'Italie et de l'Allemagne, qui ont accru leur capacité de production ces dernières années par la création de nouvelles usines. Le recul de la production de papier graphique s'avère plus marqué que celui observé pour la consommation ; cette évolution reflète notamment la baisse de capacité de production résultant de la fermeture de sites de la société Arjowiggins début 2019. En revanche, entre 2011 et 2021, la production d'emballage et de papier d'hygiène progresse plus vite que la consommation.

Production et consommation de papiers et cartons (1991 - 2021)



Source : Copacel 2021

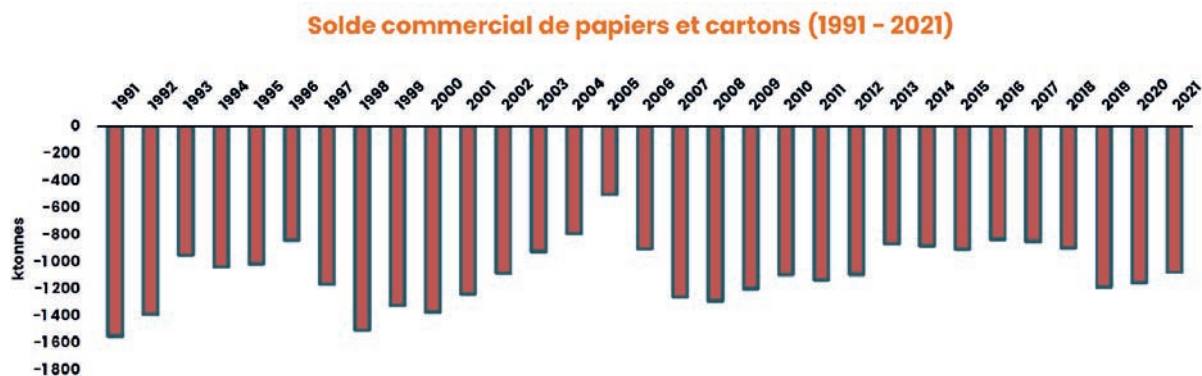


Dépendance/vulnérabilité

La dépendance de la France aux importations doit s'analyser à plusieurs niveaux. Tout d'abord, quelle est la disponibilité des **matériaux** nécessaires à la fabrication de pâte à papier dans les usines françaises ? La récolte de bois d'industrie est en recul ces dernières années et l'industrie papetière a tendance à réduire sa consommation de ce type de matériaux (5,8 millions de tonnes en 2021 contre 6,8 en 2011). En revanche, le gisement de papiers et cartons à recycler (PCR) est excédentaire par rapport à la consommation de la filière (voir circularité) : sur 6,9 millions de tonnes collectées en 2021, 4,3 ont été consommés par l'industrie papetière française. Les PCR offrent ainsi une réserve importante, tandis que la récolte de bois d'industrie pourrait rebondir à l'avenir avec le développement de la récolte de bois d'œuvre prévu par la Stratégie Nationale Bas Carbone.

Une seconde question concerne la provenance de la pâte à papier transformée en France. En déclin depuis 1997, la production nationale est de longue date largement inférieure à la consommation de pâte à papier de la filière : elles se situent respectivement à 1,6 et 2,5 millions de tonnes en 2021. La France est donc importatrice nette de pâte à papier : -1,2 million de tonnes en 2021. 41 % des importations proviennent d'Amérique du Sud et 15 % de Suède.

À l'étape des **papiers bruts**, comme souligné plus haut (voir dynamique économique), la production nationale est de longue date inférieure à la consommation, ce qui induit là aussi une situation de déficit des échanges extérieurs : -1,1 million de tonnes en 2021. Toutefois, ce déficit a été plus prononcé à d'autres époques comme le montre le graphique ci-dessous. La moitié des importations proviennent d'Allemagne, d'Italie et d'Espagne.



Source : COPACEL, 2021

Enfin, il est important de regarder les échanges de **produits en papier et carton transformés**. On constate là aussi un déficit croissant : -700 000 tonnes en 2021. Les importations proviennent principalement d'Italie, d'Allemagne et d'Espagne.

Au total, si la France semble disposer des matières premières suffisantes pour satisfaire son marché intérieur, le déclin de l'industrie papetière la rend dépendante des importations à tous les stades de la chaîne de production.



Relations de filière

La filière papier-carton se caractérise par un fort cloisonnement interne entre les quatre grandes familles de produits mis sur le marché : papiers et cartons d'emballage, papiers graphiques, papiers d'hygiène et papiers spéciaux. En effet, les unités de production de pâte, de même que les machines à papier, sont spécifiques à un type de produits. Cette caractéristique explique la spécialisation des établissements industriels et, parfois, de certains groupes.

Fortement capitalistique, la fabrication de papier exige des installations très techniques de grandes dimensions permettant de produire en masse, qui sont de surcroît très difficilement ou non-convertisibles d'une production à une autre ou d'une matière première à une autre. Enfin, la filière papetière a connu depuis une trentaine d'années de nombreuses opérations de fusions et d'acquisitions. Cette phase de concentration a conduit à ce que les entreprises françaises soient désormais très majoritairement sous le contrôle de grands groupes étrangers : International Paper (États-Unis), Smurfit Kappa (Irlande), DS SMITH (Grande-Bretagne), SAICA (Espagne), NORSKE SKOG (Norvège), UPM (Finlande), RDM Group (Italie).

L'organisation géographique de la filière est conditionnée par le transport. La pâte à papier déshydratée ou les bobines de papiers voyagent facilement et font l'objet d'un commerce mondial. Leur fabrication peut donc être délocalisée. Cela n'est pas le cas des opérations de transformation et de façonnage dont les produits (carton en plaques, emballages façonnés, papier d'hygiène, etc.) présentent une faible masse volumique et sont donc coûteux à déplacer. Ils sont donc fabriqués sur leur lieu d'utilisation ou à proximité. Par ailleurs, si la production de pâte à papier et de papier-carton bruts est contrôlée par

de grandes entreprises, la transformation et la fabrication de produits finis est assurée une majorité de PME.

L'activité de la filière est largement dépendante de celle des secteurs utilisateurs aval. Cela est particulièrement le cas pour le secteur de l'emballage qui est étroitement lié au volume de vente des produits à emballer. La filière a ainsi fortement souffert de la désindustrialisation française, synonyme de recul des produits fabriqués en France. À contrario, la volonté politique en faveur de la réindustrialisation exprimée ces dernières années constitue une opportunité pour la filière. À noter, certaines pâtes à papier sont également produites pour des usages non papetiers (viscose pour un usage textile, cellulose de haute pureté pour des applications dans des secteurs très variés, tels que les explosifs, les cosmétiques, etc.).

Enfin, plus en aval, la **récupération et le tri des papiers et cartons à recycler** (PCR) sont assurés le plus souvent par de grands groupes indépendants des groupes papetiers. Il s'agit de groupes multinationaux (Véolia, Suez, Paprec) ou d'entreprises régionales de taille intermédiaire (ex. : groupes Pizzorno ou Nicolin). L'activité peut également faire intervenir des structures de l'économie sociale et solidaire.



Circularité

La production de papiers et cartons est une industrie qui a toujours été étroitement associée à des filières de récupération, les chiffons autrefois puis les papiers et cartons usagés. L'essentiel (70 %) des papiers et cartons à recycler (PCR) sont récupérés directement auprès des industriels, des entreprises et des enseignes de grande distribution (chutes de transformation, emballages industriels et commerciaux, journaux invendus, produits de bureaux...), ce qui limite leur souillure et permet souvent un pré-tri. Le reste (30 % en France) est collecté auprès des ménages (vieux journaux, emballages ménagers...) au travers du service public de gestion des déchets.

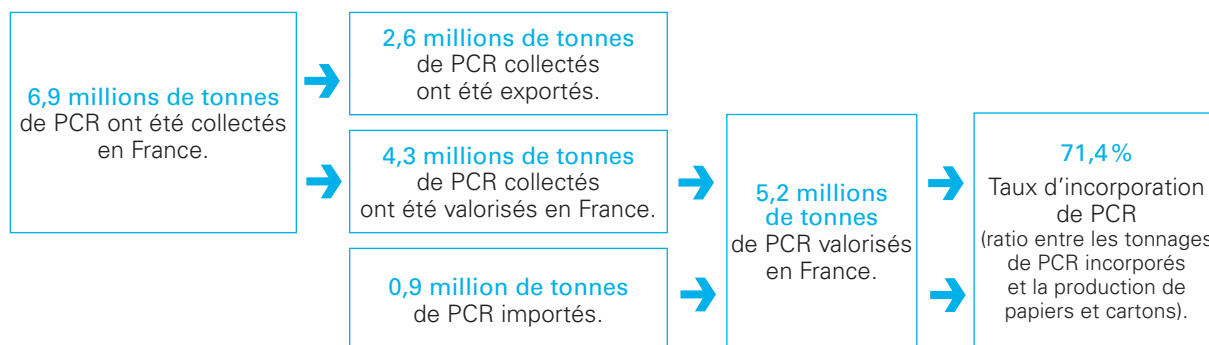
Les déchets de papier/carton n'ont de valeur significative que s'ils sont regroupés en lots bien triés. En effet, le cloisonnement de la filière par type de produits (papier et carton d'emballage, papier d'hygiène, etc.) s'applique au recyclage des PCR en raison de contraintes techniques : les déchets de papiers-cartons d'emballage seront valorisés avant tout vers la production de papier et carton d'emballage, idem pour le papier graphique, etc. Seuls les déchets de qualité supérieure (chutes d'imprimerie, papiers de bureau, etc.) peuvent être facilement introduits dans plusieurs types de productions.

Une fois triés, les PCR sont vendus aux fabricants de papier et réintroduits au début du cycle ou pour d'autres débouchés (ex. : isolation de bâtiments). Les produits usagés non recyclés, notamment en raison d'une qualité insuffisante (issus de la collecte non séparée pour la plupart) sont orientés vers la valorisation énergétique et l'enfouissement.

Focus : les objectifs de circularité assignés à la filière papier-carton

L'industrie papier-carton est concernée par deux filières Responsabilité Élargie du Producteur (REP) – emballages ménagers (créée en 1993) et papier graphique (créée en 2006) – pilotées par l'éco-organisme CITEO. Elles engagent les metteurs en marché de produits emballés et de papiers graphiques à financer la gestion de la fin de vie des emballages et papiers. La REP emballages ménagers (tous types d'emballages confondus) a pour objectif d'atteindre un taux de recyclage à l'horizon 2025 (ce taux atteint 72 % en 2021), tandis que la REP papier graphique vise 65 % des papiers des ménages et assimilés recyclés en 2022 (ce taux atteint 62 % en 2021). À noter, la filière REP des emballages ménagers sera étendue à l'ensemble des emballages professionnels au 1^{er} janvier 2025.

Chiffres clés du recyclage des papiers et cartons en France en 2021



Source : Copacel, Confederation of European Paper Industries

La filière papier-carton française affiche des performances élevées en matière de circularité. La collecte et le recyclage des PCR se sont développés en France à un niveau très supérieur à la moyenne européenne. Relativement stable depuis 2015, le gisement de papiers et cartons usagés est estimé à 8,5 Mt par an. Le taux de récupération du gisement de déchets se situe en 2019 à 79 % contre 72 % à l'échelle de l'UE. Il en est de même concernant le taux d'incorporation de PCR dans la production nationale (ratio entre les tonnages de PCR incorporés et la production de papiers et cartons) : il est passé de 60 % en 2011 à 71,4 % en 2021 (contre en 56 % en moyenne en Europe, mais 80 % en Espagne et 78 % en Allemagne). Notons qu'une partie (17 %) des PCR incorporés dans la production nationale est importée.

Mais la collecte et le tri ont encore des marges de progrès. Les papiers à recycler «supérieurs» sont très appréciés pour les différentes productions (hygiène, emballage, papier graphique) en raison de leurs fibres longues qui apportent résistance et qualité. Or, si les professionnels ont l'obligation depuis juillet 2016 de trier 5 types de déchets dont le papier/carton, la collecte des papiers graphiques de bureau dans les petites entreprises, bureaux, petits commerces et certaines administrations est insuffisante. Selon l'ADEME, le papier graphique représente 75 % des déchets des bureaux, mais seulement 20 % des papiers sont recyclés, contre 41 % pour les ménages.

De même, la qualité du tri des papiers à recycler est jugée insuffisante. Les contrôles effectués par CITEO en 2019 montrent que seuls 25 % des centres de tri des déchets ménagers respectent les standards de qualité pour les papiers graphiques et les papiers cartons mêlés. Nombre de papetiers se plaignent des productions des centres de tri et sont parfois contraints de faire des traitements supplémentaires pour éliminer les indésirables, ce qui entraîne des coûts supplémentaires. Le manque de réactivité des centres de tri pour s'adapter à l'évolution des besoins des papetiers est également souligné. Le caractère notoire de la faible qualité de certaines sortes de PCR pourrait freiner les investissements des industriels pour en augmenter l'incorporation.

De, plus la collecte de papiers et cartons à recycler (PCR) est nettement excédentaire par rapport aux capacités de production de la filière. Seuls 62 % des PCR collectés sont recyclés en France, le reste étant exporté (soit environ 2,6 millions de tonnes en 2021), principalement vers l'Espagne. Le volume de papiers et cartons incorporés reste relativement stable ces dernières années, reflétant le lent déclin de la filière. La gestion de cet excédent est source de tension croissante dans la mesure où certains exutoires étrangers se réduisent (plusieurs pays asiatiques ont fermé leurs frontières à l'importation de papiers et cartons usagés ces dernières années). En revanche, cet excédent peut être considéré comme un atout à l'avenir pour la consolidation des filières de recyclage, puisqu'il sécurise les approvisionnements de proximité nécessaires aux industriels et pourrait être utilisé pour de nouvelles capacités de production papetière. À cet égard, la Stratégie nationale «Recyclabilité, recyclage et incorporation de matériaux» présentée en septembre 2021 ambitionne de réduire de 25 % puis de 50 % en 2030 l'excédent de quantités de PCR en développant de nouveaux débouchés papetiers et non papetiers (voir innovation).

L'augmentation du taux d'incorporation de PCR bute sur plusieurs freins. D'une manière générale, la fibre de cellulose se dégradant au fur et à mesure de ses réutilisations successives, un apport en fibres neuves est indispensable ; il est donc impossible de parvenir à un taux d'incorporation de 100 %. Par ailleurs, non seulement chaque type

de PCR doit être utilisé préférentiellement ou exclusivement pour la production d'un ou quelques types de papier/carton, mais les possibilités d'incorporation dépendent des contraintes techniques de chaque famille de produits. Elles sont élevées pour l'emballage et le conditionnement ou pour les supports graphiques pour journaux et imprimés publicitaires, qui présentent des taux d'incorporation supérieurs à 90%. Elle est en revanche plus réduite pour les papiers d'hygiène (34%) dont la fabrication nécessite des fibres de qualité supérieure associant douceur, résistance et capacité d'absorption. Le taux d'incorporation est faible pour les autres papiers graphiques, notamment à usages bureautiques (10 à 15% seulement). Pour certains papiers techniques, les caractéristiques recherchées excluent l'usage de PCR. Cela explique que certains types de PCR peuvent ne pas être valorisables par les usines présentes localement et que les PCR de qualité puissent parcourir de plus longues distances pour une intégration dans des produits qui le justifient plus. Cela explique également que l'augmentation du taux d'incorporation dépend significativement de l'évolution de l'appareil productif et des choix de procédés de production qui l'orientent.

Les attentes du consommateur en France en termes de blancheur des papiers graphiques pour la bureautique et l'édition, et des papiers d'hygiène constituent un autre frein à l'augmentation du taux d'incorporation de PCR. En effet, les PCR blancs sont en faible quantité dans les déchets collectés et les opérations de désencrage, outre leur coût, ont une portée nécessairement limitée. Les normes de contact alimentaire, en particulier pour les cartons, ou les standards relatifs aux papiers d'hygiène constituent également un frein à une incorporation accrue des PCR. Toutefois, la suppression des huiles minérales prévue de façon progressive entre 2022 et 2025 par la loi AGEC devrait permettre d'accroître les possibilités de recyclage.

Enfin, un autre frein concerne les incertitudes sur le bien-fondé environnemental de l'augmentation du taux d'incorporation de PCR au détriment de l'usage de fibres de bois vierge. En effet, si le procédé de fabrication de pâte à partir de PCR consomme approximativement de deux à trois fois moins d'énergie que le processus à partir de bois (absence de hachage, de cuisson du bois), le procédé à partir de bois permet de produire de l'énergie lorsque les sous-produits (écorces, lignine et hémicelluloses récupérées dans les liqueurs de cuisson) sont incinérés. Les usines intégrées (produisant de la pâte issue de fibres vierges et du papier) valorisent cet excédent pour les étapes ultérieures du processus industriel.

Compte tenu de ces contraintes, l'augmentation des obligations d'incorporation de PCR et/ou d'usage préférentiel de produits en papier recyclé pourrait avoir des effets pervers en déstabilisant une production nationale déjà fragile et en entraînant une augmentation des importations de produits en papier recyclé, avec des distances de transport et des sources d'énergie présentant un bilan moins vertueux que du papier produit en France à base de fibre de bois.



Décarbonation

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'industrie papetière représentent 2 MtO₂e en 2019, soit 2,3% des émissions liées à l'activité industrielle sur le territoire national. La quasi-totalité des émissions sont de nature énergétique. En effet, la production de papier requiert d'importantes quantités d'énergie, sous forme de chaleur principalement (en particulier lors de l'étape de cuisson de la pâte et de séchage des feuilles) mais également d'électricité (pour le fonctionnement des machines : réduction du bois en copeaux, agitation et transport des matières tout au long du process).

Les émissions de la filière ont fortement reculé au cours des dernières décennies, passant de 4,3 MtCO₂e en 2005 à 2 MtCO₂e en 2019, soit une réduction de 54%. Cette baisse résulte de la diminution de l'intensité carbone de la production (-35%) permise par la décarbonation de la production de chaleur consommée par les sites papetiers avec l'utilisation de biomasse en substitution au gaz : la part de la chaleur décarbonée dans le mix énergétique est ainsi passée de 49,2% en 2005, à 62,5% en 2019. Le recul des émissions de l'industrie papetière reflète également la baisse des volumes produits (réduction de capacités de production).

Comme l'ensemble de l'industrie, l'activité papetière est appelée à réduire ses émissions de 35% en 2030 par rapport à 2015 et de 81% à l'horizon 2050, conformément aux objectifs de la Stratégie National Bas Carbone adoptée en 2020. La Feuille de route de décarbonation de l'industrie papetière (hors activités de transformation des papiers et cartons) identifie un potentiel de réduction de 39% en 2030, tout en tablant sur une croissance de la production de papiers et cartons de 1,8% par an en France (en sachant que la production de papier graphique continuerait de reculer tandis que les papiers d'emballage, d'hygiène et spéciaux connaîtraient une nette augmentation). Les deux principaux leviers actionnés pour atteindre cet objectif sont :

- **Le développement de la production de chaleur décarbonée** (chaudière ou cogénération biomasse, chaudière à base de combustibles solides de récupération, valorisation du biogaz en autoconsommation). S'agissant de la fabrication de pâte à papier à base de fibres de bois, une large partie des besoins énergétiques des installations peut être fournie par l'incinération des déchets de bois et autres issus des procédés, en recourant à des unités de cogénération (consistant à produire de l'électricité et à récupérer la chaleur fatale). De la sorte, les usines intégrées (produisant de la pâte issue de fibres vierges et du papier) peuvent devenir autosuffisantes à 90 voire 95%. Dès lors, les émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile sont très réduites. En France, sur les dix usines de fabrication de pâte vierge, six sont intégrées. La feuille de route prévoit ainsi le développement d'installations de cogénération « biomasse » sur 3 à 5 sites papetiers sur la période 2022-2030.
- **L'amélioration de l'efficacité énergétique** liée aux actions d'amélioration continue et de valorisation de la chaleur fatale issue des procédés. Plusieurs projets d'investissement ont été lauréats des appels à projets « énergétique » du plan de relance.

La réalisation de cette trajectoire nécessite des investissements de l'ordre de 800 millions d'euros sur la période 2022-2030, ce qui soulève un besoin de soutien financier de la part des pouvoirs publics afin de permettre à la filière d'opérer sa décarbonation tout en restant compétitive, dans un contexte de forte concurrence internationale.



Substituabilité

La volonté du législateur de réduire l'usage de plastiques à usage unique constitue une opportunité forte pour la filière papier-carton qui développe des substituts dans différents domaines d'application : emballages agroalimentaires, barquettes pour les repas à emporter, vaisselle « jetable », emballages de luxe, éléments de calage moulés dans les emballages, etc.



Innovations

L'un des principaux enjeux d'innovation pour la filière concerne le développement des usages du papier-carton pour saisir les opportunités de la fin des produits plastiques à usage unique et du développement du e-commerce, tout en résorbant l'excédent de papiers et cartons à recycler (PCR) collectés. La Stratégie nationale « Recyclabilité, recyclage et incorporation de matériaux » vise en particulier à accroître la recyclabilité des PCR – à travers l'éco-conception, le développement d'alternatives aux encres minérales et de procédés de désencrage des PCR – et à développer les solutions technologiques permettant d'intégrer les PCR dans de nouvelles applications.

La plupart des nouvelles utilisations alimentaires nécessitent de donner au papier de nouvelles fonctionnalités « barrières » aux fluides – gaz, eau, graisses et huiles, contaminants chimiques et biologiques, etc. – lesquelles constituent le principal verrou technologique. Des travaux de recherche sont en cours partout dans le monde, notamment dans les laboratoires des grandes entreprises. Pour ce faire, la France peut s'appuyer notamment sur l'expertise du Centre Technique du Papier (CTP) et le soutien de l'éco-organisme CITEO. On peut citer notamment les projets de R&D suivants :

- CILKOA : lauréate d'un appel à projet de CITEO, cette start-up développe un procédé qui confère au papier et au carton des propriétés barrières à la vapeur d'eau et à l'oxygène, ainsi qu'une résistance à l'eau tout en préservant la recyclabilité du matériau.

- Le CTP et CITEO développent un gobelet qui intègre seulement 3% de plastique pour souder les parois et le fond du gobelet. L'imperméabilité de l'emballage est obtenue par la chromatogénie, une technique qui consiste à greffer une molécule d'acide gras sur une petite partie des molécules de cellulose qui constituent les fibres du papier-carton. Recyclable dans la filière des papiers-cartons, cette solution est en cours de certification pour l'aptitude au contact alimentaire.
- MC2 : lancé en 2021 le projet mené par le CTP, CITEO et huit partenaires industriels, le projet vise développer et valider des barquettes en cellulose moulée monomatériau et barrière à l'eau, aux graisses et aux gaz. Les marchés visés concernent la restauration rapide et la restauration collective.

Toutefois l'investissement national en faveur de la recherche-développement reste modeste en raison de l'absence de grand groupe industriel français, le tissu économique étant essentiellement constitué de PME et de quelques ETI aux moyens humains et financiers insuffisants. Une étude souligne la nécessité de renforcer le rôle du CTP, des universités et des éco-organismes pour renforcer les programmes de recherche et de développement appliqués, et d'amplifier la synergie entre ces acteurs et les PME.

L'amélioration des procédés de tri des déchets ménagers fait également l'objet de nombreux projets d'innovation. Citons notamment l'expérimentation « Citi'Tri » développée par Simpliciti et Lixo et soutenue par CITEO : il s'agit d'un camion de collecte équipé d'une caméra et d'un logiciel d'identification des emballages et des papiers afin de mesurer la qualité du tri des habitants dès la collecte grâce à l'intelligence artificielle (détection des taux d'erreurs par quartier). De son côté, le projet Triscell, porté par Pellenc ST et le CTP avec le soutien de CITEO, vise l'amélioration du tri des emballages en papier-carton et papiers graphiques dans les centres de tri au moyen d'algorithmes basés sur des technologies de spectroscopie infrarouge.



Territoire

Auvergne-Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte-d'Azur représentent 13% de la production nationale de papiers et cartons en 2021, soit près d'un million de tonnes. L'industrie papetière est significativement présente en Auvergne-Rhône-Alpes avec une dizaine d'usines sur les 82 existantes en France. Certaines d'entre elles sont engagées dans des projets de modernisation et décarbonation des process de production.

- **Fabrication de pâte à papier** : sur les dix usines présentes en France, la seule implantée en Auvergne-Rhône-Alpes est celle de **La Rochette Cartonboard SAS** à La Rochette (Savoie) qui fête ses 150 ans en 2023. Il s'agit d'une usine intégrée fabriquant de la pâte à papier à partir de procédés mécaniques et de fibre de bois, ainsi que des cartons de boîtes pliantes pour l'industrie alimentaire (emballage pour les aliments secs, les aliments congelés, les aliments humides ou gras, etc.), l'industrie pharmaceutique (conditionnement de pilules médicales, pommades, etc.), l'emballage général (parfumerie, cosmétiques, soins corporels, jouets, vêtements). Le site compte 300 salariés et 2 machines à papier pour une production de 150 000 tonnes et un chiffre d'affaires de 160 millions d'euros par an. Engagée dans le développement de produits en papier pouvant se substituer aux emballages plastique, l'entreprise a réalisé un investissement important ces dernières années dans une centrale de cogénération à partir de biomasse.
- **Fabrication de papier graphique** : la région compte trois usines.
 - Présente à Vizille (Isère) depuis 400 ans et faisant partie du groupe Vicat, les **Papeteries de Vizille** utilisent des procédés de fabrication à partir de pâte de bois et sont spécialisées dans la production, d'une part, de papiers techniques pour les marchés de l'édition, de l'emballage alimentaire, du luxe, de la sécurité et de l'industrie, et d'autre part, de sacs en papier kraft de grande et moyenne contenance (destinés aux marchés industriels tels que la construction (ciments, enduits, plâtres, pré-mix,...), la chimie, les minéraux, les semences, l'alimentation humaine (sucres, farines, pommes de terre, ...) et l'alimentation animale. L'entreprise autoproduit une partie de son électricité par des turbines hydrauliques et investit dans l'installation d'une nouvelle chaufferie biomasse en remplacement d'une chaufferie fioul.

- Héritière elle aussi d'une histoire pluriséculaire, l'usine **Canson** d'Annonay est passée sous pavillon italien en 2016. Utilisant de la pâte à papier issue de fibre de bois, l'entreprise est spécialisée dans la fabrication de papiers destinés aux beaux-arts (peintures aquarelle, acrylique, à l'huile, etc.), à l'éducation (papier à dessin, cahiers et blocs de papier, etc.), aux loisirs créatifs et à la photographie.
- Implantée à Vic le Comte (Puy-de-Dôme), l'usine **Europafi** est quant à elle la filiale papetière de la Banque de France. Son activité s'articule avec l'imprimerie de Chamalières. Ce modèle de production intégré est unique parmi les banques centrales de l'Union européenne. La Banque de France a décidé en 2015 de créer un pôle public papetier au sein de l'Eurosystème en faisant d'Europafi la papeterie fiduciaire la plus moderne d'Europe et le principal fournisseur de papier fiduciaire de la zone euro.
- **Fabrication de papier d'hygiène** : trois usines sont présentes en région Auvergne-Rhône-Alpes.
 - **Fregata Hygiène** (Charavines, Isère) a démarré son activité en 2020 sur le site de la papeterie d'Arjowiggins qui avait fermé ses portes en 2015). Fregata a dû détruire le bâtiment où se trouvait la machine à papier avant d'en reconstruire un pour accueillir la nouvelle machine destinée à la fabrication de feuille de ouate de cellulose.
 - L'entreprise **MP Hygiène** est quant à elle spécialisée dans l'hygiène des mains en milieu professionnel. Elle a investi dans la création d'une papeterie en 2012 à Annonay (Ardèche) utilisant des fibres recyclées. L'entreprise dispose également de lignes de transformation sur le même site ainsi qu'à Davézieux où se trouve son siège.
 - L'entreprise italienne **Sofidel** (propriétaire notamment des marques Sopalín ou Le Trèfle) dispose de trois sites de production en France dont l'un est localisé à Roanne. Celui-ci comprend la fabrication de papier d'hygiène ainsi que la transformation en rouleau de papier toilette et essuie-tout.
- **Fabrication de papiers et cartons d'emballage** : la région Auvergne-Rhône-Alpes compte deux usines.
 - Le groupe espagnol **Saica** dispose d'une usine à Laveyron (Drôme) après avoir repris le groupe français Emin-Leydier en 2018. Valorisant des fibres recyclées, le site est actuellement le plus important fabricant français de papier pour carton ondulé, avec près de 21% de la production nationale. Depuis son rachat, Saica a engagé près de 120 millions d'euros d'investissements pour moderniser et renforcer la capacité de production du site, dont 75 millions pour la construction d'une centrale biomasse en substitution d'une chaufferie fossile.
 - Dans le Puy-de-Dôme, **Papeteries de Giroux** fabrique 30 000 tonnes de papier pour l'emballage chaque année à partir de carton recyclé. Le site fait partie du groupe Rossmann, principal producteur indépendant français d'emballage en carton ondulé.

Focus : le Centre Technique du Papier (CTP) de Grenoble

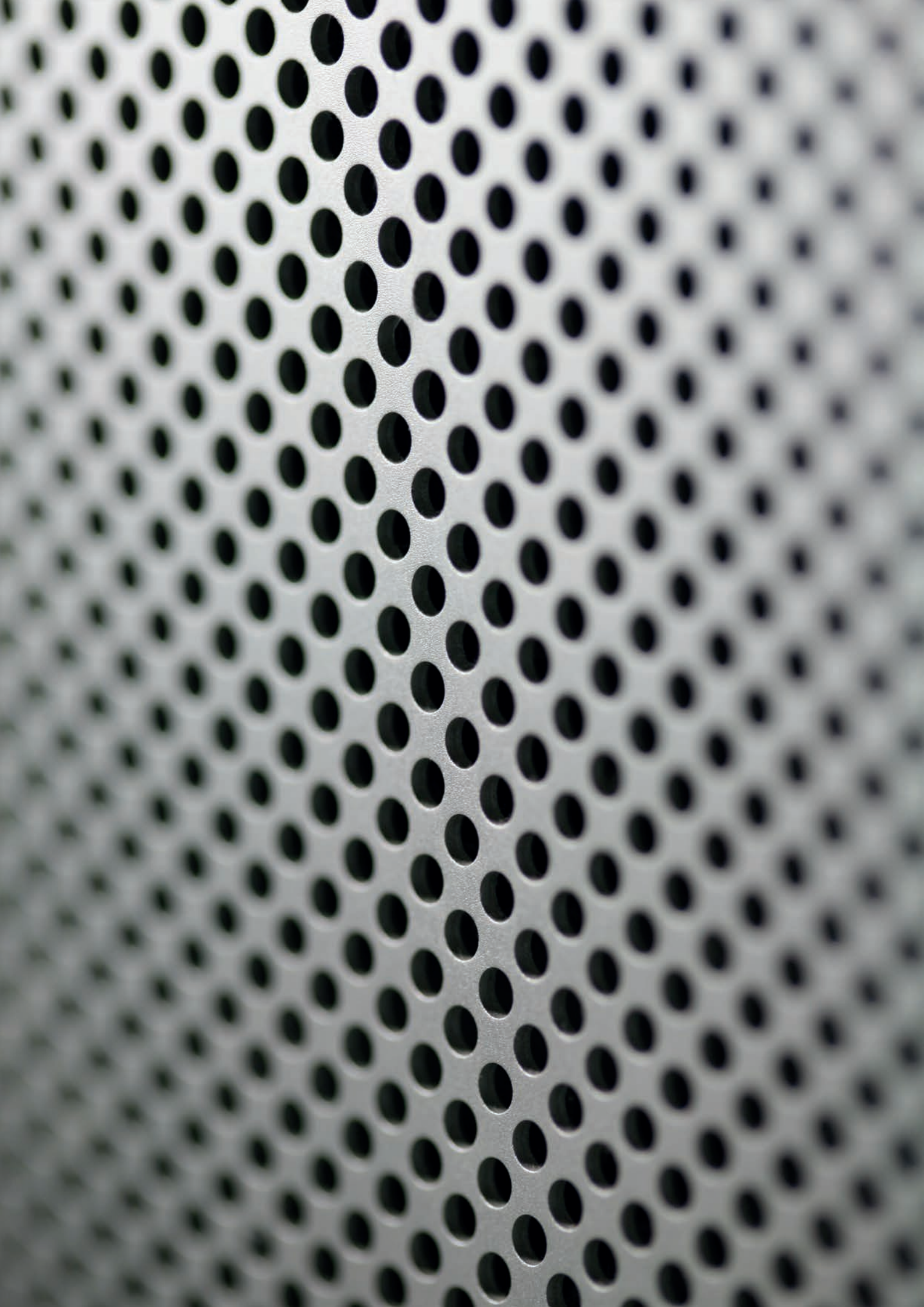
La région Auvergne-Rhône-Alpes peut compter sur la présence du CTP, organisme de recherche et développement industriel, d'expertise et d'information installé sur le domaine universitaire de Grenoble. Comptant environ 120 collaborateurs, il a pour mission de promouvoir le développement technologique de l'industrie de production et de transformation des pâtes, papiers et cartons et les industries connexes (impression, transformation...).

Le CTP est le partenaire « innovation » des industriels pour leurs produits et procédés à travers les essais laboratoires, les pilotes, puis le transfert industriel. Il participe aux innovations dans de nombreux domaines : chimie des lignocelluloses, matériaux biosourcés, applications à l'hygiène et à la santé, emballage du futur, électronique imprimée et papier intelligent, valorisation des papiers et cartons récupérés, économies d'eau et d'énergie, communication imprimée, performances industrielles. Faisant partie de plusieurs pôles de compétitivité (Techtera, Xylofutur, etc.), il est un des piliers de l'Institut Carnot POLYNAT de Gières (Isère), spécialisé en éco-conception de matériaux biosourcés performants et innovants. Le CTP intervient également sur de nombreuses plateformes industrielles : InTechFibres, Malics, Imprim'Lab, etc.

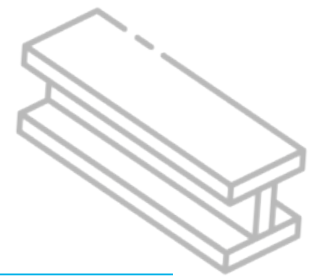
Le CTP et CITEO ont signé, fin novembre 2022, un nouveau partenariat de recherche pour six ans afin d'accélérer l'industrialisation de solutions alternatives aux emballages plastiques.

Principales sources utilisées

- ADEME, Devauze Chloé, Koite Alima, Chrétien Anaëlle, Monier Véronique (2021), *Bilan National du Recyclage 2010-2019 - Évolutions du recyclage en France de différents matériaux : métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois.*
- ADEME (2017), *Au quotidien - éco-responsables au bureau – actions efficaces et bonnes résolutions.*
- CITEO (2022), *Produire, distribuer et consommer en préservant la planète*, Rapport d'activité 2021-2022.
- CITEO (2022), *Circular Challenge : Citeo dévoile les lauréats de la promotion 2023 de son accélérateur à impact.*
- Confederation of European Paper Industries (2022), *European pulp & paper industry, Key Statistics 2021.*
- Conseil général de l'environnement et du développement durable, Conseil général de l'économie, Contrôle général économique et financier (2021), *Mission relative à l'évaluation de la situation et au soutien de la filière papier/carton*, Janvier 2021
- COPACEL (2021), *Rapport statistique 2021 de l'industrie papetière française*, dossier de presse, septembre 2021
- État, Conseil national de l'industrie et COPACEL (2022), *La Feuille de route de décarbonation de l'industrie papetière*, février 2022.
- Gouvernement (2021), *Stratégie nationale « Recyclabilité, recyclage et incorporation de matériaux ».*
- Institut National de l'Économie Circulaire (2022), *La filière forêt-bois au prisme de l'économie circulaire*, mars 2022.
- <https://www.copacel.fr/industrie-papetiere/>
- <http://www.lepapier.fr/fabrication.htm>
- <https://www.webctp.com/>



FILIÈRE MÉTALLURGIE



En résumé – Assurant la transformation des minerais de métaux en matériaux, la métallurgie joue un rôle stratégique en amont de nombreuses industries. Si la production nationale est en recul ces dernières décennies, la France affiche une balance extérieure positive grâce à la sidérurgie (acier), qui ne doit cependant pas masquer un déficit pour la plupart des autres familles de métaux. Levier central pour répondre aux enjeux de souveraineté économique et de décarbonation de la filière, le recyclage des métaux bute sur l'exportation de la majeure partie des déchets collectés en France.

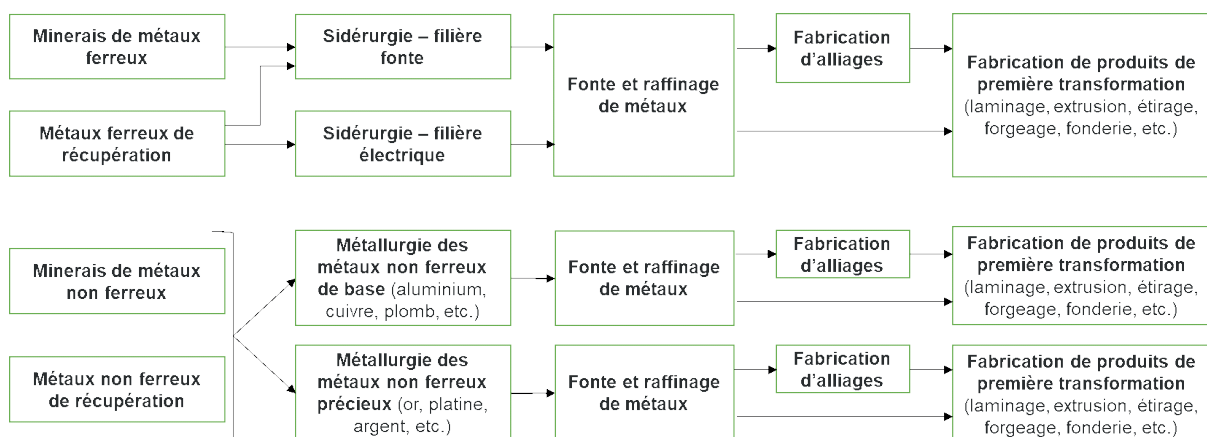


Organisation de la filière

La métallurgie comprend l'ensemble des activités de transformation des minerais de métaux et de fabrication de matériaux métalliques. On distingue plusieurs étapes :

- La fonte et le raffinage de métaux à partir de minerais ou de métaux de récupération ;
- La fabrication d'alliages et de superalliages de métaux en intégrant d'autres éléments chimiques aux métaux purs afin de leur conférer des caractéristiques précises ;
- La mise en forme de produits bruts et semi-bruts. Le résultat de la fonte et du raffinage, généralement sous forme de lingots, est utilisé dans les opérations de laminage (écrasement du métal entre des rouleaux afin de l'allonger et lui donner soit une forme plate soit profilée), étirage, extrusion (tirage de la matière à travers un trou qui va donner la forme de la section), estampage (frappe du métal pour lui faire prendre la forme d'un moule), tréfilage (réduction de la section d'un fil en métal par traction mécanique), fonderie (procédé de formage consistant à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire une forme donnée), pour fabriquer des plaques, des feuilles, des bandes, des barres, des tiges, du fil ou des tubes, tuyaux, profilés creux, etc.

Schéma simplifié de la filière métallurgie



Source : Insee, Nomenclature d'activités françaises, IUMM, Observatoire de la métallurgie.

L'industrie de la métallurgie s'est organisée en trois spécialités principales :

- La **sidérurgie** : elle regroupe les activités de réduction directe du minerai de fer, production de fontes, conversion de fontes brutes en acier, fabrication de ferroalliages de produits en acier. La sidérurgie s'organise en deux filières distinctes.
 - La filière fonte (ou « hauts-fourneaux » ou « intégrée ») produit de l'acier à partir du minerai de fer et de coke de charbon : en brûlant dans le haut fourneau, le coke apporte la chaleur nécessaire à la fusion du minerai de fer ainsi que le carbone nécessaire à sa réduction ; la fonte sortant du haut-fourneau passe dans un convertisseur à oxygène afin de baisser la teneur en carbone et ainsi produire de l'acier liquide.
 - La filière à arc électrique (ou « aciéries électriques ») repose sur la récupération d'acier usagés (ferrailles) qui sont fondus dans des fours électriques pour produire de l'acier liquide.
- La métallurgie des métaux non ferreux de base (aluminium, cuivre, plomb, zinc, étain, nickel, etc.). On distingue différentes filières de transformation pour les principaux métaux ;
- La métallurgie des métaux non ferreux précieux (or, platine, argent, etc.).

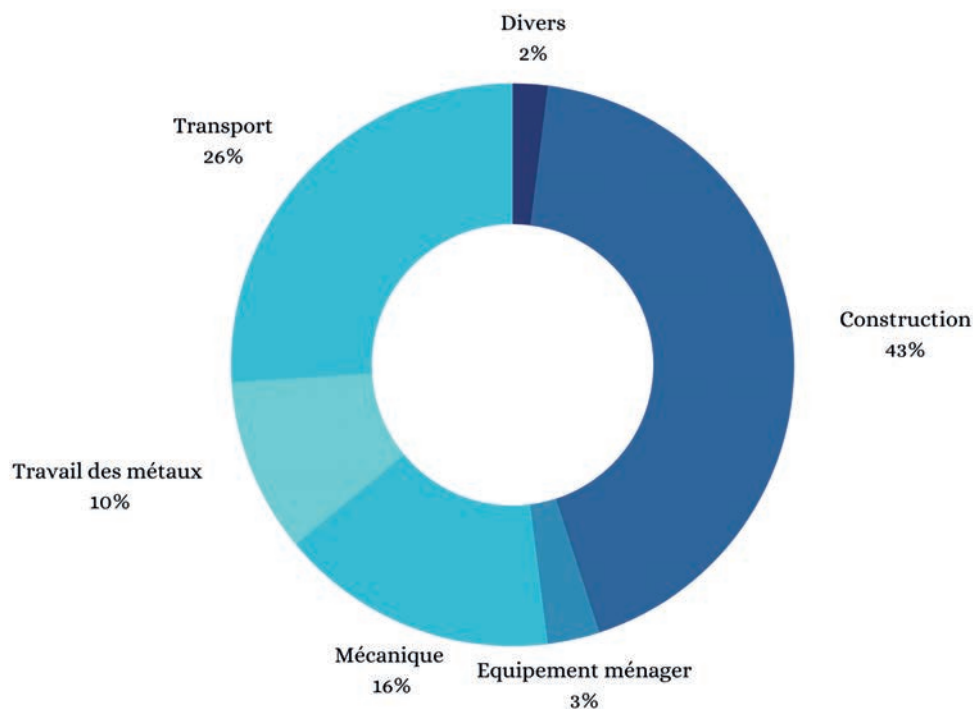


Dynamique économique

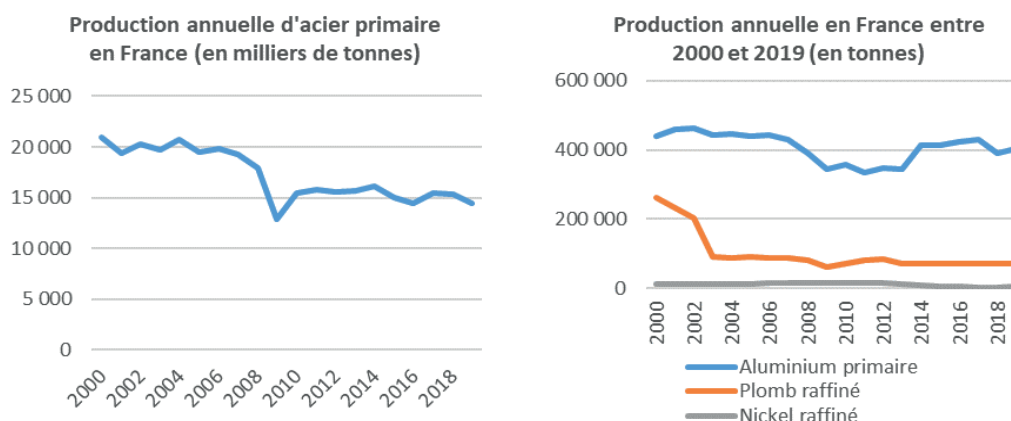
Sous leur forme primaire, la consommation d'acier est estimée à 14,5 millions de tonnes en 2021, celle d'aluminium à 452 000 tonnes en 2021, celle de cuivre à 172 400 tonnes en 2020. Les données font défaut pour analyser l'évolution de la consommation nationale de produits métallurgiques, qui dépend en large partie de l'activité des secteurs consommateurs aval. En France, la construction et le transport (automobile, aéronautique et ferroviaire principalement) représentent près des $\frac{3}{4}$ des débouchés de la production de métaux en France. Toutefois, celle-ci est également largement tournée vers l'export.

Répartition de la consommation de métaux par secteur en France

Source : A3M



Évolution de la production métallurgique française est la suivante pour les métaux de base depuis 2000



Source : World Steel Association, British Geological Survey

- **Acier primaire** : la production connaît une chute importante suite à la crise de 2008 (fermeture des aciéries de Gandrange en 2009 et Florange en 2012) et se maintient depuis autour de 15 millions de tonnes en 2021 (contre 40 Mt. en Allemagne et 24 Mt. en Italie). En vingt ans, la France est passée du 9^e au 18^e rang mondial. Par ailleurs, la production de ferroalliages se maintient autour de 300 000 tonnes par an ces dernières années. La France se caractérise par une spécialisation sur les aciers plats inox et sur les aciers spéciaux à haute valeur ajoutée à destination d'industries de pointe (aéronautique, automobile, pétrole, nucléaire...).
- **Aluminium primaire** : la production connaît elle aussi un trou d'air suite à la crise de 2008, mais remonte au-dessus de 400 000 tonnes par an ces dernières années (au 4^e rang européen derrière la Norvège, l'Islande et l'Allemagne). La France compte également une forte industrie de transformation, avec des dizaines d'usines de première transformation implantées sur le territoire.
- **Cuivre raffiné** : La France est absente de la production primaire de cuivre depuis la fin des années 1990. Par contre, elle possède une importante industrie de transformation (fabrication de barres, profilés, tubes, laminés, fabrication de fils et câbles).
- **Plomb raffiné** : après avoir connu une forte chute au début des années 2000 suite à la fermeture de la fonderie Métaeurop Nord, la production se maintient autour de 700 000 tonnes par an ces dernières années.
- **Nickel raffiné** : inférieure à 7 000 tonnes aujourd'hui, la production a quasiment été divisée par deux depuis 2013.

En valeur, sur la même période (2000-2019), la production de la filière métallurgie recule de 20%, en particulier suite à la crise de 2008, et s'établit à 31 milliards d'euros ces dernières années.

À l'avenir, plusieurs tendances devraient impacter les consommations de métaux.

Concernant la construction, plusieurs scénarios prospectifs (SNBC, Transition(s) 2050) tablent sur une réduction plus ou moins marquée du rythme de construction de logements et de locaux non-résidentiels d'ici 2050 ainsi que sur une substitution partielle des matériaux fortement carbonés (béton et métaux) par des matériaux biosourcés, géosourcés ou recyclés, ce qui devrait tirer vers le bas la demande de métaux du secteur.

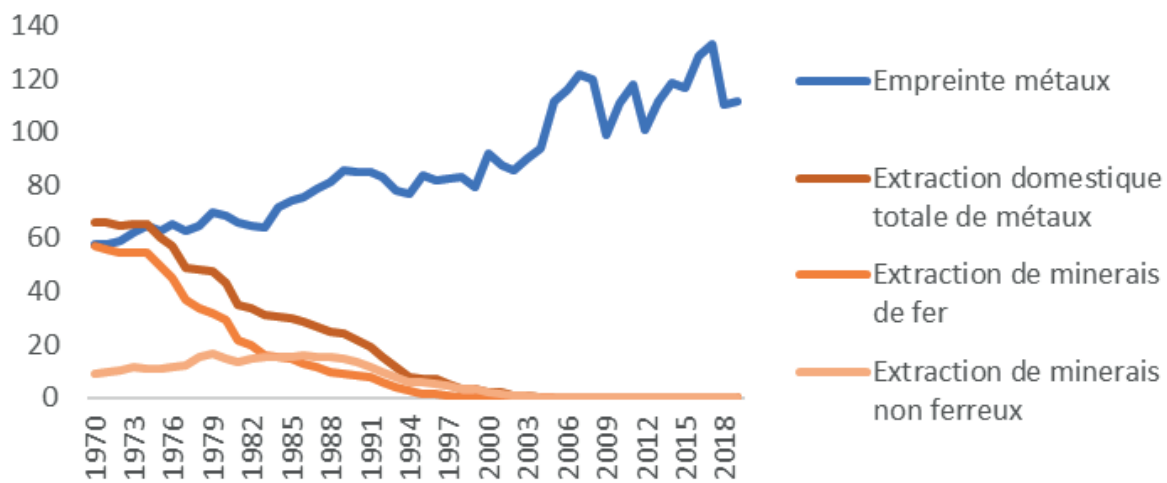
Dans le champ des transports, le renouvellement du parc de véhicules induit par son électrification constitue un puissant moteur de consommation de métaux de base et de spécialité, en sachant que les véhicules électriques nécessitent moins d'acier et d'aluminium mais beaucoup plus de cuivre que les véhicules thermiques. De même, le développement des réseaux de transport en commun et ferroviaires devraient alimenter le besoin en métaux. Enfin, le déploiement des énergies renouvelables (éolien et photovoltaïque en particulier) et la numérisation croissante des biens et des services devraient soutenir également cette tendance.



Dépendance/vulnérabilité

En amont de la production métallurgique, se pose la question la matière première, à savoir les minerais métalliques. Comment évolue la consommation de la France et dans quelle mesure dépend-elle de l'extraction nationale ou des importations ? L'approche la plus exhaustive pour répondre à cette question est celle de l'empreinte matières, qui consiste à prendre en compte l'extraction domestique de métaux ainsi que les métaux mobilisés par les importations (à savoir non seulement les métaux incorporés aux produits importés mais également ceux utilisés en amont de la chaîne de production mais non incorporés : par exemple, selon l'ADEME, un lave-linge pesant 79 kg a mobilisé en réalité 2,1 tonnes de matières au total) et à soustraire les métaux contenus par les exportations. De ce point de vue, la consommation de métaux de la France a été multipliée par deux depuis 1970, avec un pic en 2017 (133 millions de tonnes).

Empreinte métaux et extraction de métaux de la France entre 1970 et 2019 (en millions de tonnes)

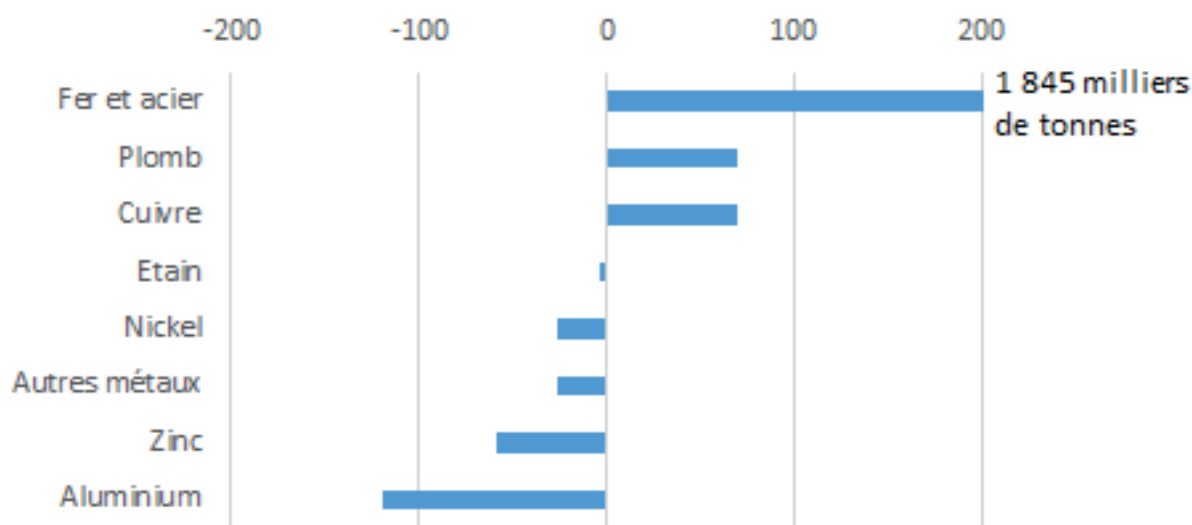


Source : International Resource Panel, Global Material Flows Database

La dépendance de la France peut s'apprécier en comparant l'évolution de l'empreinte métaux à l'extraction domestique de métaux. Or, on constate que jusqu'au milieu des années 1970, l'empreinte et l'extraction font jeu égal, avant que cette dernière ne recule fortement pour devenir marginale depuis les années 2000 : l'extraction de fer s'arrête en 2003 et l'extraction de métaux non ferreux s'établit à 62 000 tonnes en 2019. La dépendance de la France aux métaux importés apparaît ainsi quasi-totale. Face à ce constat, le comité stratégique de filière (CSF) « Mines et Métallurgie » a fait de la sécurisation des approvisionnements un enjeu stratégique du contrat de filière pour les années à venir. Le recyclage des métaux de base occupe d'ores et déjà une place non négligeable dans l'approvisionnement de la filière métallurgie (voir circularité).

S'agissant des échanges extérieurs de produits métallurgiques hors métaux précieux (métaux bruts et ouvrages laminés, étirés, tréfilés, etc.), la France est exportatrice nette de fer et d'acier (dont les flux donnent largement), plomb et cuivre. Elle est en revanche déficitaire sur les autres métaux. D'une manière générale, la France et l'Europe pèse peu dans la production mondiale de métaux primaires. Les capacités de raffinage des métaux (de base et de spécialité) sont aujourd'hui largement dominées par la Chine : 53 % de la production mondiale d'acier, 57% pour l'aluminium, 35% pour le cuivre, 29% pour le nickel, 46% pour le plomb, 47% pour le zinc, etc.

Solde des échanges extérieurs de produits métallurgiques de la France en 2021 (en milliers de tonnes)



Source : Douanes

Toutefois, ces constats ne reflètent que partiellement la situation de dépendance de la France à l'égard de la production étrangère de minerais et produits métallurgiques. En effet, la consommation de métaux de la France ne se réduit pas aux produits métallurgiques, mais recouvre également les produits incorporant des métaux importés par les secteurs aval pour leur production (construction, automobile, etc.) ainsi que les produits finis importés incorporant des métaux (automobiles, électroménagers, produits électroniques, menuiseries métalliques, etc.).



Relations de filière

Positionnée en amont de nombreuses chaînes de valeur, la filière métallurgie est stratégique pour l'industrie française. La filière sidérurgique en particulier est un facteur de compétitivité pour tout un pan de l'industrie manufacturière dépendant d'un approvisionnement en acier à la fois proche géographiquement, stable, au coût maîtrisé, de qualité et répondant à des besoins spécifiques. Il s'agit notamment de fleurons de l'industrie française à l'export (aéronautique, ferroviaire, automobile). Un déclin de la production française obligerait de nombreux secteurs d'activités à recourir à l'importation d'acier, avec moins de prévisibilité et de sécurité d'approvisionnement. Sur certains besoins spécifiques, en particulier dans les industries de pointe, les utilisateurs d'acier pourraient même faire face à des pénuries.

Or la sidérurgie française est marquée un mouvement de concentration amorcé dès l'après-guerre. Celui-ci répond au besoin de mutualiser les investissements colossaux nécessaires à la maintenance et la modernisation de l'outil productif sidérurgique, dans un contexte de concurrence internationale croissante – avec la montée en puissance notamment de la Chine ou du Brésil – et de surcapacités mondiales depuis plusieurs années, tirant les prix de l'acier vers le bas. Ce mouvement de concentration se combine avec une réduction des capacités de production. Après la fermeture des hauts-fourneaux de Gandrange et Florange, la France ne compte plus que ceux de Dunkerque et Fos-sur-Mer du groupe ArcelorMittal, dont sont issus les deux-tiers de l'acier produit sur le sol français. Le reste de la production nationale provient d'une vingtaine d'aciéries électriques plus récentes. Enfin, ces évolutions ont pour corollaire l'internationalisation des groupes sidérurgiques. De ce point de vue, on observe un fort recul des acteurs français dans la production nationale, dont l'outil industriel est progressivement passé aux mains d'opérateurs étrangers au cours des dernières décennies.

Parmi les secteurs aval les plus consommateurs d'acier, on peut évoquer les suivants :

- **La construction** : elle consomme plusieurs millions de tonnes d'acier par an (principalement des produits longs : poutrelles, ronds à béton, etc.). Comme souligné dans la fiche « filière construction-bois », si l'activité du secteur de la construction progresse en valeur ces dernières années, elle n'a jamais retrouvé son niveau d'avant la crise de 2008.
- **L'automobile** : elle consomme elle aussi de grandes quantités d'acier (notamment sous forme de tôles), ainsi que de nombreux autres métaux (voir fiche filière automobile). Les tendances de marché apparaissent ambivalentes. D'un côté, les besoins de l'industrie automobile nationale ont connu un net recul ces vingt dernières années en raison de la diminution du nombre de véhicules produits dans l'hexagone. Pour autant, le parc de véhicules en circulation en France continue d'augmenter.
- **Le ferroviaire** : ce secteur nécessite de l'acier pour le rail, la roue et les essieux, ainsi que pour les wagons et les moteurs. Si l'extension du réseau TGV (+587 kilomètres entre 2005 et 2020) et du parc de locomotives et de wagons voyageurs tire la consommation de métaux, la tendance générale est au recul des lignes exploitées sur le reste du réseau (soit -11,8% sur l'ensemble du réseau) et du parc de matériels de transport de marchandises.



Circularité

La circularisation de métallurgie française apparaît comme un levier central pour répondre aux enjeux de souveraineté et de décarbonation de la filière. L'amplification de la récupération et du recyclage des métaux issus des chutes de production et des produits en fin de vie vers la production métallurgique permettrait en effet de réduire la dépendance aux minerais métalliques et métaux primaires importés et de contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre de la filière (voir décarbonation).

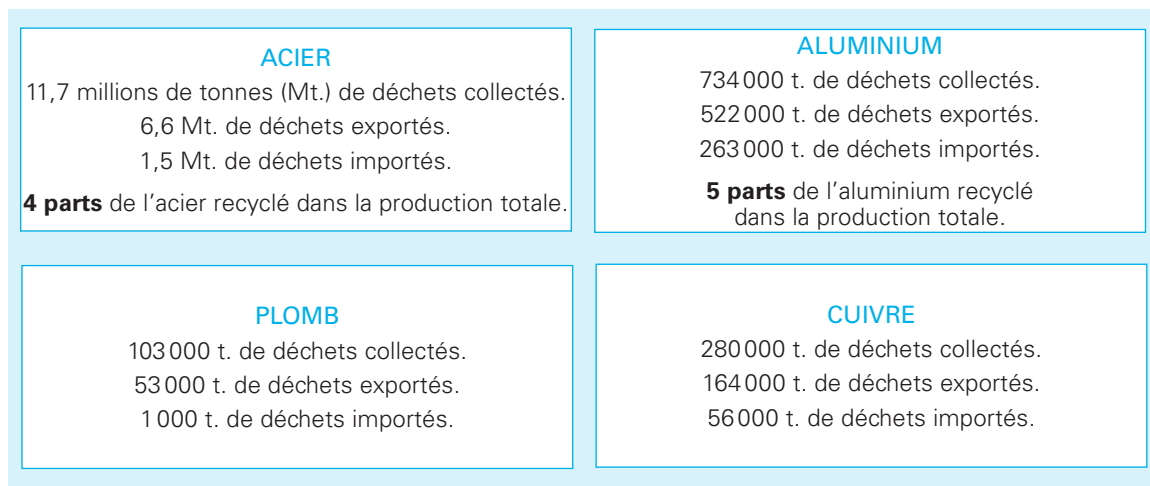
Le recyclage des métaux, en particulier les métaux de base, est déjà significatif en France puisqu'il couvre d'ores et déjà 55% des besoins de matières premières de la métallurgie :

- **Acier** : il présente l'avantage d'être facilement recyclable, sans altération de ses propriétés essentielles. Représentant un gisement important, les déchets d'acier proviennent en France principalement des chutes neuves de fabrication, des recycleurs de ferrailles, des véhicules hors d'usage, de la démolition de bâtiments et des biens de consommation usagés (électroménager, emballages). Le taux de collecte du gisement est estimé à 90%. Les aciéries électriques produisent à 100% à partir de ferrailles récupérées, tandis que ces dernières peuvent être incorporées jusqu'à hauteur de 30% à la fonte liquide issue de la filière intégrée. La production d'acier recyclé représente environ 47% de la production française totale.
- **Aluminium** : les déchets collectés proviennent de produits en fin de vie (véhicules hors d'usage, déchets d'emballages, déchets de déconstruction, mâchefers d'incinération, etc.) ainsi que de déchets de fabrication. En France, en 2019, 10 affineries (lieu d'affinage des métaux) et 7 usines de recyclage direct fonctionnent avec 500 000 t/an de capacité totale. La production d'aluminium recyclé représente 51% de la production d'aluminium française.
- **Cuivre** : le cuivre recyclé peut être incorporé dans la majorité des produits sans contrainte de qualité. Ce gisement est constitué en majorité de déchets de cuivre de la plomberie et des installations électriques (dont câbles et fils de cuivre), ainsi que des déchets de fabrication des industries utilisatrices de cuivre. Le recyclage des déchets plus complexes (cuivre sous forme non-métallique, alliages complexes, etc.) ou non triés est effectué par affinage dans des installations situées hors du territoire français. Le recyclage du cuivre par fusion de déchets cuivreux est la seule source nationale de cuivre pour l'industrie française (à l'échelle européenne, il représente 32% de la production primaire).
- **Plomb** : Les batteries usagées représentent 80% du gisement de déchets de plomb, avec 70% issues du remplacement de batteries et 10% issues de véhicules hors d'usage. Comme pour le cuivre, l'industrie de l'affinage de plomb recyclé représente

la seule source nationale de plomb en France (en Europe, 75% de la production est assurée par l'industrie du recyclage du plomb).

Le recyclage des métaux de base en France en 2019

Source : Ademe, Bilan national du recyclage



Toutefois, le recyclage des métaux présente une marge de progrès importante en France. La collecte des déchets tout d'abord pourrait être optimisée aussi bien quantitativement que qualitativement : par exemple, seuls 50% du gisement d'emballages aluminium est collecté contre 75% en moyenne en Europe. De plus, la France peine à valoriser sur son territoire l'ensemble du flux collecté alors qu'il constitue une ressource stratégique. Elle est en effet exportatrice nette de déchets métalliques. En 2019, 56% des déchets de métaux ferreux collectés sont exportés, 71% pour les déchets d'aluminium, 59% pour les déchets de cuivre, 51% pour les déchets de plomb.

L'ampleur des exportations de déchets métalliques s'explique notamment par une demande insuffisante de la part des acteurs de la métallurgie, soumis aux fluctuations des marchés aval (liées aux crises récentes), des capacités de production insuffisantes pour absorber le flux disponible et des coûts de production plus élevés, ainsi que par des tarifs de rachat des déchets parfois plus attractif à l'étranger. Enfin, si la production de métaux recyclés constitue la seule disponible en France pour certains métaux, elle pourrait occuper une place plus importante pour l'acier : par exemple, les aciéries électriques fournissent 70% de l'acier produit aux États-Unis. Si l'enjeu de décarbonation pousse en ce sens, il convient cependant de souligner que les productions de la filière intégrée (spécialisée sur les produits plats) et de la filière électrique (spécialisée sur les produits longs) apparaissent peu substituables à court terme.

Amplifier le recyclage suppose de lever plusieurs freins. Mieux capter le gisement disponible implique de renforcer les moyens et exigence de collecte, notamment auprès des industries consommatrices (automobile, ferroviaire, etc.) et dans les différentes filières REP concernées par les produits incorporant des métaux (véhicules, équipements électriques et électroniques, etc.). Conserver sur le territoire les flux collectés et éviter leur exportation passent ensuite par un développement des capacités de tri et de préparation des matières répondant aux exigences des activités métallurgiques, ce qui nécessite d'investir dans des procédés et technologies plus avancés. Il peut être également nécessaire de consolider certaines activités métallurgiques pour être en mesure de valoriser pleinement les métaux recyclés mis à disposition.

À noter, la Commission Européenne a lancé une consultation relative au règlement sur les transferts transfrontaliers de déchets qui vise à limiter les exports de déchets (dont métaux) hors Union Européenne. De plus, les comités stratégiques de filière « Mines et Métallurgie » et « Transformation et valorisation des déchets » prévoient la réalisation d'une étude du marché du recyclage des métaux afin d'apporter une compréhension précise sur plusieurs aspects clés et identifier les opportunités de R&D et de consolidation des chaînes de valeur : gisement disponible sur le territoire ; flux import-export de

déchets ; capacités de traitement en France (aussi bien sur les métaux de base que de spécialité) ; qualité des métaux de récupération et de leur prix de rachat ; besoins qualitatifs et quantitatifs, actuels et futurs, des industries aval ; etc.

Un autre frein au recyclage des métaux, qui vaut en particulier pour les métaux de spécialité, réside dans la faible recyclabilité de certains produits métalliques (alliages, mélanges de métaux, etc.). Face à cette difficulté, un dialogue accru entre les entreprises du recyclage, de la métallurgie et des industries aval consommatrices de métaux semble nécessaire afin d'intégrer dès la conception des produits les contraintes de recyclage en conditions réelles.

Enfin, la volatilité des cours mondiaux des déchets métalliques et la montée du prix de l'électricité constituent deux autres facteurs pouvant menacer l'activité de recyclage des métaux.



Décarbonation

La métallurgie génère à elle seule 20 millions de tonnes de gaz à effet de serre, soit 20 % des émissions de l'industrie manufacturière française en 2019, et même davantage si l'on intègre les émissions liées à la production de coke de charbon nécessaire à la sidérurgie. Ces émissions proviennent, d'une part, de la consommation d'énergies fossiles nécessaire à son fonctionnement, et d'autre part des réactions chimiques entrant en jeu dans les procédés métallurgiques – qui concerne essentiellement la filière sidérurgique hauts-fourneaux à travers la réaction du coke de charbon avec le minerai de fer qui produit le fer et du CO₂. La Stratégie National Bas Carbone adoptée en 2020 fixe pour l'industrie dans son ensemble des objectifs de baisse de 35% des émissions de l'industrie en 2030 par rapport à 2015 et de 81% à l'horizon 2050.

En tant qu'industrie lourde positionnée en amont des chaînes de valeur, la contribution attendue de la métallurgie à la décarbonation de l'économie est double : elle doit permettre aux autres secteurs de se transformer – en fournissant les produits dont ils ont besoin pour décarboner leurs activités (par exemple, les produits métalliques nécessaires à la fabrication d'éoliennes ou de batteries) – tout en assurant que cette production devienne elle-même décarbonée.

Concernant les leviers de décarbonation de la métallurgie, le comité stratégique de filière « Mines et Métallurgie » et l'État ont défini une feuille de route de décarbonation portant principalement sur la sidérurgie qui représente 83% des émissions de la filière. Cette stratégie prévoit une réduction de 31% des émissions d'ici 2030 par rapport à 2015 en s'appuyant sur trois leviers principaux (outre le levier historique de l'amélioration de l'efficacité énergétique des installations) :

- L'augmentation de la part de la production d'acier recyclé en réduisant les exportations de ferrailles au profit de leur incorporation dans la filière électrique. Grâce à l'électricité décarbonée du territoire français, cette dernière émet environ 0,4 tonne eq.CO₂ par tonne d'acier produit contre 1,9 tonne eq.CO₂ pour la filière hauts-fourneaux. On estime ainsi que la production d'acier recyclé a permis d'éviter 11,1 Mteq.CO₂ en 2019. Notons cependant que l'incorporation de ferraille à la filière hauts-fourneaux constitue également un levier de décarbonation mobilisé par la filière.
- La mise en œuvre de nouveaux procédés de réduction du minerai de fer par la substitution du coke de charbon par d'autres vecteurs énergétiques tels que l'hydrogène (voir innovations).

Focus : la décarbonation de la sidérurgie implique une forte croissance de la consommation d'électricité décarbonée

Substituer le coke de charbon par l'hydrogène pour la réduction du minerai de fer n'a d'intérêt que si l'hydrogène utilisé est produit à partir d'une électricité décarbonée (électrolyse de l'eau). Or la production d'hydrogène nécessite de grandes quantités d'électricité : il faut compter environ 3 TWh d'électricité (soit environ 20 % de la production photovoltaïque française annuelle en 2021) pour produire les 55 tonnes d'hydrogène nécessaires à la production d'1 million de tonne d'acier, en sachant que la production de la filière hauts-fourneaux représente environ 10 millions de tonnes d'acier par an. De même, le développement des aciéries électriques implique également une croissance de la consommation d'électricité décarbonée. Eurofer (fédération européenne de l'acier) estime que la sidérurgie européenne pourrait avoir besoin de 400 TWh d'électricité en 2050, dont 230 TWh seraient utilisés pour produire de l'hydrogène, ce qui représente sept fois la consommation actuelle. La décarbonation de la sidérurgie soulève ainsi des besoins d'investissement massifs non seulement pour transformer l'outil industriel mais également pour être en mesure de produire à long terme de grandes quantités d'électricité décarbonée non intermittente et non effaçable, à un prix compétitif. À noter, l'entreprise FOS et le port de Marseille Fos ont annoncé en 2022 l'implantation d'une installation industrielle de production d'hydrogène vert par électrolyse de l'eau dans le but de décarboner les activités de la zone industrialo-portuaire de Fos.

- **La stimulation de la demande des industries aval en faveur de produits métallurgiques bas carbone.** La feuille de route de la filière appelle à mieux valoriser les performances de la métallurgie tricolore pour en faire un facteur de compétitivité – hors transport, l'empreinte carbone d'une tonne d'acier produite par la filière intégrée s'élève à 1,9 tonnes eq.CO₂ en France, contre 2,1 tonnes eq.CO₂ en Chine ou 2,8 tonnes eq.CO₂ en Inde. Cela implique de mettre en place des standards environnementaux pour qualifier l'impact environnemental de tous les produits sidérurgiques commercialisés dans l'Union européenne.

Dans sa feuille de route pour la décarbonation des industries lourdes françaises (chimie, ciment, sidérurgie), le think-tank The Shift Project mentionne également le levier du captage et stockage du carbone (CCS). Dans la mesure où les émissions de gaz à effet de serre de la sidérurgie se concentrent sur les hauts-fourneaux de Dunkerque et Fos-sur-Mer, ce levier semble en effet pertinent.

Focus : la sidérurgie est directement concernée par la réforme du système d'échange de quotas d'émission (SEQE) et la mise en place d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières

La sidérurgie fait partie des secteurs couverts par le système d'échange de quotas d'émission (SEQE) de l'Union Européenne. Mis en place en 2005, celui-ci fixe une limite absolue à la quantité totale de gaz à effet de serre que les entités concernées peuvent émettre chaque année. Accordés de manière gratuite aux entreprises, ces quotas sont abaissés au fil du temps de manière à faire diminuer la quantité totale d'émissions. Dans le cadre du paquet « Fit for 55 » présenté en 2021 afin de réduire les émissions européennes de 55% au moins en 2030 par rapport à 1990, la Commission Européenne a engagé une réforme du SEQE de manière à accélérer la baisse des quotas d'émission tout en les rendant progressivement payant pour les industries concernées (et ainsi conforter la rentabilité des investissements en faveur de la décarbonation). Cette réforme vise également à prévenir la concurrence déloyale que subissent les industries concernées par les importations provenant de pays hors-UE moins exigeant en matière de réduction d'émissions de gaz à effet de serre. La sidérurgie européenne fait face en particulier à des surcapacités de production à l'échelle mondiale et des pratiques déloyales de la part de certains pays (subventions, dumping, protectionnisme). C'est la raison pour laquelle la Commission Européenne a proposé la mise en place d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) visant à imposer des droits de douane spécifiques sur les importations de produits à forte empreinte carbone, dont l'acier et l'aluminium.



Substituabilité

La filière métallurgie est appelée à répondre aux enjeux de souveraineté économique et de neutralité carbone en favorisant la substitution des métaux importés et métaux fortement émetteurs de gaz à effet de serre par la production de métaux recyclés ou issus de procédés décarbonés. Une autre question de substitution concerne les industries consommatrices de produits métallurgiques (automobile, construction, etc.). Celles-ci sont amenées à substituer certains métaux (alliages) par d'autres afin de répondre à certaines spécifications techniques ou réduire leur exposition à des risques d'approvisionnement (métaux critiques ou stratégiques). Cela implique une adaptation de la métallurgie à l'évolution des besoins des marchés.



Innovations

La dynamique d'innovation de la métallurgie se concentre aujourd'hui sur les enjeux de recyclage et de décarbonation.

En matière de recyclage des métaux, plusieurs projets de R&D visant à améliorer les procédés de collecte, tri et valorisant des déchets sont en cours en France, portés par des entreprises et différents partenaires publics et privés, et soutenu notamment par le plan de relance et le Programme d'investissements d'avenir. Il s'agit par exemple du projet Carester visant à développer un démonstrateur de recyclage d'aimants permanents dans les Pyrénées-Atlantiques. On observe également la mise en place de partenariats industriels autour du recyclage des batteries de véhicules électriques (partenariats Solvay-Veolia et Orano-CEA).

Concernant la décarbonation de la sidérurgie, l'un des principaux enjeux d'innovation concerne la substitution du coke de charbon utilisé pour la réduction du minerai de fer dans la filière hauts-fourneaux. Plusieurs pistes font l'objet d'un effort de R&D important en France et plus largement en Europe.

- La première, appelée DRI (direct reduction of iron), consiste à remplacer le coke par de l'hydrogène. En Europe, le projet HYBRIT porté par un consortium d'entreprises suédoises, le sidérurgiste SSAB, l'entreprise publique d'énergie Vattenfall et le groupe minier LKAB, est le premier à exploiter cette voie à grande échelle, grâce à l'électricité décarbonée de Vattenfall.
- La seconde voie, « Smart Carbon », vise à réduire le recours au coke par la réinjection des gaz sidérurgiques issus des procédés (cokerie, haut-fourneau et aciérie). En France, l'entreprise Arcelor-Mittal développe le démonstrateur IGAR Hybrid HF3 sur le haut-fourneau n°3 du site de Dunkerque. Ce projet consiste à réutiliser les gaz sidérurgiques du site comme gaz réducteur du minerai de fer.
- D'autres pistes de production d'agents réducteurs se portent sur le charbon de bois (issu de déchets bois), les granulés de plastiques / CSR (combustibles solides de récupération) ou sur le gaz issu de procédé de gazéification de déchets divers.

Comme indiqué plus haut, une autre piste de décarbonation concerne la capture et le stockage du carbone issu des hauts-fourneaux. Toujours à Dunkerque, Arcelor-Mittal a lancé en 2019 un projet de démonstrateur industriel (appelé 3D) visant à valider un procédé de captage, purification et liquéfaction du CO₂ développé par l'IFPEN. Une première unité industrielle pourrait être opérationnelle en 2026 et devrait capter de l'ordre de 1 MtCO₂ par an.



Territoire

Auvergne-Rhône-Alpes est de loin la première région française en nombre d'établissements et en nombre d'emplois dans le secteur de la métallurgie et du travail des métaux. De plus, ce dernier constitue le premier secteur industriel régional : il concerne plus de 85 000 salariés, soit 20 % de l'emploi industriel régional. La région compte également la présence du Centre technique de référence pour la métallurgie et la transformation des métaux (CTIF) à Lyon, ainsi que plusieurs antennes de l'Union des industries et métiers de la métallurgie (UIMM).

Plusieurs filières métallurgiques sont présentes sur le territoire régional et portent des projets en phase avec les enjeux mentionnés plus haut :

- **Acier** : Implantée au sein de la vallée de la Tarentaise qui présente de longue date une spécialisation marquée en matière de métallurgie, l'entreprise Ugitech (1800 salariés) est leader mondial de la production d'aciers longs inoxydables pour les industries automobile, aéronautique, médicale, nucléaire et chimique, et filiale du groupe Swiss Steel Group qui possède 6 sites industriels en France. Représentant la filière aciérie électrique, Ugitech a lancé en 2021 le projet UGIRING qui a pour objectif la création d'une unité industrielle de valorisation d'alliages issus de produits usagés pour la production de ferro-alliages. Confronté à une tension sur les matières premières essentielles à sa production (Nickel, Manganèse, Molybdène et Chrome), Ugitech souhaite créer la première « aciérie circulaire » au monde afin de réduire de plus de 90% les approvisionnements primaires du site d'Ugine à horizon de 10 ans.
- Dans le Puy-de-Dôme (Les Ancizes), l'entreprise **Aubert&Duval**, filiale de la branche alliages d'Eramet, conçoit et élabore des aciers et des superalliages, qui sont ensuite transformés à chaud par forgeage, laminage et traitements thermiques. Elle compte également un autre site spécialisé sur les aciers à Firminy. À noter la présence également des aciéries électriques des entreprises Industeel à Chateauneuf (Loire) et Winoa Group au Cheylas (Isère).
- **Aluminium** : La vallée de la Maurienne accueille quant à elle l'entreprise Trimet, l'un des deux seuls sites de production d'aluminium primaire en France, avec une capacité de production de 145 000 t/an. Produisant également des alliages à base d'aluminium, l'entreprise est présente notamment sur les marchés automobile, aéronautique, éolien, emballage.
- Présente à Issoire (Puy-de-Dôme), l'entreprise **Constellium** (1500 salariés) est spécialisée dans la fabrication de plaques d'aluminium destinées à l'aéronautique. À noter, Constellium, le CNRS et l'université de Grenoble Alpes viennent de créer un laboratoire commun baptisé 3Alp (Advanced Alloys Partnership). L'objectif est de développer la recherche sur la recyclabilité et la durabilité des alliages. Le nouveau laboratoire s'appuiera sur l'expertise du Simap (science et ingénierie des matériaux et des procédés) en matière de conception d'alliages métalliques et de procédés innovants et sur celle du CTEC, le centre de R&D de Constellium implanté à Voreppe.
- L'entreprise **Aubert&Duval** compte également un site à Issoire dont l'activité est tournée vers la conception et la transformation à chaud par forgeage et matriçage d'aluminium.
- **Cuivre** : l'entreprise Gindre Duchavany basée à Pont de Chérury (Isère), filiale du groupe suisse Alpin AG, produit des barres, profilés et alliages de cuivre.
- **Titane** : la vallée de la Tarentaise accueille également l'entreprise Timet, seul site français de production d'alliage de titane. Il fait partie de la firme américaine Timet, leader mondial de la métallurgie du titane.
- **Silicium** : Implanté en vallée de Maurienne, l'entreprise FerroPem est spécialisée dans la production d'alliages à base de silicium. Le site appartient au groupe espagnol FerroAtlantica. L'objectif de l'entreprise est de développer de manière industrielle la production de silicium destiné à la production d'électricité photovoltaïque.
- **Plomb** : Comptant un site à Villefranche-sur-Saône, l'entreprise [Recylex](#) récupère et casse des batteries. Le plomb et les sels de plomb sont traités par pyrométallurgie dans l'usine de la société Weser-Metal, en Allemagne.

Par ailleurs, le territoire régional voit émerger un nombre croissant de projet collaboratifs en matière de recyclage des métaux, par exemple :

- **PerMaCo** : visant à développer un pilote industriel pour la réalisation d'aimants permanents à partir d'aimants usagés et ainsi créer une filière de recyclage, le projet est porté par le consortium constitué des entreprises Celimar installé à Pau et spécialiste dans la fabrication d'aimants, ECM Technologies, leader dans la fabrication de fours à cémentation à Grenoble, Poral, spécialiste de la compression et du frittage

à Grenoble, et REEfine Technologies, jeune société lyonnaise impliquée dans la fabrication de poudres anisotropes.

- **MeCaWare** : spin-off de l'Institut de chimie et biochimie moléculaire et supramoléculaire (ICBMC) de Lyon, MeCaWare (acronyme de Metal Capture for Waste Recycling) vise à récupérer de manière écologique les métaux stratégiques et terres rares (lithium, cobalt, nickel, manganèse, lanthane, etc.) des produits technologiques en fin de vie tels que les batteries lithium-ion. Pour se faire, elle développe un procédé d'extraction innovant. Hébergée sur la plateforme d'innovation Axel'one à LyonTech-La Doua, la start-up prépare la création d'une usine pour extraire ces métaux stratégiques et ces terres rares à grande échelle, tout comme la possibilité d'implanter des sites au plus près des gigafactories de batteries prévues en France pour se positionner à proximité des gisements de déchets et limiter leurs transits. Dans les 4 ans, Mecaware aurait besoin de 100 M€ afin de mener à bien son projet d'industrialisation et de doubler son effectif tous les 6 mois.

Principales sources utilisées

- ADEME, Devauze Chloé, Koite Alima, Chrétien Anaëlle, Monier Véronique (2021). *Bilan National du Recyclage 2010-2019 - Évolutions du recyclage en France de différents matériaux : métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois*.
- British Geological Survey, *World mineral production, 2000-2020*.
- Comité des constructeurs français d'automobiles (CCFA), *L'industrie automobile française. Analyse et statistiques*, édition 2000 à 2020.
- Comité stratégique de filière Mines et Métallurgie (2022), *Plan sidérurgie France. Vers une sidérurgie française compétitive, innovante, décarbonée et attractive* – janvier 2022.
- Comité stratégique de filière Mines et Métallurgie (2021), Feuille de route de décarbonation de la filière « aciéries électriques ».
- Comité stratégique de filière Mines et Métallurgie (2021), *Panorama et enjeux de développement de la filière « aciéries électriques »*.
- Eurostat, *Compte d'émissions atmosphériques par activité de la France*.
- Insee, *Nomenclature d'Activités Françaises*.
- Insee, *Comptes nationaux 2021*.
- International Copper Study Group (2022), *The World Copper Factbook 2022*.
- International Resource Panel, *Global Material Flows Database*.
- Sénat (2019), *Rapport d'information sur les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du XXI^e siècle : opportunités de croissance et de développement*.
- Service des données et études statistiques (2022), *Chiffres clés des transports. Édition 2022, Ministère de la transition écologique*.
- Service des données et études statistiques, *Surface de plancher des logements mis en chantier en France, Ministère de la transition écologique*.
- Service des données et études statistiques, *Surface de plancher commencée par type de local non résidentiel en France, Ministère de la transition écologique*.
- The Shift Project (2022), *Décarboner l'industrie sans la saborder*, Janvier 2022.
- World Steel Association, *Steel Statistical Yearbooks 1978 to 2021*.
- <https://www.aluminium.fr/>
- <https://www.france-industrie.pro/metallurgie/>
- <https://www.observatoire-metallurgie.fr/secteurs/metallurgie-siderurgie>
- <https://www.forgefonderie.org/fr/index>
- <https://lelementarium.fr/>



FILIÈRE CHIMIE

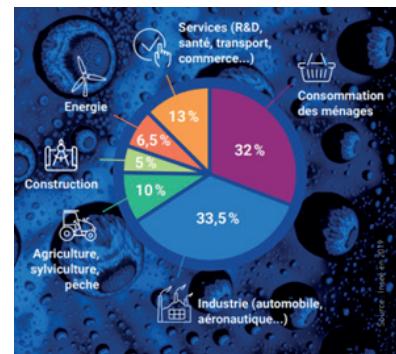


En résumé – La chimie est la base de la production de nombreux matériaux. Elle s'intègre aujourd'hui aux défis de renouvelabilité de secteurs comme la mobilité, les énergies ou la construction. Ses capacités à proposer de nouveaux produits, en s'appuyant sur la chimie du végétal ou le recyclage, s'accroissent. Portée par la réglementation européenne, de forts investissements et des start-up novatrices, une nouvelle chaîne de valeur est en train de se construire. Les matériaux de demain seront alors le fruit des connaissances scientifiques en train de se faire.



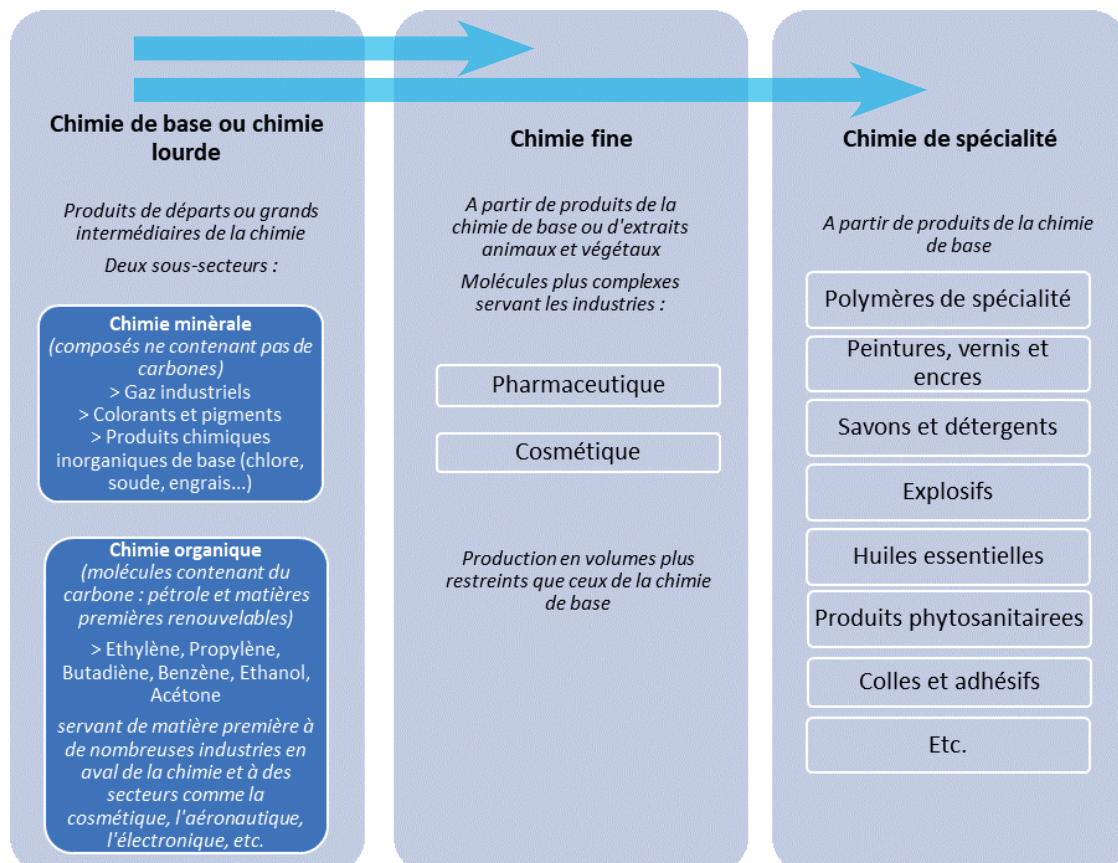
Organisation de la filière

Selon la Fédération des syndicats professionnels France Chimie, « les entreprises de la chimie transforment la matière pour obtenir les substances et matériaux indispensables à l'ensemble des secteurs de l'économie ». La filière Chimie est qualifiée par la Direction Générale des Entreprises comme « l'industrie de l'industrie ». Elle indique « qu'un quart des produits de l'industrie chimique sont destinés à l'industrie chimique, la moitié aux autres industries et un quart directement à l'utilisateur et notamment au grand public (détergents, savons, peintures...) ».



Source : France Chimie, 2021.
Les marchés de la Chimie en France

La filière se divise en trois grandes activités, comme illustré dans le schéma ci-dessous.



Autour de ce maillon central, la chaîne de valeur de la chimie intègre les producteurs de matière première, les bureaux d'études en formulation, les distributeurs et les utilisateurs finaux.



Dynamique économique

► Un positionnement économique fort sur le marché français et européen

Avec un chiffre d'affaires de 97 milliards d'euros pour 220 600 salariés, l'industrie chimique française détient la **2^e place européenne** derrière l'Allemagne et se positionne au **7^e rang mondial**. À ce jour, elle regroupe 4 000 entreprises (essentiellement des PME) et compte 18 **plateformes** dont la Vallée de la Chimie, à proximité de Lyon. En 2021, la chimie est le **1^{er} secteur industriel exportateur français** (69 milliards d'euros à l'export et 56 milliards d'euros à l'import). Avec 13 milliards d'euros d'excédent commercial, elle se place en **2^e position en termes de solde industriel**, derrière l'aérospatial.

Les plateformes regroupent divers acteurs de l'industrie chimique, des sous-traitants et des fournisseurs pour répondre plus efficacement aux besoins. Elles se situent en zone à caractère industriel et sont classées Seveso. Ces regroupements permettent de mutualiser les services, partager les expertises et réduire les coûts d'exploitation.

► En France, un vivier d'entreprises en croissance pour des volumes de production en hausse et d'importants investissements

L'industrie chimique française comptait 3 330 entreprises (dont 95 % de PME) en 2018 et regroupe à présent 4 000 entreprises sur tout l'Hexagone¹. Le nombre d'emplois est également en pleine expansion avec 120 000 recrutements attendus d'ici 5 ans.

La production en volumes a également connu une croissance annuelle moyenne d'1,5 % entre 2010 et 2021. Après une chute de 8 % en 2020, la production a enregistré une croissance de 6 % en 2021, proche de celle observée sur l'ensemble de l'Europe. La vitalité de l'industrie chimique se distingue donc par rapport au reste de l'industrie manufacturière puisque celle-ci a connu au global une décroissance moyenne annuelle d'environ -0,1 % par an, sur la même période. Selon les observations de France Chimie, l'augmentation des importations et l'inflation ont eu pour effet une rétraction de 26 % de la balance commerciale au cours du premier semestre 2022. La production semble également se rétracter pour atteindre un niveau inférieur à celui d'avant la crise de la Covid-19. Ce phénomène, qui avait d'abord impacté les activités amont de la filière (chimie lourde), s'étend désormais aux spécialités chimiques.

Comme le démontre le poids des investissements dans la chimie, la filière est en phase d'amélioration de sa croissance et de sa compétitivité. Elle occupe la **4^e place des investissements industriels en R&D**, soit 2 milliards d'euros dépensés en 2021 (10 % de la valeur ajoutée de la filière). Un investissement de 4,1 milliards d'euros en 2021 a également été observé, les deux-tiers de la somme étant liés à la maintenance et les évolutions réglementaires, le reste de l'enveloppe étant associé à la croissance de l'industrie chimique (augmentation de capacités et développements de nouveaux produits). Ces investissements productifs ont augmenté de 40 % en un an et permettent d'identifier les priorités stratégiques du secteur :

- 35 % pour le développement de **filières d'excellences** (chimie verte, matériaux pour les batteries),
- 25 % pour la **localisation de produits critiques** (ex. la chimie fine pharmaceutique) et la **transition environnementale** (ex. recyclage chimique),
- 40 % pour la modernisation de certains marchés clés et le développement de nouvelles applications, notamment dans les ingrédients cosmétiques.



Relations de filière

La filière chimie est nécessairement bousculée par les grandes questions environnementales. Dans son « Avenant au contrat stratégique de la filière chimie matériaux 2018-2022 », le Comité Stratégique de Filière (CSF) Chimie et matériaux a choisi 10 projets structurants qui viennent conforter les évolutions de la filière. Trois d'entre eux témoignent de changement de relation de filières :

1. Le contrat stratégique 2018-2022 de la filière portait, en effet, des objectifs de croissance visant à augmenter le nombre d'ETI.

• Développer le recyclage chimique en France

Le recyclage chimique est source d'attractivité nationale comme l'attestent les nombreux projets portés récemment dans l'Hexagone par des acteurs étrangers comme Eastman, Plastic Energy et Exxon Mobil, Loop, etc. L'emplacement de la France sur le marché européen est stratégique pour ces entreprises.

De nombreux appels à projets ciblent les entreprises porteuses d'investissements et de projets d'industrialisation de nouvelles capacités de recyclage chimique. Cette impulsion impacte la chaîne de valeur depuis le process de récupération des déchets, en passant par le stockage, le tri, le traitement pour en faire des Matières Premières Recyclées (MPR) jusqu'à l'incorporation de cette nouvelle matière dans d'autres produits. A titre d'exemple, le bureau du CSF Chimie a présenté le projet de « développer une filière en France de recyclage chimique des déchets plastiques », piloté par PlasticsEurope.

Le recyclage chimique offre une alternative de qualité et de sécurité par rapport au recyclage mécanique (voir encadré sur les définitions) pour traiter des déchets complexes, et pour certains marchés réglementés comme les dispositifs médicaux, le bâtiment ou l'aéronautique. En effet, dans ces secteurs, le recyclage mécanique ne propose pas suffisamment de régularité dans la qualité et les propriétés des matières sortantes.

Procédés de recyclage du plastique

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

Néanmoins, les technologies de recyclage chimique sont encore assujetties à plusieurs contraintes :

- ▶ **contraintes de coûts** puisque la matière première vierge reste pour l'instant économiquement plus avantageuse, et que les technologies actuelles restent encore très onéreuses (pyrolyse, hydrolyse ou encore gazéification). C'est pourquoi, seuls quelques projets, portés par des leaders de la pétrochimie ou des start-up, ont à ce jour développé un modèle commercial ;
- ▶ **contraintes de disponibilité** puisque les unités de recyclage en cours de construction auront de faibles capacités de fourniture, de l'ordre de quelques dizaines de tonnes annuelles ;
- ▶ **contraintes d'approvisionnement** puisque la lutte contre les déchets plastiques risque d'amoinrir la ressource nécessaire à alimenter ces filières en déchets de qualité. En effet, pour recycler et incorporer des MPR, il faut compter sur un gisement de qualité collecté et trié correctement. Or, avec la disparition des plastiques à usage unique, le gisement diminue et contraint l'industrie à se fournir en MPR étrangers. Aussi, pour maintenir une souveraineté française dans l'incorporation des MPR, il est nécessaire d'assurer la performance du tri des déchets plastiques et des installations de recyclage des déchets complexes dans l'Hexagone.

Une crainte s'élève par ailleurs du côté des acteurs du recyclage mécanique qui redoutent que les déchets plastiques les plus simples à traiter ne prennent la voie d'un recyclage chimique. Des arguments environnementaux viennent également étayer cette lutte entre les deux options de recyclage. Tentant de faire le point sur ces divergences qui animent les deux camps, le Karlsruhe Institute of Technology (Volk et al., 2021) indique que le recyclage chimique apparaît plus performant que le recyclage mécanique en termes de coûts et d'efficacité carbone avant d'ajouter que de meilleurs résultats sont obtenus en combinant les deux solutions.

• Décarboner le secteur de la construction/rénovation



La réglementation environnementale 2020 (RE2020) fixe des seuils d'émissions de CO₂ à atteindre pour 2025, 2028 et 2031. Toute la chaîne de valeur de la construction est donc concernée, y compris, en amont, les acteurs de la chimie.

À l'instar d'autres filières d'approvisionnement comme le bois, le ciment, l'acier ou les terres cuites, l'industrie chimique agit au niveau des produits, composants et matériaux et participe à la décarbonation du BTP en offrant de nouvelles

performances aux matériaux. C'est le cas pour les isolants thermiques de nouvelles générations, les revêtements ou encore les mastics rendus plus écologiques.

Les chimistes proposent aussi des solutions capables de ralentir la dégradation des matériaux. Des chercheurs américains ont, par exemple, inventé un béton d'une longévité d'un siècle, le double de la longévité d'un béton classique. Les performances de ce béton dit SECC sont liées à son imperméabilité et à sa souplesse. Sa résistance est rendue possible par l'adjonction au ciment d'un polymère hydrophobe, le siloxane. L'incorporation d'une fibre d'alcool polyvinylique limite ensuite les risques de corrosion et permet à ce béton de supporter davantage de pression sans se fissurer.

Enfin, la chimie propose des solutions qui visent à réduire l'épaisseur de certains produits (fondations, façades, menuiseries, etc.) afin de réduire les émissions de CO₂ de ces composants.

• Développer la chimie biosourcée

Pilier du plan France Relance, les produits biosourcés font partie des technologies d'avenir. En poursuivant ses investissements, ses efforts de R&D et en sécurisant ses approvisionnements en biomasse, la France pourrait devenir la 1^{re} puissance européenne en bioéconomie². En effet, le territoire national dispose de forts atouts grâce à la présence de leaders à tous stades de développement industriel d'une ressource en biomasse propice et d'une maîtrise des biotechnologies adéquate.

Le nombre de projets industriels signalés lors de l'AMI «Pacte productif» fin 2019 illustre une accélération économique de ces produits. La filière agricole et sylvicole est alors sollicitée pour accompagner ces recherches, restructurer l'approvisionnement en matières premières nécessaires aux chimistes et repenser le modèle économique.



Dépendance/vulnérabilité

Le secteur de la chimie est marqué par d'importantes interdépendances de ses approvisionnements en matières premières (intrants³), des contraintes de disponibilité et de transports. En 2020, la filière chimie a réalisé un travail d'identification de ses approvisionnements critiques qui pointe la dépendance envers certains intrants comme la soude, le chlore, la glycérine, les désinfectants, le propylène, l'acétone et pour l'industrie pharmaceutique, les antibiotiques et principes actifs⁴.

2. D'après l'Avenant au contrat stratégique de la filière Chimie et matériaux.

3. Un intrant est un élément entrant dans la composition d'un produit. Il s'agit en l'occurrence des matières premières nécessaires au processus de production des industriels de la chimie.

4. D'après les indications fournies par le rapport du Sénat du 6 juillet 2022 (Primas et al., 2022).

En 2021, le Conseil d'analyse économique a également fait paraître une liste de 122 intrants présentant une vulnérabilité renforcée dont une quarantaine de produits issus de la chimie (Javarel et Méjean, 2021). Cette liste cible pour moitié des intrants propres à la chimie organique et notamment aux principes actifs des médicaments qui proviennent pour 1/3 des États-Unis et pour 15% de la Chine. L'approvisionnement de l'industrie chimique et pharmaceutique européenne est aujourd'hui vulnérable et fortement dépendante d'une production délocalisée. La crise sanitaire a cependant permis d'engager un processus de relocalisation afin d'assurer la production de certains intrants critiques en accompagnant notamment la filière à travers le financement du Plan de Relance. Dès lors, l'industrie pharmaceutique fait l'objet d'une grande attention politique et médiatique dont le Paracétamol est la figure de proue.

D'après un rapport remis au Sénat en juillet 2022 (Primas et al.), la connaissance de l'État vis-à-vis des dépendances et vulnérabilités d'approvisionnement et flux d'échanges mérite « un budget spécifique et un effort exceptionnel de cartographie ». En 2020, la branche chimie a conduit des travaux d'identification de ses maillons vulnérables lui ayant permis de bénéficier d'aides à la relocalisation. Malheureusement, les données plus précises quant aux ressources concernées ne peuvent être citées ici plus en détail⁵.

L'industrie chimique devrait continuer à jouer un rôle majeur pour soutenir l'aval de la production industrielle française dépendante à certaines matières premières comme le pétrole pour la production de plastiques. La croissance de la chimie verte et du recyclage chimique sont autant de propositions de valeurs pour réduire les risques d'approvisionnement en matières pétrosourcées voire en contourner le besoin. Jean-Francis Spindler évoque de nombreux partenariats en cours avec des agriculteurs. Il cite notamment l'utilisation de la cosse de riz pour injecter de la silice dans les pneus, des déchets du maïs pour produire de la vanilline, de l'alcool de canne à sucre pour fabriquer des solvants verts ou encore des déchets du bois pour la confection de polymères naturels.



Circularité

D'après un article de Gregory Chatel (2020), cinq niveaux de contribution de la chimie à l'économie circulaire peuvent être identifiés : la prise en compte des principes de la chimie verte (voir encadré ci-dessous) ; la simplification et l'optimisation des ressources ; l'innovation et le développement de nouvelles technologies et nouveaux concepts ; l'analyse du cycle de vie ; et l'approche multipartenaires et pluridisciplinaires.

Les principes de la chimie verte

Le concept de **chimie verte**, apparu dans les années 90, est basé sur la prévention de la pollution par la réduction des déchets, substances toxiques et dangereuses dans la fabrication de produits chimiques.

12 principes d'ingénierie ont été énoncés par les fondateurs de la chimie verte, Anastas et Warner (cité dans Chatel, 2020) :

1. la prévention de la chimie à la source,
2. l'économie d'atomes et d'étapes,
3. la conception de synthèses moins dangereuses,
4. la conception de produits chimiques moins toxiques,
5. la réduction des solvants polluants,
6. la limitation des dépenses énergétiques,
7. l'utilisation de ressources renouvelables,
8. la réduction du nombre de dérivés,
9. l'utilisation de procédés catalytiques,
10. la conception de produits/substances non persistantes,
11. la mise au point des méthodologies d'analyses en temps réel pour prévenir la pollution,
12. la prévention des risques dans la chimie fondamentale.

5. D'après le rapport Primas citant des travaux de 2019, la filière Chimie a estimé « ne pas être concernée par la problématique de la sécurisation des approvisionnements ; à tout le moins, [elle n'a] pas souhaité partager [ses] réflexions d'ensemble avec la mission ».

La chimie participe de plus en plus à la **valorisation des produits et matériaux en fin de vie**, à l'image du projet Polyloop (Génissieux, 26) dont l'objectif est de développer des unités de recyclage de PVC composites ou de la société Afyren (implanté à Clermont-Ferrand, 63 et Lyon, 69) dont l'objectif est de proposer aux industriels des molécules bio-sourcées issues de co-produits et déchets de l'industrie agro-alimentaire en remplacement des molécules pétrosourcées entrant notamment dans la fabrication de biens de grande consommation comme les plastiques alimentaires, les parfums, les lubrifiants ou encore, le maquillage. D'autres acteurs implantés dans la région peuvent également être cités à l'instar d'IFP Énergies Nouvelles (PET), Solvay (polyamides et PET), Carbio (PET) ou Axel One (Polyléfines). Enfin, certains acteurs s'intéressent au recyclage des batteries comme Solvay, Suez, Renault ou encore Eurecat.

Mais la chimie peut également participer à l'économie circulaire **via l'éco-conception** des produits comme le propose la société Arkema (Colombes, 92)⁶ qui fabrique une résine permettant la production de pâles d'éoliennes en composites recyclables.

Les chimistes, parce qu'ils sont situés en amont de la chaîne et ont connaissance des procédés de dépolymérisation et de recyclage chimique, sont des interlocuteurs centraux dans cette logique de circularité. Jean-Francis Spindler exprime tout l'intérêt de ces procédés en prenant l'exemple du recyclage chimique du plastique : « Par exemple, une bouteille d'eau c'est du polyéthylène téréphtalate que l'on recycle déjà mécaniquement. Quand vous mettez une bouteille dans votre bac de recyclage, il y a des usines qui en reproduisent par mélangeage mécanique. Aujourd'hui, on est capable de prendre cette bouteille, de la mettre en morceaux, la faire digérer par des bactéries et la dépolymériser. On fait de l'acide téréphtalique d'un côté et de l'éthylène de l'autre. Il y a une quinzaine d'entreprises en France qui lancent des unités de recyclage en débobinant ça. Il y a un projet dans l'Ouest de la France qui fait 1 milliard d'investissements pour faire ça. Il y a aussi des start-up lyonnaise comme Recyc'Elit qui arrive à refaire des polymères purs. Et nous [Solvay], on travaille avec la plupart pour refaire des polymères. C'est aussi une forme de chimie verte » (interview du 15 février 2023).

Technologies de recyclage existantes et en développement, avec des projets illustratifs (d'après Deloitte Conseil, 2022)

► **Recyclage mécanique**

Transformation des déchets plastiques en matières premières secondaires, sans modification de la structure chimique, par collecte, tri, nettoyage, découpe en copeaux puis refonte pour produire des granulés. En Europe, plus de 99% des déchets sont traités par voie mécanique.

- **Recyclage primaire** (en boucle fermée) : procédé par lequel les matières sont réutilisées pour des applications équivalentes à la première utilisation.
- **Recyclage secondaire** (en boucle ouverte) : procédé par lequel les matières sont réutilisées pour d'autres applications où les produits finaux seront de moindre qualité.

► **Recyclage chimique et physico-chimique**

Ces diverses technologies permettent de recycler des plastiques pour lesquels il n'y a actuellement pas de solution mécanique ou sont mal valorisés par voie mécanique. Cela consiste à réaliser une conversion en monomères ou production de nouvelles matières premières par modification de la structure chimique des plastiques, soit par craquage, gazéification ou dépolymérisation (norme ISO 15270). Cette définition exclut la dissolution sélective qui ne modifie pas chimiquement la structure mais s'intègre aux technologies à fort potentiel identifiées ci-après :

- **Dissolution sélective** : Technologies physiques ou physico-chimiques qui consistent à extraire les chaînes de polymères à partir d'un solvant. Les polymères sont séparés de façon sélective des autres matériaux, substances ou additifs.
 - Exemple : Polyloop développe une technologie de dissolution sélective, installée dans des conteneurs, afin de revaloriser les déchets PVC.

⁶. Également implantée en Auvergne-Rhône-Alpes à travers quatre sites de production et deux centres de recherche.

- **Dépolymérisation chimique** : Technologies de dégradation par action d'un solvant (solvolyse) ou d'une enzyme. L'enjeu est de rompre la chaîne de polymères pour revenir aux monomères et obtenir des polymères ciblés.
 - Exemple : un partenariat liant Axens, IFPEN et JEPLAN à Lyon vise à commercialiser un procédé de recyclage de PET par solvolyse (glycolyse) pour des déchets de tous types : bouteilles, films, barquettes ou textiles en polyester.
- **Dépolymérisation thermique ou craquage thermique** : Basées essentiellement sur des techniques de pyrolyse ou gazéification, ces procédés recyclent les plastiques par un circuit plus long remontant plus en amont de la chaîne. Ces technologies permettent un retour aux monomères en produisant un mélange d'huiles hydrocarbonées ou de gaz de synthèses réintégré aux raffineries et complexes pétrochimiques avant de servir à la production de carburants ou de produits chimiques dont les plastiques.
 - Exemple : Michelin et Pyrowave développent un partenariat visant l'industrialisation d'une technologie de pyrolyse par micro-onde. Une partie de la matière récoltée ira dans la fabrication des pneus, tandis qu'une autre partie sera expédiée à des polyméristes comme Total ou Trinseo pour être réinjectée dans la fabrication d'emballages.

Selon le cabinet de consulting Ecoprog (Polyvia, 2023), 90 projets de recyclage chimique étaient actifs en 2021 dont 13 en France. Mais il n'existe que très peu de projets à l'échelle commerciale. Au niveau européen, seuls 20 sites se trouvent au stade de démarrage industriel. Aussi, la France investit afin d'accélérer ces innovations. À terme, 4 à 8 % de l'offre mondiale de polymères serait issue de ce type de production. Mais cela nécessite encore d'importants investissements à travers le monde, estimés à près de 40 milliards de dollars (Polyvia, 2023).

En France, la quantité élevée de déchets non-recyclés mécaniquement constitue un argument valable pour explorer ces solutions et aider à augmenter les taux de recyclage nationaux. Le gisement potentiel français représente près de 70% des déchets plastiques (Deloitte Conseil, 2022), incluant les déchets non collectés. L'augmentation des gisements repose sur l'amélioration des systèmes de collecte et la mise en place d'une chaîne de valeur nationale capable de fournir des déchets en quantité et en qualité suffisante pour les recycleurs.

À ce jour, les plus gros volumes non recyclés sont les emballages, comme l'atteste le tableau suivant représentant les technologies les plus prometteuses afin de traiter les déchets actuellement non recyclés. Ces estimations se basent sur un couplage technologie/gisement identifiant les technologies les plus pertinentes qui s'appliquent sur des gisements de déchets plastiques non-recyclés, dont les volumes sont les plus importants et dont le potentiel d'exploitation est relativement élevé.

Adéquation des technologies de recyclage chimique et physico-chimique aux gisements de déchets plastiques existants (Synthèse des résultats du cabinet Deloitte, 2022)

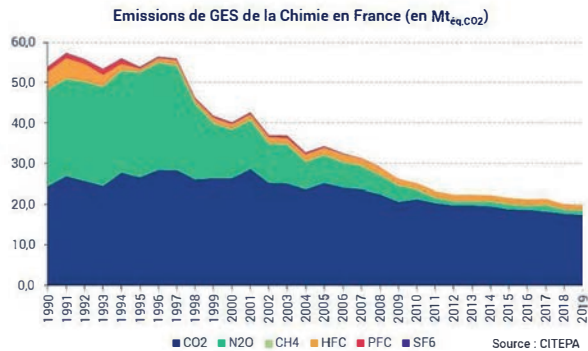
Groupe	Famille de plastiques	Gisements ciblés	Technologie	Gisements non-recyclés en 2019 (tonnes)	Remarque
1	Résines en polyoléfine (PE, PP, PO)	Emballages ménagers, C&I et agricoles	Pyrolyse et craque hydrothermique	968 968	(Pyrolyse) Technologies fortement déployées en France
2	Polytéréphtalate d'éthylène (PET)	Emballages ménagers et C&I	Solvolyse	142 466	Technologie fortement déployée en France
3	Polypropylène (PP) Polystyrène (PS)	Emballages ménagers	Dissolution sélective	respectivement 145 662 et 96 600	Niveau de maturité inférieur aux groupes précédents
4	Polyuréthane (PU)	Ameublement	Solvolyse	73 003	Une seule technologie développée et issue de la collecte de matelas
5	PET/Polyester	Textiles	Pyrolyse	103 502	Étapes de tri ne sont pas aussi automatisées et matures que dans les emballages



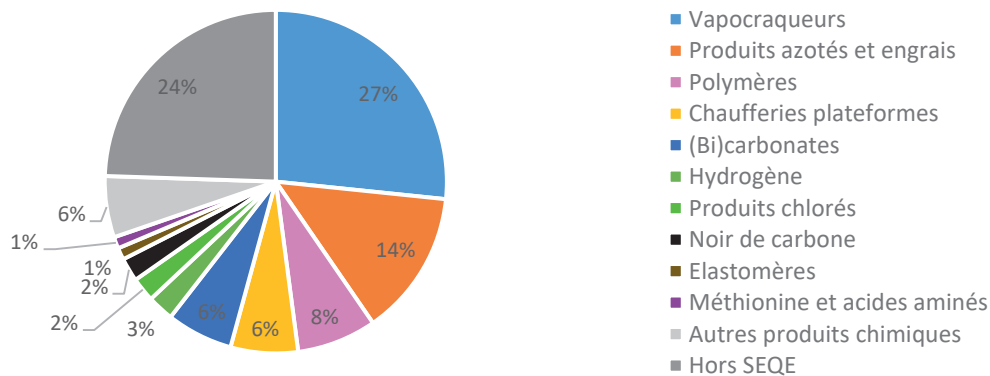
Décarbonation

Entre 1990 et 2018, la filière a réduit ses émissions de gaz à effet de serre de 63%. D'après France Chimie, «cette réduction a été possible grâce à une amélioration continue de l'efficacité énergétique de sa production d'énergie et de ses procédés [et] une diminution drastique des émissions de N₂O, liées à la production d'acides adipique et nitrique».

Malgré cela, le secteur représente encore 25% des émissions de l'industrie manufacturière, soit 20 millions de tonnes de CO₂ émises en 2018⁷.



Émissions de la filière Chimie en 2018



Pour atteindre les objectifs de décarbonation fixés par la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), la filière a publié, en mai 2021, une feuille de route. Celle-ci suit la trajectoire du Plan de Relance de -26% d'émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030, soit 5,7 millions de tonnes de CO₂. Trois leviers ont été préconisés afin d'assurer la décarbonation de la filière :

- L'amélioration de l'efficacité énergétique,
- La production de chaleur bas-carbone,
- L'abattement des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) et d'hydrofluocarbures (HFC).

D'autres leviers, moins matures, y sont évoqués et pourraient permettre de réduire d'encre 4 à 10% les émissions de la chimie (Conseil national de l'industrie, 2021). La feuille de route indique qu'il serait nécessaire de lancer au plus vite les premiers pilotes visant ces solutions, à savoir la capture et la valorisation du CO₂, l'hydrogène bas-carbone et l'électrification des procédés. Cette feuille de route souligne également certains facteurs non pris en compte dans son plan de décarbonation : la relocalisation de l'industrie en France qui «augmenterait les émissions nationales, mais réduirait les émissions globales et aurait donc un effet bénéfique pour le climat» ainsi que la croissance du secteur de la Chimie en France dans les prochaines années. Les technologies susmentionnées existent mais la mise en place d'une filière à horizon 2030 nécessite encore de lever des barrières financières et réglementaires. De plus, seules certaines voies de valorisation du CO₂ ont atteint une maturité commerciale comme la synthèse de l'urée pour la production d'engrais ou du polycarbonate (verres optiques, CD/DVD, lentilles, etc.). Mais d'autres synthèses sont en cours de développement comme les acides carboxyliques, les carbonates organiques et les isocyanates, composants utilisés pour la production de plastique (Laroche cité dans IFPEN, 2022).

⁷. «Le secteur de la Chimie constitue l'un des trois secteurs les plus émetteurs de l'industrie manufacturière, avec la métallurgie (19,3 MtCO₂) et les matériaux de construction (18,4 MtCO₂)» (Conseil national de l'industrie, 2021).

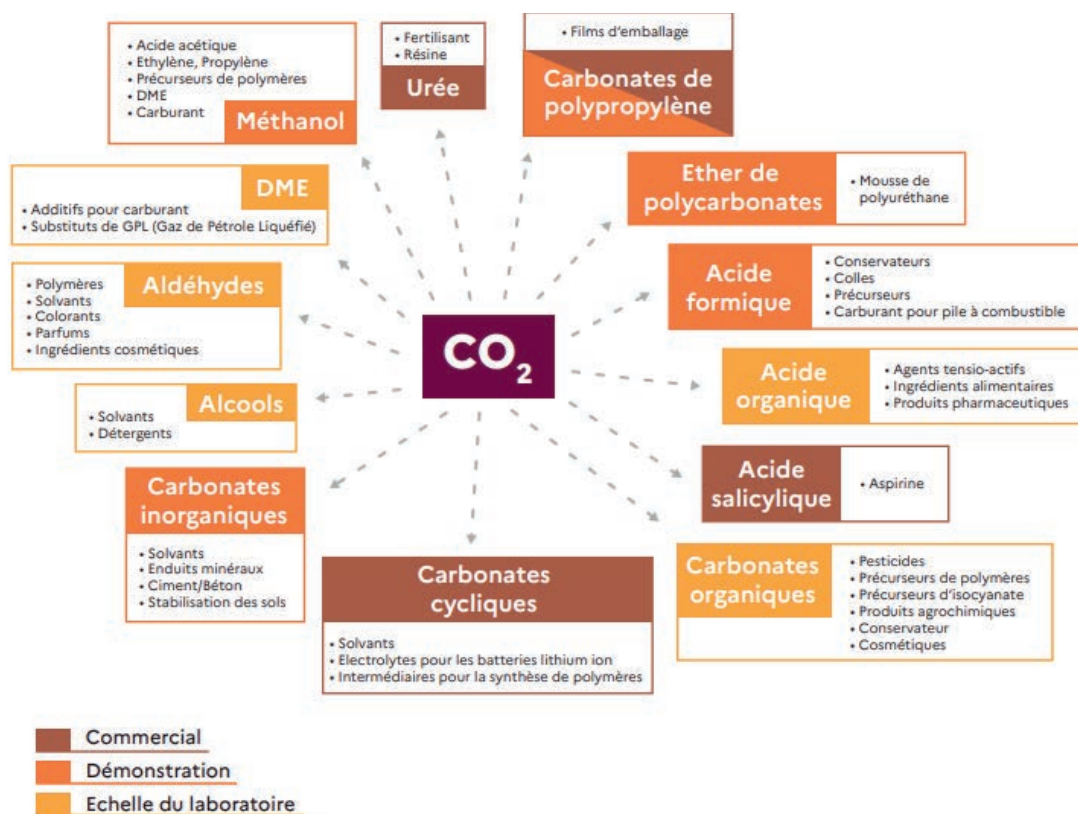


FIGURE 5: REPRÉSENTATION DES PRODUITS ISSUS DE LA VALORISATION DU CO₂ ET DE LEURS NIVEAUX DE MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (IEA, 2019)

Le principe de la valorisation du CO₂

La valorisation du CO₂ consiste à considérer ce composé inorganique comme une matière première qui se capte à la sortie des fumées industrielles et que l'on peut exploiter pour produire des composés chimiques, médicaments ou matériaux de construction. Les voies de valorisation sont de trois ordres :

- utilisation directe du CO₂ (solvant d'extraction, boissons gazeuses, etc.),
- utilisation par transformation chimique,
- utilisation par transformation biologique pour la synthèse de produits.

La valorisation chimique se fait par réaction avec un autre composant et un apport important en énergie (par exemple, l'hydrogène).

Outre sa propre décarbonation, l'activité de la filière chimie peut contribuer positivement à la réduction de l'empreinte environnementale d'autres industries. La feuille de route de la filière identifiée en ce sens quatre piliers d'innovations : la construction d'une filière chimie biosourcée et issue des biotechnologies industrielles biosourcées ; le développement du recyclage chimique ; l'élaboration de nouvelles technologies pour produire des principes actifs et intermédiaires et une contribution à la décarbonation du secteur de la construction/rénovation.



Substituabilité

En se tournant vers la chimie du solide et de la métallurgie ou la chimie du végétal, les recherches font constamment émerger des nouvelles formules, des textures et des structures améliorant les performances des matériaux.

Des solutions à visées technologiques

La chimie peut, par exemple, intervenir face aux problématiques d'approvisionnement en terres dites « rares » et stratégiques, utilisées dans de nombreuses technologies de pointe (éolien, automobile, aérospatial, etc.). Les recherches se tournent actuellement

vers des solutions de substitution ou des procédés de recyclage de ces métaux. Les principales pistes explorées sont :

- Les recherches dans le domaine de la chimie du solide permettant d'obtenir des propriétés magnétiques rivalisant avec celles des aimants permanents issus des métaux rares. Les chercheurs de Siemens travaillent, par exemple, sur des stratégies de remplacement des terres rares des aimants permanents faisant fonctionner les éoliennes. L'entreprise a découvert un procédé de refroidissement des gros aimants. Cette technique permettrait, à terme, de se passer du dysprosium ou du terbium nécessaires pour travailler à haute température.
- Le recyclage des déchets technologiques comme le fait la start-up grenobloise MagREEsources en développant un pilote industriel de recyclage et de refabrication d'aimants. Leur recyclage repose sur un processus de décrépitation par hydrogène, c'est-à-dire un système introduisant un gaz dans les matériaux afin d'en pulvériser la structure et d'obtenir une poudre métallique. Des preuves de concepts sont à l'étude dans les secteurs automobile, éolien et aéronautique.

Des solutions issues de la biomasse

Un autre courant de la chimie, dite chimie du végétal, s'attèle à la formulation de ressources issues de la biomasse. La France est le **2^e acteur européen dans le domaine de la chimie du végétal**. Cette nouvelle filière est basée sur la réduction de ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon). Dans un entretien au Collège de France (2013), Paul Colona, directeur de recherche à l'Inra, définit la chimie du végétal comme une chimie propre, sobre qui recourt à la biomasse pour créer des molécules qui remplacent tout ou partie des molécules venant du carbone fossile. Ces matériaux sont synthétisés à partir de différents composants issus de la biomasse tels que des huiles végétales, des microalgues, des molécules issues du sucre ou des ressources lignocellulosique (bois, paille, tanins ou furane, par exemple).

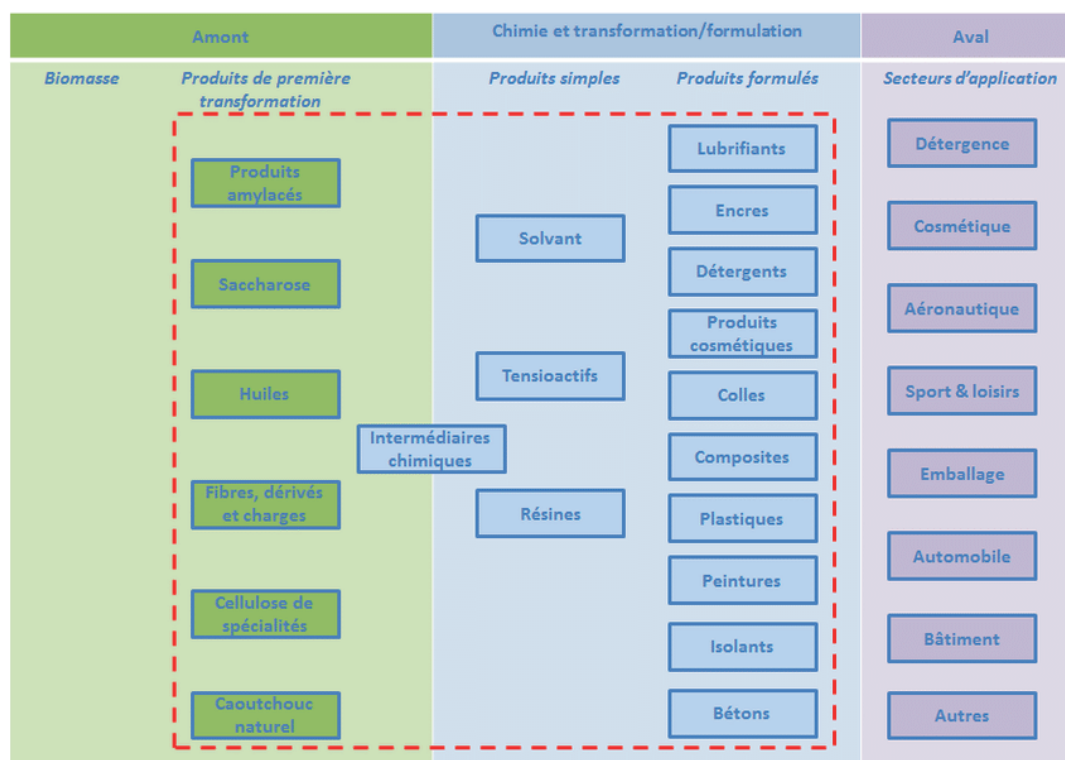
La chimie du végétal représente à ce jour **10% de l'activité chimique française** et, d'après une analyse Xerfi (Berbon, 2021), elle gagne du terrain. En France, la filière pèse 7,5 milliards d'euros et pourrait atteindre une croissance de 15% d'ici 2025. Carine Berbon, collaboratrice de Xerfi, juge cette évolution lente en raison des changements d'approvisionnement qu'elle suppose. Les facteurs de ralentissement de mise en œuvre sont de deux ordres (ALCIMED, ADEME, 2015) :

- Un temps nécessaire à l'industrialisation des filières : «La mise en avant de la valeur ajoutée des molécules biosourcées en chimie et matériaux passera par le soutien à certains segments émergents afin de faciliter leur essor et passer le cap technologique» ;
- Un contexte économique défavorable «en raison de l'émergence des gaz et pétroles de schiste et de la baisse des prix des carbones d'origine fossile».

En Auvergne-Rhône-Alpes, une vingtaine d'entreprises participent au développement de la chaîne de valeur de la chimie végétale. «La filière des produits issus de matières premières végétales a réellement démarré au début des années 2000 avec l'émergence de plusieurs projets. L'investissement des acteurs régionaux a permis une montée en compétences et connaissances qui place la région Auvergne-Rhône-Alpes en référence dans ce domaine», explique Nicolas Sordet, CEO Afyren (Association Chimie du Végétal, 2019).

À titre d'illustration, l'Université Savoie Mont-Blanc a contribué à la création en 2017 de Rhizomex (La Biolle, 73), qui assure la décontamination des terres infestées par des rhizomes de renouée du Japon et leur valorisation par extraction d'un actif naturel recherché dans les secteurs de la cosmétique et nutraceutique⁸. À Grenoble (38), BGene travaille au déploiement d'alternatives à la synthèse pétrochimique. Elle a, par exemple, conçu un procédé à base de résidus de bois utilisé en parfumerie. La start-up prépare la mise sur le marché de molécules produites à l'échelle industrielle.

8. Terme défini par un seul pays, le Canada : «Un nutraceutique est un produit isolé ou purifié à partir d'un aliment, qui est généralement vendu sous la forme d'un médicament» et qui n'a plus rien à voir avec l'aliment. Un nutraceutique doit avoir démontré une activité physiologique bénéfique ou être capable d'assurer une protection contre une maladie chronique. (Académie Nationale de la Pharmacie).



Source : ADEME - Marchés actuels des produits biosourcés – avril 2015

Chaîne de valeur des coproduits et résidus biomasse à usage des filières Chimie et Matériaux (ADEME, 2015). Remarque : d'autres secteurs d'applications ne sont pas représentés, à savoir : la pharmacie, les énergies (biocombustibles et biocarburants), l'alimentation, le bois d'œuvre et la papeterie.

Le manque de centralisation de l'information et la complexité de la chaîne de valeur des différents produits issus des premières transformations de la biomasse offre peu de littérature permettant d'estimer les volumes et évolutions des surfaces agricoles utilisables pour ces débouchés. Une synthèse exhaustive des gisements à fort potentiel ne pourrait être ici présentée. Citons cependant, dans les domaines de la chimie et des matériaux quelques-uns des gisements identifiés par l'ADEME en 2015 et faisant l'objet de projets de R&D :

- Les résidus de cultures agricoles et autres matières secondaires riches en ligno-cellulose issue de l'agro-industrie (pulpe de betterave, coques de tournesol) ;
- Les matières secondaires issues des distilleries viticoles et coproduits de distillation ;
- Les matières secondaires issues de l'industrie papetière.

La plupart des valorisations actuelles de la biomasse concernent les filières alimentaire, agronomique et énergétique. Cependant, les filières chimie et matériaux sont également des voies de valorisation. D'après l'ADEME (2015), la plupart des perspectives de valorisation dans la chimie et les matériaux étaient au stade de R&D. Les travaux menés par l'industrie chimique visent deux logiques :

- **identifier des molécules similaires à celles d'origines fossiles** visant la fabrication de matériaux (plastiques et composites).

Par exemple, Michelin a lancé un programme de substitution d'un des principaux composants des pneumatiques, le caoutchouc synthétique, par l'équivalent dérivé de l'éthylène ex-éthanol biosourcé.

- **inventer des molécules biosourcées possédant de nouvelles performances** et destinées à la cosmétique, l'hygiène, les colles et peintures ou encore, la lubrification de machines agricoles et forestières.

Par exemple, Roquette Frères développe un nouveau monomère, l'isosorbide, dérivé du glucose, utilisable dans la fabrication de polycarbonates, polyuréthanes ou de polyesters.

Les avancées de la chimie dans le domaine des matériaux sont donc liées essentiellement à la fabrication des polymères, colles et composites. Mais la chimie accompagne bien d'autres développements dans des secteurs tels que la pharmacie, la cosmétique, les arômes, etc. Par conséquent, la complexité de cette chaîne de transformation ne permet pas une analyse fine des volumes et gisements de matières premières valorisables. Une étude de l'Ademe (2015) propose néanmoins quatre scénarii dont le plus optimiste, dit « stratégie bioéconomie », se fonde sur une coopération étroite entre les actions publiques et les acteurs industriels. Les projections de volumes, surfaces et surfaces agricoles utiles (SAU) présentées ci-dessous sont établies à partir de ce dernier scénario.

Produits de 1 ^{ère} transformation	2012			2020			2030 (Scénario bioéconomie)		
	Volume (kt)	Surface (ha)	% SAU 2012	Volume (kt)	Surface (ha)	% SAU 2012	Volume (kt)	Surface (ha)	% SAU 2012
Fibres dérivés et charges	117	16 932	0,06%	229	33 186	0,11%	1 009	145 951	0,50%
Huiles	66	59 020	0,20%	173	139 919	0,48%	654	528 294	1,82%
Produits amylicés	35	7 800	0,03%	45	19 694	0,07%	176	39 179	0,14%
Saccharose	180	16 865	0,06%	265	24 803	0,09%	557	52 184	0,18%
TOTAL	398	100 617	0,35%	712	217 602	0,75%	2 395	765 608	2,64%

Tableau 8 : Estimation des tonnages et surfaces françaises maximales nécessaires répondre aux besoins de la chimie et des matériaux à horizons 2020 et 2030



Innovation

La chimie aura un rôle important dans l'évolution des matériaux de demain. De nouvelles voies et de nouvelles pistes sont en réflexion pour résoudre des problématiques de durabilité dans tous les secteurs d'activités où la chimie intervient (mobilité, construction, etc.).

La liste ci-dessous présente six grands domaines d'innovation définis par France Chimie. Quelques exemples d'applications régionales viennent illustrer certaines de ces tendances.

- **Les matériaux composites et recyclables à destination des secteurs du transport, des panneaux solaires et de l'éolien**

Ces matériaux ont pour avantage de réduire le poids des composants et agissent donc sur la consommation énergétique finale.

Implanté en Haute-Loire, le carrossier Solight commercialise par exemple des caissons en panneaux composites recyclables pour équiper des camions. Plus légère que les contreplaqués standards, cette innovation offre un gain de charge utile de 45% et vient réduire la consommation de carburant et les émissions de CO₂ lors des transports.

L'équipementier lyonnais Plastic Omnium fournit une autre illustration de ces avancées en commercialisant des pièces composites en fibres de verre et de carbone.

- **Les futures générations de batteries électriques pour l'automobile**

L'effervescence autour des recherches sur ces batteries tend vers l'amélioration de l'autonomie et de la recharge des véhicules mais aussi leur sécurité en renforçant la stabilité des composants. La prochaine grande étape en développement est celle des batteries solides, c'est-à-dire utilisant un matériau comme le polymère ou la céramique au lieu du liquide comme électrolyte pour stocker et fournir de l'énergie.

Par exemple, le projet KYNAR LYNX de la société Arkema, à Pierre-Bénite, vise à développer et industrialiser un matériau innovant qui optimise le rendement des batteries pour les véhicules électriques. Ce polymère fluoré de haute performance est produit à partir de coproduits de la fabrication de pâte à papier.

- **Les nouvelles filières de recyclage chimique et biochimique des plastiques**

Ces techniques permettent de traiter des matériaux relativement complexes et composés d'un polymère, d'additifs (stabilisants, colorants, etc.) voire d'autres matériaux.

Spécialisée dans la distillation à façon de produits chimiques complexes, Speichim Processing (Saint-Vulbas, 01) projette, par exemple, de lancer un programme de R&D ayant pour objectif de développer de nouveaux procédés de purification de matières chimiques complexes et, d'autre part, de renforcer ses capacités de production et de

déployer une future unité pilote visant à rendre valorisables des déchets chimiques.

- **La chimie du végétal destinée aux BtoC et à la bioproduction (cosmétique, pharmacie, agro-alimentaire, etc.)**

Comme décrite précédemment, cette chimie vise à remplacer la ressource fossile par une ressource biosourcée.

En 2020, par exemple, Michelin s'est associé à des institutions académiques lyonnaises afin de créer ChemistLab, un laboratoire dont la mission est de créer de nouvelles générations d'élastomères entrant dans la composition des pneumatiques, à partir de matières premières biosourçables.

- **Les polymères de hautes performances développant de nouvelles applications pour les matériaux (automobile et aéronautique par exemple)**

Les polymères de haute performance se distinguent par leur résistance lorsqu'ils sont soumis à des conditions sévères comme de hautes températures, des environnements chimiques agressifs ou des contraintes mécaniques.

La société IVA, basée à Meyzieu, a lancé la première production européenne de vernis polyimides. Ces vernis sont utilisés, en raison de leur résistance à haute température, dans les moteurs électriques pour isoler les fils de cuivre bobinés.

- **La fabrication additive visant à développer de nouveaux marchés comme la construction, la médecine, l'aérospatial et la mode**

La fabrication additive se compose de procédés permettant la fabrication d'objets complexes à partir d'ajouts de fines couches de matières (métaux et plastiques notamment) par voie d'impressions 3D. Ces procédés visent notamment un gain de temps de production en supprimant les étapes d'usinage mais aussi un gain de matières premières. Ces méthodes favorisent une production décentralisée et en petites séries.

Constellium, dont le centre R&D C-TEC est basé à Voreppe, s'est, par exemple, lancé dans la fabrication de poudre aluminium haute performance pour le marché de la fabrication additive.

La société drômoise Cop Chimie a, quant à elle, créé des silicones contact-peau dédiés à l'impression 3D permettant de fabriquer des pièces souples qui s'adaptent au secteur de l'orthopédie.



Territoire

La région Auvergne-Rhône-Alpes est la **1^{ère} région de production chimique en France**. Elle regroupe 800 acteurs qui génèrent 32 000 emplois directs, 100 000 emplois indirects et réalisent 12 milliards d'euros de chiffre d'affaires. La filière régionale réalise 500 millions d'euros d'investissements par an et s'investit fortement dans la R&D. En effet, l'Auvergne-Rhône-Alpes concentre près de 25% des moyens alloués à la recherche en chimie dans le pays.

La région accueille cinq des 18 plateformes chimiques françaises :

- **Balan** (01), spécialiste des polymères,
- **Commentry** (03), spécialiste de la chimie fine et de la formulation,
- **Grenoble** (38) plateformes de Jarrie et **Pont de Claix**, spécialistes du chlore, du phosphore et de l'hydrogène,
- **Les Roches-Roussillon** (38), experte des produits organiques et de spécialités
- **Lyon** (69), **Vallée de la Chimie** (14 000 salariés), spécialiste de la chimie de spécialité, des polymères, matériaux à base de silice, complexe pétrochimique et raffinerie.

Avec 26% des émissions de gaz à effet de serre et un quart des consommations énergétiques de la métropole, la Vallée de la Chimie est fortement impliquée dans les ambitions de décarbonation et de transition environnementale, notamment via le développement de l'hydrogène vert. D'importants projets sont ainsi portés par les acteurs de cette plateforme. Un récent article du Journal des entreprises fait mention des projets les plus symboliques tels que Symbio (hydrogène vert) ou Deltalys (filtration de biogaz). Des projets collectifs tels que La ruche industrielle visent également à favoriser la concertation des industriels implantés dans la Vallée de la Chimie.

Les stratégies de souveraineté et de sécurisation des intrants se retrouvent également dans les projets des industriels de la région. En effet, six projets relatifs à la sécurisation des intrants figuraient au volet (Re)localisation dans les secteurs critiques du Plan de Relance 2021 et 3 autres ont été portés en 2022 :

Principales sources utilisées

- Alcimed, Ademe. (2015). [Marché actuel des produits biosourcés et évolutions à horizons 2020 et 2030](#)
- Association Chimie du Végétal. 2019. [Auvergne-Rhône-Alpes : une région référente de la chimie du végétal](#).
- Berbon, C. (2021, 27 septembre). [La chimie du végétal au défi du passage à l'échelle industrielle](#). Fil d'info - Le Blog des secteurs.
- Berthier, D. (2022, 5 septembre). [Lyon : la Vallée de la Chimie peut-elle devenir verte ?](#) Le Journal des Entreprises.
- Bioeconomy for change. (s.d.). Enjeux & perspectives.
- CEA. (2015, 13 mars). [L'essentiel sur la chimie verte](#)
- Chatel, G. (2020). Chemist around the World, Take Your Part in the Circular Economy ! Chemistry – A European Journal, 26(44), 9665-9673.
- Chatel, G., Hugonet, L. (2020, septembre). [La chimie verte : innover différemment](#). Le bulletin Éclaira, 17, 2-3.
- Collège de France. (2013). [Chimie verte et bioénergies - Paul Colonna](#) [vidéo]. YouTube.
- Conseil national de l'industrie. (2018, octobre). [Contrat stratégique de la filière Chimie et matériaux 2018/2022](#)
- Conseil national de l'industrie. (2021, avril) [Décarbonation de l'industrie - Feuille de route de la filière chimie](#)
- Conseil national de l'industrie. (2021, octobre). [Avenant au contrat stratégique de la filière Chimie et matériaux](#)
- Cottineau J. (2022, 20 avril). [Les investissements productifs dans la chimie ont augmenté de 40 % en France en 2021](#). L'usine Nouvelle.
- Deloitte Conseil. (2022). [Gisements de déchets plastiques pouvant être traités par recyclage chimique et physico-chimique en France](#). ADEME (Coll. Expertises).
- DGE. (s.d.). [L'industrie chimique en France](#). Le portail de la Direction générale des entreprises.
- El Khamlichi Aïcha, ADEME. (2021). Valorisation du CO². Quels bénéfices ? Sous quelles conditions ? ADEME (Coll. Expertises).
- Espace Mendès France. (2022, 8 avril). [Chimie biosourcée, pilier de la bioéconomie - Frédéric Bataille](#) [vidéo]. YouTube.
- France Chimie. (2022). [La chimie en France - Faits et chiffres clés](#).
- France Chimie. (s.d.). [Chiffres clés et conjoncture](#).
- France Chimie. (s.d.). [La réduction des émissions de gaz à effet de serre depuis 1990](#)
- France Chimie. (s.d.). [L'industrie de la chimie](#)
- France Chimie. (s.d.). [Les plateformes chimiques, un atout pour la France](#)
- IFPEN. (2022, 14 décembre). Des carburants à la chimie, comment valoriser le CO² capté ? (n°5) [podcast]. Dans Comprendre les énergies de demain.
- Jaravel X., Méjean I. (2021, avril). [Quelle stratégie de résilience dans la mondialisation ?](#) Les notes du conseil d'analyse économique, 64
- Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. (2023). [Feuille de route décarbonation du cycle de vie du bâtiment - Les propositions de la filière](#)
- Observatoire de l'industrie chimique (OPIC). (2020). [L'emploi dans les Industries Chimiques : Région Auvergne-Rhône-Alpes - Édition 2019](#)
- Polyvia. (2023, janvier). [Recyclage chimique : où en sommes-nous ?](#)
- Primas S., Gacquerre A., Montaugé F. (2022, juillet) [Cinq plans pour reconstruire la souveraineté économique](#) (Rapport d'information n°755). Commission des affaires économiques.
- Record (2015). [Recyclage chimique des déchets plastiques : situation et perspectives. État de l'art et avis d'experts](#). 58 p. n°13-0242/1A.
- Volk R., Stallkamp C., Steins JJ., Yogish SP., Müller RC., Stapf D., Schultmann F. [Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways : a german case study](#). J Ind Ecol. 2021;25:1318-1337



FILIÈRE AUTOMOBILE

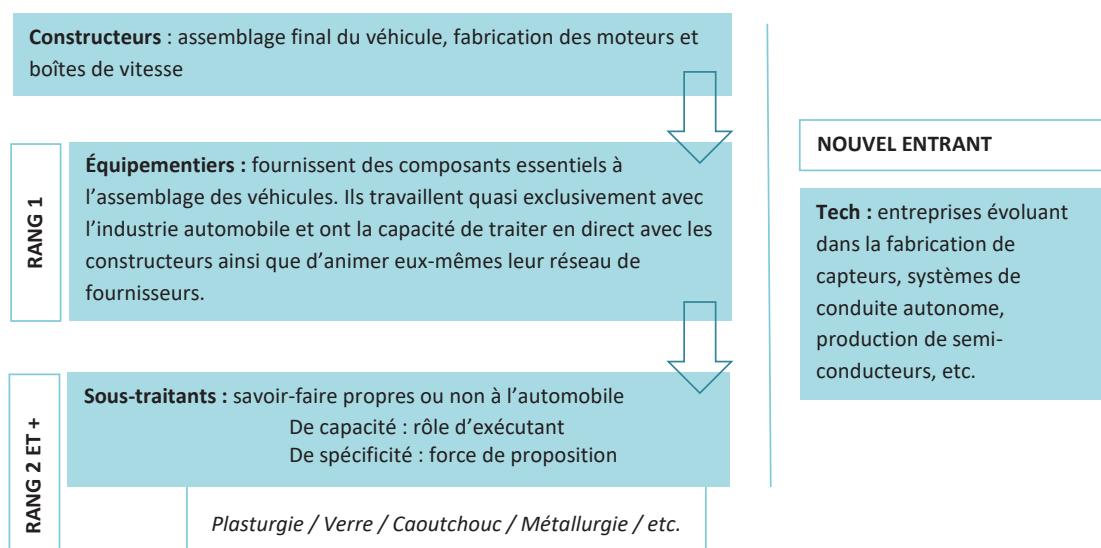


En résumé – L'accord européen *Fit for 55* prévoit une réduction de 100% des émissions de CO₂ des voitures et des camionnettes d'ici 2035 ainsi qu'une interdiction de vendre des véhicules traditionnels à moteur à combustion interne. Cet accord invite les constructeurs européens à accélérer l'électrification de leur gamme. À cela, s'ajoute un accroissement des gammes de véhicules connectés et automatisés. Au croisement de ces mutations technologiques, la filière automobile s'oriente vers une reconfiguration totale de sa chaîne de valeur et une transition vers de nouveaux matériaux innovants. En effet, l'électrification intensifie la concurrence des constructeurs automobiles et met fin au verrou technologique que représentait le moteur thermique. Ces mutations vont donc s'accroître avec pour principal enjeu, la capacité des entreprises françaises à sécuriser leurs approvisionnements, relocaliser les briques technologiques clés et renforcer leurs efforts de R&D.



Organisation de la filière

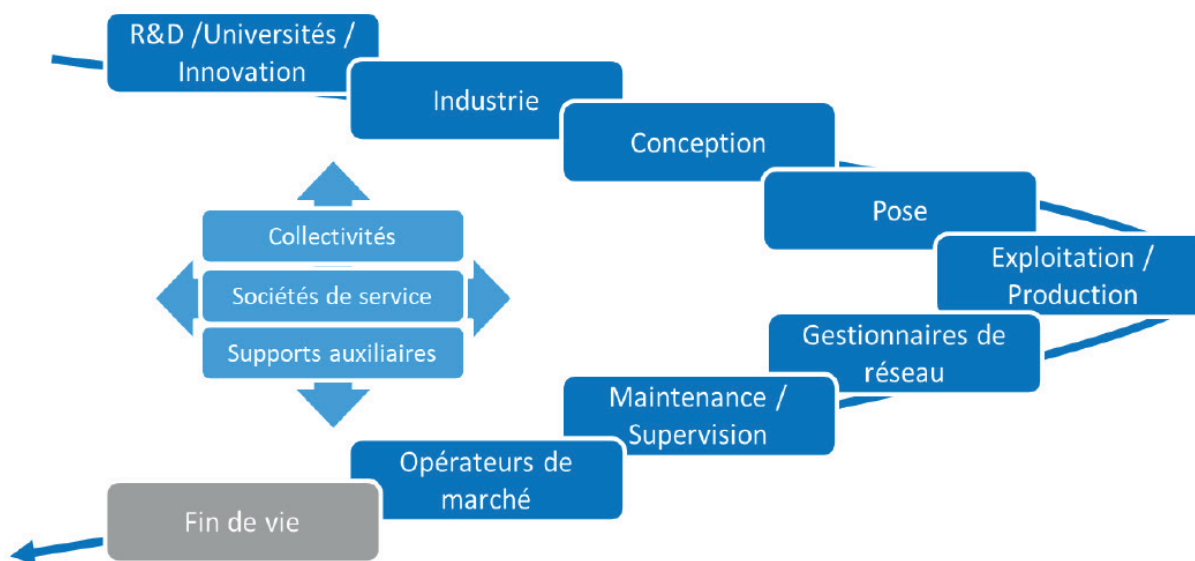
L'amont de la filière regroupe l'ensemble des activités industrielles de production de composants et de véhicules. Suivant une hiérarchie bien établie depuis des décennies, cet écosystème traditionnel réunit les **constructeurs**, les **équipementiers de rang 1** puis les **sous-traitants de rang 2**.



Chaîne de valeur de l'industrie automobile (amont de la filière)

Les constructeurs automobiles ont pour principale activité de produire des véhicules. Si certains grands constructeurs disposent de moyens d'intervention sur l'ensemble de la chaîne de conception, montage et commercialisation des véhicules, la plupart d'entre eux sont uniquement qualifiés d'assembleurs. Ces constructeurs font appel à des **équipementiers** spécialisés dans la fabrication de pièces détachées, d'accessoires et de systèmes de connectivité ou d'intelligence artificielle. Plastic Omnium est, par exemple, un équipementier spécialisé dans les systèmes de carrosserie intelligente, les systèmes d'énergie décarbonée et l'assemblage de modules automobiles. Les **sous-traitants de « rang 2 et + »** peuvent être spécialisés dans des domaines tels que l'ingénierie, la mécanique, la plasturgie, le caoutchouc ou encore l'électronique.

Mais l'automobile évolue vers un écosystème élargi où le véhicule est promis à une meilleure intégration dans les espaces urbains et réseaux de transports intermodaux. C'est pourquoi la filière automobile ne peut être complète sans évoquer son élargissement à un écosystème global de mobilité. Cette filière élargie regroupe l'ensemble des activités du commerce et des services associés aux véhicules. Elle couvre l'ensemble de son cycle de vie, de la commercialisation au recyclage en passant par la maintenance, la sécurité routière et les services de mobilité. Cette prise de recul sur la place de l'automobile dans son écosystème force également les constructeurs à redéfinir une stratégie jusqu'à présent orientée « produit » pour adopter une réflexion sur les « services de mobilité » et construire d'éventuelles alliances entre l'amont et l'aval de la chaîne. Notre étude se concentre sur l'amont industriel de l'automobile, branche la plus directement concernée par les évolutions des technologies et des matériaux.



Chaîne de valeur de la filière aval de l'automobile (PFA, 2021)









Dynamique économique

Filière automobile et mobilité terrestre	Filière amont	Filière avale (volet services)
<p>Chiffre d'affaires : 360 milliards d'euros</p> <p>Valeur ajoutée : 67 milliards d'euros</p> <p>2,2 millions d'emplois directs et indirects</p>	<p>Chiffre d'affaires : 170 milliards d'euros</p> <p>Valeur ajoutée : 35 milliards d'euros</p> <p>50 milliards d'euros à l'export soit 10% des exportations de biens</p> <p>400 000 emplois directs et indirects¹</p>	<p>Chiffre d'affaires : 190 milliards d'euros</p> <p>Valeur ajoutée : 32 milliards d'euros</p> <p>400 000 emplois</p>
<p>Clé de lecture : À l'origine, le CNPA (devenu Mobilians en 2022) est une organisation patronale de défense des intérêts des entreprises de distributions et de services de l'automobile. Il représente les activités du commerce, de la réparation automobile et des services de mobilité (voitures, motos, véhicules industriels, trottinettes, etc.). Les données fournies par l'organisation prennent donc en considération l'ensemble de ces acteurs sous l'appellation « filière automobile et mobilité terrestre ». L'amont regroupe l'ensemble des activités industrielles de production de composants et de véhicules en France. L'aval regroupe l'ensemble du commerce et des services aux véhicules roulants en France. Source : CNPA, 2021 (données 2018)</p>		

1. En 2019, l'Insee recense 212 000 emplois directs auxquels sont ici ajoutés les emplois générés par l'ensemble de l'écosystème, c'est-à-dire « toutes les entreprises fournissant le cœur avec des produits industriels (fabricants de produits électriques et électroniques, de produits en caoutchouc, en plastiques, en textile, en cuir, produits chimiques ou pétroliers raffinés, produits métalliques, mécaniques et de métallurgie) ». Source : Fogelman M. ; Didioui A., 2022.

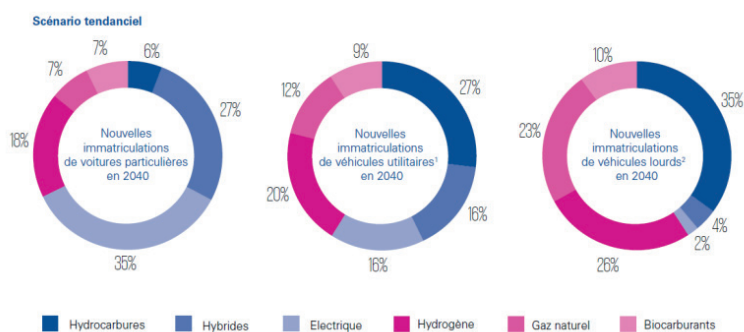
D'années en années, la vente de véhicules neufs est en décroissance. Entre 2004 et 2019, la production de véhicules en France, toute catégorie confondue, s'est rétractée de 40 %, passant de 3,7 millions d'unités à 2,2 millions d'unités. La production automobile a alors basculé d'un solde excédentaire de 13 milliards d'euros à un déficit de 15 milliards d'euros, causé notamment par une chute des exportations. En conséquence, l'emploi a également chuté de 39 % entre 2006 et 2019 (-112 000 emplois). Au 1^{er} janvier 2021, le parc automobile français en circulation est composé de 38 millions de voitures particulières, 6 millions d'utilitaires légers, 600 000 poids lourds et 94 000 autobus. 1,7 million de véhicules légers ont été immatriculés en 2022, soit une chute de 11 % en rapport à l'année précédente. La part de véhicules électriques et hybrides rechargeables a doublé en 10 ans et représente aujourd'hui près de 20 % des ventes.

PRÉLIMINAIRE

	Niveau d'investissement ¹	Nombre de véhicules adressés	Création d'emplois	Impact environnemental ²	Création de valeur ³ , M€
 Batteries électriques	6 600 M€	~2 M	16,900	0,8-3,2 Mt	2,000
 Hydrogène	1 200 M€	75 k	5,600	0,05 Mt	350
 Electronique de puissance	900 M€	~4 M	3,000	0,1 Mt	500
 Connectivité & services	À quantifier	NA	4,000	NA	4,000
 Economie circulaire	275 M€	~0.7 M	7,000	6 Mt Réduction vs production de véhicules neufs	650
 Bornes de recharge	8 500 M€	Parc xEV	tbd	NA	tbd
TOTAL	17 475 M€		35 600	7-9,3 Mt	7 500 M€

Source PFA, 2021 – Investissements indispensables d'ici 2025 pour soutenir la mutation de l'ensemble de la filière

Contrairement à d'autres pays européens, la France n'avait toujours pas retrouvé son niveau de production précédent la crise de 2008 lorsque les effets de la pandémie de Covid-19 se sont fait ressentir. À l'instar des difficultés de l'industrie automobile au niveau mondial, cette période a ainsi creusé davantage le déficit de la filière française (-3,3 milliards d'euros en 2020). La hausse des prix et les pénuries de matériaux (notamment en composants électroniques et plastiques), observés en sortie de crise, complexifient les efforts des équipementiers pour relancer la production. Selon la Direction générale des entreprises (DGE), en juillet 2022, 80 % des fabricants de matériels de transports déclaraient rencontrer des difficultés d'approvisionnement. Si la période 2022-2035 suit cette dynamique négative, il est estimé que le cœur de la filière pourrait perdre 90 000 emplois supplémentaires et faire sortir la France de la compétition mondiale. D'après la Plateforme Automobile (PFA), les principaux postes d'investissements permettant de soutenir l'emploi sont **les batteries électriques** et **l'économie circulaire**.



Source : KPMG, 2021 – Projection de la filière automobile à horizon 2040

Comme l'illustre ce graphique, le cabinet KPMG prévoit une fragmentation du parc automobile européen à horizon 2040. Le paysage qui se dessinerait alors serait majoritairement électrique avec une forte tendance à la mobilité partagée. Les véhicules utilitaires légers et véhicules lourds s'orienteraient davantage vers les biocarburants et l'hydrogène. Selon l'étude, « de nombreux véhicules lourds continueront d'être alimentés

par un diesel plus rentable, notamment à cause du surcoût à l'achat des véhicules alternatifs» (KPMG, 2021). Le scénario européen *Fit for 55* fixe, en effet, un objectif de production de 100 % de véhicules légers électriques à l'horizon 2035 et, d'ici 2030, 70 % de la production sera couverte par l'électrique et l'hybride rechargeable. La Stratégie Nationale Bas Carbone suit cette trajectoire en privilégiant l'électrification des véhicules particuliers. Elle vise 100 % des ventes de voitures électriques auprès des particuliers d'ici 2040 et prévoit une montée progressive du parc électrique en passant par un objectif à 2030 de 35 % de voitures électriques et 10 % d'hybrides rechargeables. À partir de 2030, 2 millions de véhicules électriques seraient ainsi produits chaque année.

Pour les véhicules de marchandise, l'État prend en compte les contraintes de motorisation et vise un mix énergétique entre gaz renouvelable, biocarburants et électrification de ces transports.

Outre le type de motorisation, c'est également le volume des ventes et la cible qui évoluera. Les nouveaux usages de la mobilité auront pour conséquence de réduire le volume des ventes aux particuliers au profit de l'achat de véhicules par des professionnels de la mobilité (ex. location de véhicules pour le tourisme ou l'auto-partage). La Stratégie nationale Bas Carbone estime qu'en maîtrisant l'offre de transports (hausse du télétravail, limitation de l'étalement urbain ou encore, report vers les mobilités actives), il serait possible de réduire de 2 % le trafic de voitures particulières à horizon 2050, en comparaison au trafic de 2015. Par ailleurs, la production de véhicules destinés aux particuliers s'adressera de façon plus intense à une clientèle de professionnels de la mobilité. En effet, l'intensification des offres de transports collectifs ou partagés (location, auto-partage) aura pour conséquence un renouvellement plus fréquent des flottes gérées par ces organisations.



Relations de filière

La disparition progressive du véhicule thermique va lourdement impacter l'activité des constructeurs et fournisseurs de rang 1. En effet, la fin des moteurs thermiques signe la levée d'une barrière à l'entrée pour la Chine qui peinait depuis de nombreuses années à concurrencer les constructeurs historiques sur ce composant clef. La Chine peut, à présent, contourner cette barrière en s'appuyant sur sa maîtrise de la motorisation électrique et son gisement de terres rares. Les sous-traitants automobiles spécialisés dans la production de composants spécifiques aux moteurs thermiques devront, quant à eux, trouver de nouvelles voies de diversification. En effet, une étude commanditée par la PFA (2021) prévoit une baisse d'activités et d'emploi de ces sous-filières, à commencer par le décolletage, l'usinage, le traitement des métaux, la fonderie et la forge. À titre d'exemple, l'électrification des véhicules impacte l'activité des fonderies pour lesquelles l'absence de blocs-moteurs signifie moins de besoins en matières ferreuses. Les acteurs de la métallurgie sont déjà en route vers une diversification de leur activité autour de l'aluminium, un matériau nécessaire à l'électrification.

L'apparition des voitures électriques et des véhicules connectés et automatisés² bouscule également l'écosystème traditionnel de l'industrie automobile en faisant apparaître de nouveaux acteurs issus de la Tech. Ces nouveaux entrants fournissent une brique technologique tellement stratégique qu'elle alimente les ambitions de certains d'entre eux se rêvant à commercialiser des véhicules sous leur propre marque. Parmi les acteurs les plus célèbres, Sony vient de lancer la filiale Sony Honda Mobility et LG a présenté un prototype de robot-taxi (Omnipod) alors qu'Apple laisse planer la rumeur d'une Apple Car. Cette diversification des acteurs de la Tech entraîne un changement profond dans la création de valeur de la chaîne automobile. Le cabinet PwC estime que la part du logiciel dans la valeur des voitures grimpera à 60 % en 2030. Cette nouvelle vague technologique contraint également les constructeurs et équipementiers à nouer des partenariats afin de conserver leur position. À l'inverse, les acteurs de la Tech n'ont pas encore les capacités à s'affranchir des constructeurs. Ainsi, pour son lancement en série prévu en 2025, Sony travaille de concert avec l'équipementier Magna et le constructeur Honda.

2. Un véhicule connecté est équipé de façon à se connecter avec l'extérieur (autres véhicules, infrastructures, etc) et qui reçoit ou envoie des informations (musiques, données de géolocalisation, info-traffic, calcul de la consommation d'énergie, systèmes d'assurances à l'usage type *pay-as-you-drive*, etc.). Un véhicule autonome est quant à lui équipé de technologies d'électronique embarquée (capteurs, caméras, radars, etc.) lui permettant de prendre des décisions indépendamment du conducteur. (Définitions ifpenergiesnouvelles.fr).

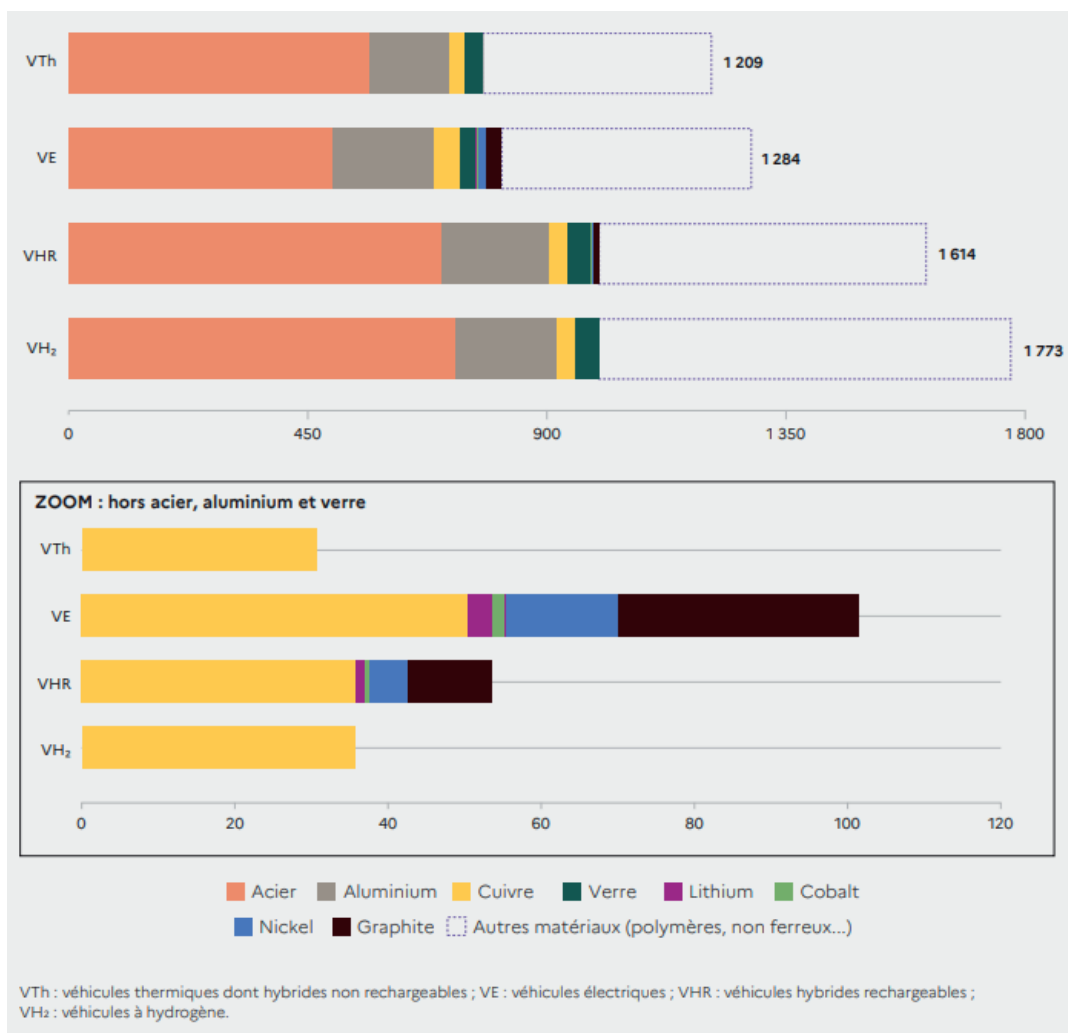


Dépendance/vulnérabilité

Les matériaux jugés stratégiques pour la filière sont principalement liés aux évolutions des architectures des véhicules et aux enjeux de transition énergétique dans l'automobile. L'ADEME a réalisé quatre scénarios vers une France à neutralité carbone d'ici 2050. Sur cette base, une étude prospective (2022) a été menée autour des besoins en matériaux pour le déploiement des véhicules électriques, des EnR électriques et du nucléaire. Pour les voitures électriques, l'ensemble des scénarios fait apparaître une augmentation du besoin en aluminium (entre 25% et 53% de la consommation actuelle, selon les scénarios) et en cuivre (entre 18% et 36%) d'ici 2050 ainsi que des terres rares et matériaux entrant dans la composition des batteries (lithium, cobalt, nickel et graphite). À titre d'exemple, les besoins estimés en graphite pour le secteur seront de l'ordre de 130 000 tonnes à horizon 2025, une valeur qui correspond actuellement à la production mondiale de ce matériau (Delpont, 2020). Ces perspectives sont toutefois à nuancer au regard des performances futures qui pourront être réalisées en matière de recyclage et de relocalisation de certaines productions stratégiques telles que les batteries.

Focus : Tokai COBEX Savoie anticipe la hausse des besoins de graphite

Tokai COBEX Savoie (ex-Carbon Savoie, La Léchère ; implanté à Vénissieux) s'est positionné sur cette problématique d'approvisionnement en graphite essentiel à la production d'aluminium (cuve pour l'électrolyse). Fin 2022 et après plusieurs années de R&D, l'entreprise a officiellement lancé la production d'une poudre de graphite de haute performance et à l'empreinte CO₂ plus faible que celle de ses concurrents asiatiques.



Source : ADEME, 2022 - Besoins matières selon les technologies de traction en kg/véhicule pour un véhicule particulier moyen pour la période 2020-2050.

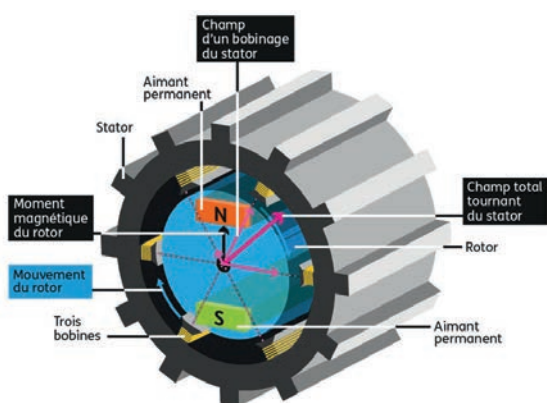
Gildas Bureau³ (2020) a produit une liste des matériaux stratégiques pour l'automobile en regroupant les besoins énoncés par la filière et les enjeux à venir. À partir de cette liste, il définit six leviers stratégiques visant à diminuer les dépendances de la filière aux matériaux critiques. **Ces leviers sont la substitution, la diversification géographique et la sécurisation des approvisionnements, l'économie circulaire, l'intelligence économique et la R&D.**

Métaux pour l'électronique, l'information et la connectivité	Matériaux pour l'électrification	Métaux issus de zones de conflits	Matériaux pour la dépollution des moteurs à combustion interne	Matériaux d'origine naturelle	Matériaux d'origine animale
Lithium, Cobalt, Nickel, Cuivre, Néodyme, Praséodyme, Samarium, Terbium, Dysprosium	Étain, Tantale, Tungstène, Or	Étain, Tantale, Tungstène, Or	Palladium, Platine, Rhodium	Caoutchouc, Mica, Graphite	Cuir

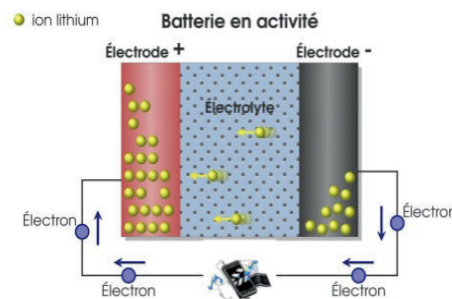
Liste des matériaux stratégiques (Gildas Bureau, 2020)

L'emploi de ces matériaux répond à des enjeux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, des impératifs de sécurité et des développements pour la connectivité des véhicules. Leur importance varie selon le type de motorisation déployé (électrique, hybride ou hydrogène).

Les véhicules électriques



Source : Florent Robert pour I&T (L'Usine Nouvelle, 2021)
- Moteur électrique synchrone à aimants permanents
Le stator est le support des bobines de cuivre. Le rotor est le support des aimants. L'alternateur produit un courant alternatif (dont le sens change continuellement).



Lorsqu'une batterie lithium-ion se décharge, des électrons et des ions lithium passent de l'anode, le pôle négatif, à la cathode, l'électrode positive. Ils font le chemin inverse lors des recharges.

Source : L'Argus, 2022 – Batterie Li-ion
S'il existe de nombreux types de batteries de traction, la batterie Li-ion est devenue la technologie de référence sur le marché de la mobilité électrique. Une batterie est constituée de deux électrodes. L'une contient du lithium, l'autre du phosphate de fer, contenus dans de l'électrolyte liquide.

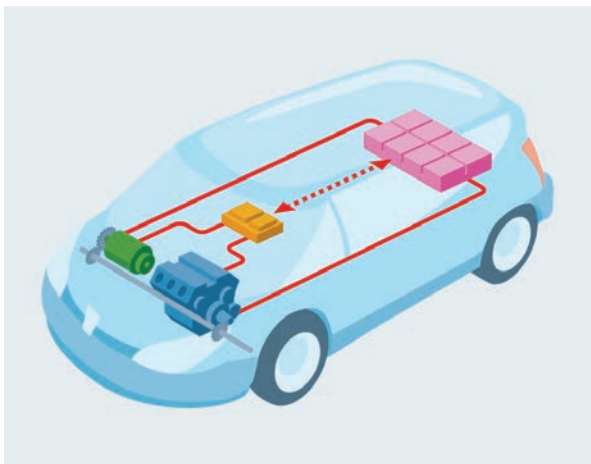
Les principaux composants stratégiques d'un véhicule électrique sont la batterie de traction (généralement Li-ion) qui stocke l'énergie et le moteur électrique (généralement à aimant permanent) qui entraîne les roues.

S'il existe de nombreux types de batteries, la **batterie Li-ion (Lithium, Cobalt, Nickel, Cuivre)** est devenue la technologie de référence sur le marché de la mobilité électrique. Or, à ce jour, 80% des cellules de batterie et des métaux stratégiques qui les composent proviennent d'Asie, et notamment de Chine. Afin de sécuriser l'approvisionnement en

3. Pilote du groupe de travail PFA Filière Automobile et Mobilité, sur les matériaux stratégiques pour l'automobile.

métaux stratégiques pour une mutation énergétique de la filière (nickel, cobalt, lithium, graphite, etc.), le Plan Automobile II (plan France 2030) prévoit d'accompagner la création de «start-ups minières ou technologiques de l'extraction et de la transformation» afin de constituer un vivier de fournisseurs à proximité des gigafactories de batteries. À titre d'exemple, en 2027, le géant minier Imerys prévoit d'exploiter une mine de lithium dans l'Allier. Celle-ci pourrait alimenter jusqu'à 700 000 voitures électriques par an. De plus, deux gigafactories françaises sont en projet. La première est portée par la co-entreprise PSA/Saft (filiale de Total). En construction à Douvrin (Pas-de-Calais, elle lancera sa production fin 2023 et envisage d'être en capacité d'exportation à partir de 2027. La seconde gigafactory est portée par Verkor (Grenoble), une start-up spécialisée dans la microélectronique et l'électrochimie appliquée aux cellules de batteries électriques. La production commencera en 2023 sur le site du Port de Dunkerque.

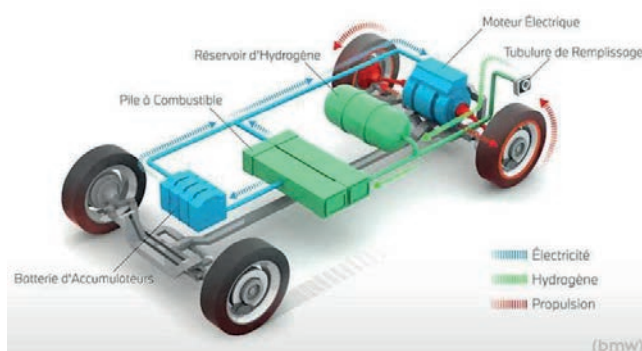
Les véhicules hybrides



Source : IDIX pour Planète Energie, 2018 - Principe général d'un véhicule hybride
Ces véhicules combinent un moteur thermique et un moteur électrique. Au-delà d'une certaine vitesse, le moteur thermique prend le relai. La gestion des deux moteurs est confiée à un ordinateur de bord.

Pour un véhicule hybride, les principaux matériaux stratégiques sont liés à la chaîne de traction thermique et à son système de dépollution (impliquant **des terres rares légères et des platinoïdes** : platine, palladium et rhodium) ainsi qu'aux couplages mécaniques. Ces matériaux entrent donc dans la composition d'aimants permanents (Néodyme, Praséodyme, Dysprosium, Terbium), du stockage d'énergie (Lithium, Nickel, Cobalt, Graphite), de l'électronique de puissance (transistors en Nitrure de gallium ou Carbure de silicium) et de la catalyse embarquée (certains platinoïdes -Pt, Pd, Rh- et des terres rares légères -La, Ce, Y, Nd-).

Les véhicules à hydrogène

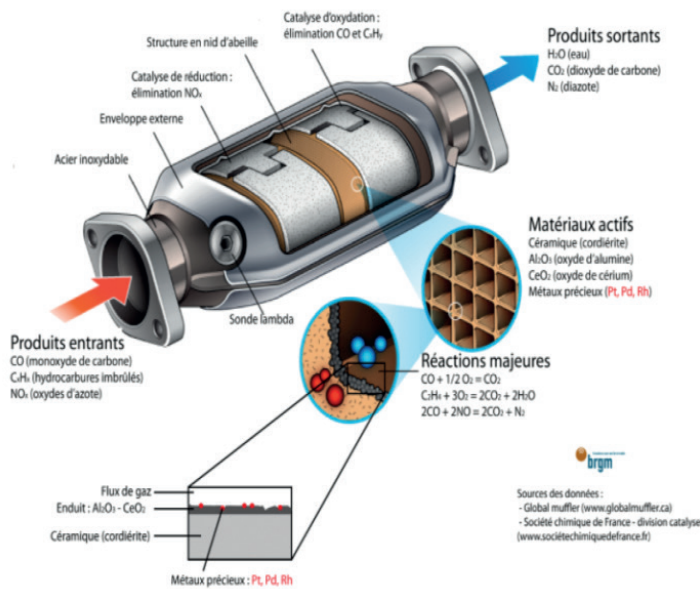


Source : BMW, 2019
Une voiture à hydrogène est une voiture électrique qui puise son énergie d'une pile à combustible alimentée à l'hydrogène. Cette pile transforme l'hydrogène en électricité qui propulse la voiture ou sera stockée dans une batterie. La réaction génère de l'eau (expulsée à l'extérieur) et de la chaleur qui peut être utilisée pour chauffer le véhicule. À la différence d'une batterie, la pile n'a pas besoin d'être rechargée. Elle est alimentée par un combustible, l'hydrogène, et ne stocke pas d'énergie.

Les véhicules à hydrogène, quant à eux, embarquent des technologies de piles à combustibles qui sollicitent l'emploi de platinoïdes dont le platine. Gildas Bureau estime que «l'impact de ces technologies sur le marché du platine n'est pas attendu avant 2025».

Le cas du pot catalytique dans les véhicules thermiques

Schéma général d'un pot catalytique à deux monolithes et position des platinoïdes utilisés



Un autre élément qui recèle de nombreux métaux précieux est le pot catalytique. Propre aux motorisations thermiques, son rôle est de réduire la pollution qui émane des gaz d'échappement. Ces catalyseurs se relèvent gourmands en **platine** (dans le cas des Diesel) et en **palladium et rhodium** (pour les essences). Or, le marché des platinoïdes est fortement impacté par l'évolution des normes antipollution. En effet, la demande pour les catalyseurs représente 78% des usages mondiaux du palladium, 41% de ceux du platine et 80% de ceux du rhodium. Toutefois, les tendances varient selon les cas. Ainsi, la demande européenne de platine pour les véhicules légers diesel est en baisse alors que la demande en palladium croît. Ce phénomène

s'explique tout d'abord par l'adoption d'une norme anti-pollution *Euro 6d-TEM*. Celle-ci requiert l'utilisation de techniques de réduction catalytique sélective (SCR) ne nécessitant pas de platinoïdes. À cela, s'ajoute une baisse des ventes de moteurs diesel au profit des moteurs à essence.

Les véhicules connectés et autonomes

Le développement du marché des véhicules connectés et autonomes est une autre source de pression exercée sur certains matériaux propres à la **filière électronique**.



Circularité

Le recyclage peut intervenir dans le processus stratégique de sécurisation des approvisionnements en réduisant la consommation de matières vierges. Dans un souci de durabilité, l'intégration de pièces recyclées est également devenue une tendance forte du marché. L'accroissement de l'électrique et de l'électronique dans l'automobile rendront le recyclage de certains métaux critiques essentiels. En outre, les estimations relayées par Gildas Bureau prévoient que :

- le **lithium** recyclé ne couvrira que 9% du lithium nécessaire en 2025 ;
- le **cobalt** recyclé couvrira 20% du besoin en 2025 ;
- la production de **cuivre** recyclé sera limitée par la hausse de la demande globale de ce métal dans le cadre de la transition énergétique ;
- le **néodyme** recyclé couvrira 6 à 8% des besoins d'ici 2030 ;
- le **dysprosium** en couvrira 2 à 4%.

Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> • La directive de 2000 sur les Véhicules Hors d'Usage (VHU) permet d'organiser la filière du recyclage et de structurer l'accès à certains composants stratégiques tels que les platinoïdes (présents dans les lignes d'échappement), les composants électriques/électroniques, l'acier et les composants non-métalliques. • La traçabilité des composants automobiles est également un atout pour rendre la filière du recyclage performante. Par exemple, d'ici 2024, chaque batterie commercialisée dans l'UE devra disposer d'un passeport matérialisé par un QR code. • En Europe, le recyclage des catalyseurs est une filière mature. Le marché des Métaux du groupe platine (MPG⁴) est alimenté à hauteur de 25% par du platine et du palladium secondaires. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'accès aux gisements et flux de déchets : 50% des VHU quittent le marché communautaire européen. • Complexification des process d'extraction et de purification des matières. • Dispersion des matériaux critiques à l'intérieur d'un véhicule. Par exemple, les terres rares se répartissent en milligrammes dans de nombreux composants. • Durabilité du cycle de vie du véhicule : les pièces peuvent être utilisées en fin de vie voire reconverties. En respectant la fin de vie d'un véhicule, il est estimé que les déchets liés à un véhicule n'arrivent en phase de recyclage qu'au bout de 15 ans.

Source : d'après « Matières premières, criticités et axes stratégiques des industriels de l'automobile » (Bureau, 2020)

Les avancées les plus attendues en matière de recyclage des matériaux critiques concernent **les platinoïdes, les terres rares et certains composants des véhicules électriques et connectés** :

- **Platinoïdes** : selon l'ADEME, le recyclage des platinoïdes des systèmes de post-traitement catalytiques des émissions à l'échappement des automobiles sont aujourd'hui quasi-totaux (20% de réutilisation et 80% de recyclage).
- **Matériaux des batteries Li-ion** : le recyclage et la récupération des matériaux dans ces batteries vont être renforcés grâce à la refonte de la directive Batteries (2006/66/CE). Plusieurs projets industriels sont en phase de déploiement à l'instar du consortium créé par Renault, Veolia et Solvay, du projet RelieVe porté par Suez et BASF, *Recyvat* par Orano, Paprec, MTB Manufacturing, la Saft et le CEA et plus largement le projet de création d'une filière intégrée du recyclage des batteries lithium soutenu par le Conseil National de l'Industrie.
- **Aimants permanents** : à l'instar de l'alliance créée en 2017 pour le recyclage des batteries, l'Union européenne a lancé en septembre 2020 une alliance pour les matières premières critiques (Erma) afin de construire une filière industrielle des aimants permanents. Plusieurs projets concrets résultent de cette alliance comme *MagREESource* (Grenoble), qui fabrique des aimants recyclés via une technologie d'hydrogénation, ou *Carester* (Lyon), qui a mis en place un démonstrateur d'extraction liquide-liquide pour séparer les terres rares du fer. En phase d'incubation chez Pulsalys (Villeurbanne), *Macaware* utilise, quant à elle, un procédé d'extraction à partir de CO₂ gazeux et d'amines liquides destiné prioritairement aux batteries mais pouvant se répliquer aux aimants.



Décarbonation

Il faudra attendre les années 90 pour voir les modèles électriques prendre leur place sur le marché grâce aux progrès sur les batteries lithium. Depuis, ce marché s'accélère et bénéficie de réglementations européennes favorables. En effet, la feuille de route de l'Union européenne (*Fit for 55*) demande de réduire de 100% les émissions de CO₂ des futurs véhicules légers d'ici 2035. Par conséquent, la filière va connaître des mutations majeures en vue d'atteindre ces objectifs.

4. MPG : Métaux du groupe du platine réunissant sept éléments chimiques appartenant aux métaux dits de transition : ruthénium, rhodium, palladium, osmium, iridium, platine et rhénium.

De nombreux investissements ont déjà été observés ces deux dernières années, notamment pour relocaliser les composants stratégiques des véhicules du futur (batteries, moteurs électriques, modules d'électronique de puissance et briques technologiques hydrogène). En parallèle, les activités dites émergentes (installation de bornes de recharges, modules d'électronique de puissance, batteries, etc.) devraient poursuivre leur croissance.

L'émission de gaz à effet de serre des véhicules électriques reste toutefois relativement ambiguë et suscite des opinions divergentes. En effet, à l'usage, un véhicule électrique s'avère écologiquement plus avantageux. Or, lors de sa production, ce véhicule génère des émissions de gaz à effet de serre encore plus polluantes qu'un véhicule thermique. La production de batteries et notamment l'utilisation des terres rares en est la principale cause. Ces terres, nécessaires à la fabrication des batteries et micro-moteurs électriques, causent divers impacts environnementaux et sanitaires. Les facteurs de pollution liés à l'exploitation des terres rares sont multiples : accumulations de déchets sur les sites d'extraction, séparation des différents métaux présents dans les gisements très consommatrice en énergies, en eau et en produits chimiques, destruction de milieux naturels ou encore, présence d'éléments radioactifs dans ces gisements. En décryptant ce phénomène (Leprince, 2022), Emilie Janots, enseignante chercheuse à l'Université Grenoble Alpes, identifie deux solutions pour limiter l'impact écologique d'une production croissante de technologies telles que l'éolien ou le véhicule électrique : « La question importante sera de savoir comment recycler au maximum des terres rares pour limiter la création de nouveaux sites d'exploitation. La recherche doit également inventer de nouvelles manières d'extraire les terres rares pour limiter l'impact environnemental et les conséquences sur la santé humaine ».

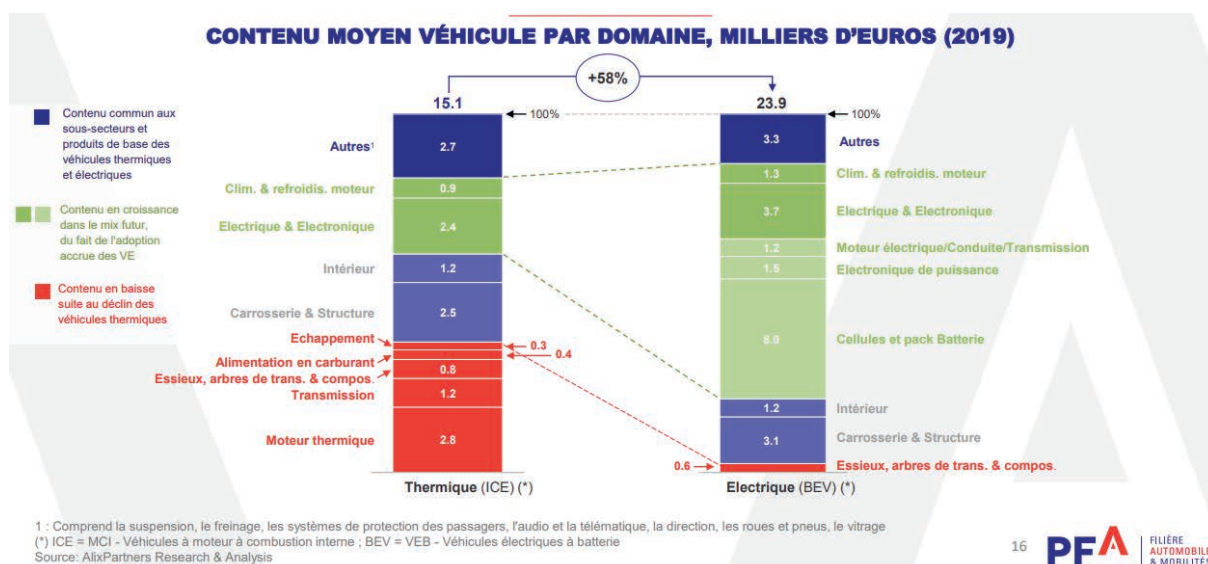
Dans un avis rendu public en octobre 2022, l'ADEME estime l'empreinte d'un véhicule électrique deux à trois fois supérieur au thermique. C'est donc à l'usage qu'un véhicule électrique pourra rembourser sa dette carbone, notamment si la production d'électricité est elle-même décarbonée. Une étude du cabinet Carbone 4 (Amant et al., 2022) précise qu'en tenant compte de cela, un véhicule électrique remboursera sa dette au bout de 30 000 à 40 000 kilomètres parcourus, soit l'équivalent de deux à trois ans de mise en circulation. Cette étude pointe cependant du doigt la problématique de la massification des véhicules. En effet, les besoins énergétiques de ces véhicules vont solliciter davantage de matière et une production de batteries plus lourdes. Répliquer le modèle du SUV thermique à l'électrique aurait un effet beaucoup plus polluant et ce, dans un contexte où la masse des véhicules français a augmenté de 30 % en 30 ans. L'étude conclut à la nécessité de rendre ces véhicules moins énergivores et donc, de les alléger.



Substituabilité

Les constructeurs redoublent d'effort pour faire évoluer les matériaux et répondre aux attentes environnementales tout en préservant la sécurité des usagers. Ces évolutions vont de pair avec des évolutions majeures dans la composition même des véhicules, de plus en plus équipés en contenus électriques et électroniques.

L'acier reste l'un des matériaux les plus présents dans l'automobile. Or, pour alléger les véhicules de nouveaux matériaux se généralisent tels que l'acier à haute résistance, une tôle plus mince permettant de réduire de 20 kg le poids final du véhicule, l'aluminium ou la fibre carbone. En raison de son coût élevé, ce dernier n'entre généralement que dans la composition de véhicules haut de gamme. Mais la principale évolution réside dans la montée en puissance des matériaux composites capables de réduire de 25 % le poids d'un assemblage. Ils présentent de nombreux avantages non négligeables : gain de masse et de sécurité, simplification de la production, réduction des bruits et parfois recyclabilité. Avec un investissement de 300 millions d'euros sur son site de Tavaux, le chimiste Solvay (Le Figaro, 2022) compte par exemple produire des plastiques PVDF pour batteries, une application qui permettrait de réduire de 20 à 50 % le poids d'un véhicule et d'améliorer de 10 % l'efficacité des batteries. Parmi les autres applications automobiles envisagées, le groupe mise sur l'allègement des carrosseries et entend développer l'utilisation de composites thermoplastiques capables de remplacer certaines pièces d'acier.



Source : PFA, 2021 - Comparaison du contenu d'un véhicule thermique et électrique.

Concernant les terres rares, certains éléments intervenant dans la fabrication des aimants permanents pourraient devenir critiques. Remarquons tout d'abord que les aimants permanents ne sont pas propres aux modèles électriques. Plusieurs kilos d'aimants sont en effet utilisés dans les micro-moteurs des véhicules (moteur de traction, lève-vitre, essuie-glace, etc.). Le véhicule électrique est d'autant plus concerné puisque son moteur principal dit « moteur synchrone à aimant permanent » est mis en mouvement par le champ magnétique de ces aimants. Or, ces derniers se composent d'environ 30 % de terres rares, de néodyme (Nd) combiné au terbium (Tb) et au dysprosium (Dy). En 2020, environ 70 % de la production européenne de moteurs montés sur les véhicules électriques étaient de ce type. Toutefois, ces alliages sont dits « critiques » et les constructeurs cherchent à réduire la teneur de ces derniers dans la composition des aimants. L'ADEME (2022) estime donc qu'il est « important que les fabricants poursuivent leurs efforts de substitution de ces éléments dans les génératrices d'éoliennes en mer et les moteurs des véhicules ».

Les tendances de substitution aux terres rares présentes dans les aimants ciblent actuellement le développement de nano-poudres. Une autre tendance en phase de développement consiste à réduire la teneur en néodyme par une combinaison néodyme, lanthane (La) et cérium (Ce), des terres rares plus légères, plus abondantes moins coûteuses et sous-utilisées. Nora Dempsey, physicienne au sein de l'institut Néel (Grenoble) et lauréate de la médaille de l'innovation 2021 du CNRS, est l'une des chercheuses qui travaille au développement de ces micro-aimants. La start-up MicroMagFab est en cours de création sur la base de ses travaux et devrait commercialiser des micro-aimants pour la création de systèmes microélectromagnétiques (MEMS).

Des technologies alternatives sans utilisation de terres rares sont également disponibles sur le marché à l'instar de la Renault Zoe ou de la Tesla Model S. L'équipementier allemand Mahle (Transition & Énergies, 2021) a récemment réalisé une avancée considérable pour la durabilité et la performance de ces technologies et prévoit une industrialisation d'ici 2023. Aussi, l'ADEME avance « qu'il n'est pas possible [...] de se prononcer avec certitude sur l'usage des terres rares et [estime] que le besoin devrait pouvoir être contenu avec un marché en mesure de s'adapter ».



Innovation

Comme évoqué précédemment, la sécurisation des matériaux stratégiques conduit à **relocaliser la production de cellules pour batteries**. Il s'agit d'ailleurs d'une des priorités inscrite dans la feuille de route de la filière qui porte l'ambition d'accroître de 20 % sa position sur le marché européen d'ici 2030.

De nouvelles technologies sont donc susceptibles de voir le jour dans la prochaine décennie⁵ en améliorant la performance et la sécurité de ces composants (inflammabilité, charge/décharge). Des efforts de R&D sont donc à déployer pour élaborer les batteries de 4^e génération dites «**batteries à électrolytes solides**» (c'est-à-dire sans électrolyte liquide), qui promettent une densité énergétique record et une capacité de charge ultra-rapide. L'utilisation d'un électrolyte liquide serait donc remplacée par un matériau solide de type céramique ou polymère. L'arrivée de ces batteries, dans les prochaines années, pourrait révolutionner le marché des voitures électriques.

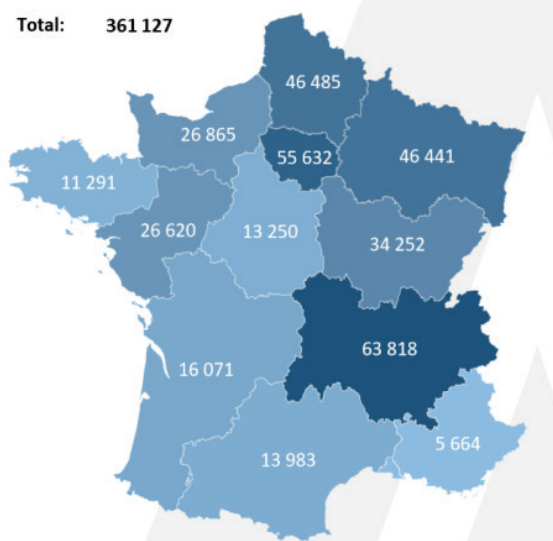
Avantages technologiques souhaités	Freins au déploiement
<ul style="list-style-type: none"> • Renforcement de la sécurité. • Recharge plus rapide. • Meilleure densité énergétique (permet de stocker davantage d'énergie à poids équivalent). • Baisse des coûts de production : utilisation de moins de matériaux. • Renforcement de la durée de vie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Choix des matériaux en cours d'optimisation. Ces électrolytes doivent gagner le pari d'être stable, chimiquement inerte et conducteur. Par exemple, les batteries en électrolyse polymère de Bluecar Bolloré obligent à brancher en quasi permanence le véhicule pour chauffer le matériau. • Durée de vie encore invalidée. • Coût des batteries : actuellement 8 fois supérieure aux batteries lithium-ion.

Source : propos rapportés par l'Argus dans un article du 24 juillet 2022.



Territoire

EFFECTIFS PAR RÉGION (HORS INTÉRIMAIRES)



Source : PFA, 2021

En Auvergne-Rhône-Alpes, la filière amont automobile représente 15% des effectifs nationaux. La région ne se caractérise pas par une forte activité automobile. Elle est davantage spécialisée dans la construction d'utilitaires et de véhicules de loisirs. Cependant, le territoire dispose d'une forte densité de sous-traitants de rang 1 (Plastic Omnium ou Valeo, par exemple) et surtout de sous-traitants de rang 2 et +, qui sont spécialisés dans le décolletage, la mécanique, la transformation de métaux ou encore, la plasturgie. La région abrite également, à Clermont-Ferrand, l'un des leaders mondiaux du pneu, l'entreprise Michelin. Celle-ci compte près de 20 000 salariés répartis à travers 16 unités industrielles. Clermont-Ferrand rassemble l'ensemble des pôles de responsabilité du groupe et accueille 3 400 chercheurs. C'est donc depuis cette commune que le manufacturier mène ses opérations de R&D et développe de nouveaux matériaux.

Michelin, Plastic Omnium ou encore Forvia, qui a implanté une filiale lyonnaise spécialisée dans les matériaux durables (Materi'Act), bénéficient tous de l'intelligence collective des entreprises installées dans la région. En effet, grâce aux missions des pôles de compétitivité comme Axelera ou Polymeris et de leurs groupes de travail conjoints, les entreprises automobiles de la région mutualisent leurs compétences pour faire avancer l'ensemble de la filière, de l'amont jusqu'à l'aval.

Positionnée comme 1^{er} fournisseur national de technologies, la région se veut active dans la conception des systèmes de mobilité innovants. Cependant, la filière automobile de la région a perdu 20% de ses effectifs entre 2008 et 2019. Cette situation reste moins alarmante que la moyenne française (-29%) ne le suggère. Une analyse de l'emploi et

5. La feuille de route de la filière indique que le cycle d'introduction d'une technologie de cellule de rupture se situe entre 6 et 8 ans.

des compétences dans la filière automobile (Observatoire de la métallurgie, 2021) laisse entendre que cette région de sous-traitance devrait mieux résister que les autres. Trois facteurs de réussites sont évoqués : le développement de la filière hydrogène, la diversification des sous-traitants et un environnement technologique de haut niveau⁶.

Une voie de diversification profitable à la filière de la mobilité active

À la faveur du développement de nouveaux usages, le nombre de vélos vendus en France en 2021 a dépassé le nombre de ventes de voitures. De nombreux acteurs sont présents en Auvergne-Rhône-Alpes et plus particulièrement autour de la métropole de Lyon. Ces acteurs se sont réunis au sein du cluster Cara Active Mobility qui comptait 107 adhérents en 2021.

	Industrie vélo française	Industrie auto française
Nb d'articles vendus (millions ; 2020) :	2,686	2,5
Dont produits ou assemblés en France	0,8 (30%)	1,7 (68%)
CA (Mds € ; 2020)	3,021	227
Emplois en France	2 000	400 000
Prix moyen d'un véhicule	794€	26 000€
Nb de fabricants/constructeurs en France	120 ⁶	Une dizaine ⁷

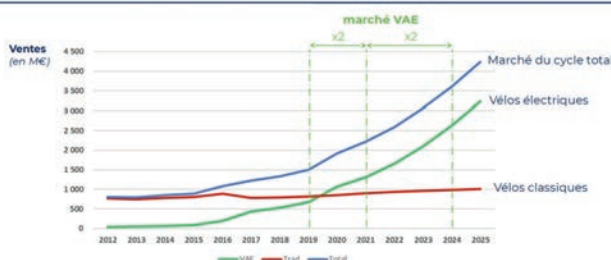
La structuration de la filière cycle, actuellement à ses débuts, trouve déjà une affinité avec l'industrie automobile. Après des décennies de suprématie de l'automobile et une perte de savoir-faire dans la fabrication de cycles, les acteurs du vélo resurgissent avec pour principale

Source : PFA, 2021.

entraîne les délais et coûts imputés à leur dépendance aux fournisseurs de composants et produits finis asiatiques. Avec le retour au Made in France, certaines marques comme Cyclik arrivent à concevoir des vélos faisant appel à d'autres types d'approvisionnements. L'entreprise s'est, en effet, lancée dans la fabrication d'un vélo à partir de matières premières françaises. Le bambou, utilisé pour le cadre et plus performant que l'aluminium, est issu de la bamboueraie d'Anduze dans le Gard, le lin provient de Normandie et les pièces métalliques sont fabriquées en Haute-Savoie.

Afin d'aboutir à un modèle d'industrialisation souverain, la filière envisage également une coordination avec le secteur automobile. Une alliance se dessine avec les sous-traitants automobiles qui disposent des capacités de fabrication de pièces et d'innovation.

Une progression du marché en valeur très soutenue par le développement VAE



Source : USC, 2022 cité dans CARA

Cette alliance est aussi une opportunité pour les fournisseurs automobiles de rang 1 dont le déclin d'activité serait alors en partie compensé par une diversification dans les mobilités actives. La croissance estimée du marché du vélo et du VAE (vélo à assistance électrique) d'ici 2050 pourrait ainsi absorber un tiers, voire la moitié des pertes d'emplois potentiels dans le secteur de la sous-traitance automobile. Les projets portés par le cluster, MAD Industrie et Coopératives d'achat, en sont les précurseurs locaux

mais d'autres initiatives industrielles nationales ou européennes actent l'intérêt des équipementiers automobile pour cette diversification d'activités.

Les travaux publiés par le cluster Cara nous informent quant au potentiel de transfert d'emploi de l'automobile vers le vélo en indiquant que l'industrie automobile pourrait perdre 373 000 emplois à l'horizon 2045 tandis que l'industrie du vélo en gagnerait 232 000 (d'après une étude réalisée par Shift Project). Cara souligne également la pertinence de cette restructuration, dont les besoins technologiques et investissement R&D sont similaires : fabrication de batteries, motorisation et intelligence embarquée. Jérôme Mortal, directeur des Nouvelles mobilités de Valeo, indiquait, par exemple à l'Usine Nouvelle (2021), les efforts fournis par la société pour se développer vers les cycles. Il annonçait l'installation de lignes d'assemblage à Lyon en précisant la similitude de cette production avec les composants et briques technologiques fournies à l'industrie automobile.

6. Symbio, coentreprise entre Faurecia et Michelin a, par exemple, créé en 2021 la Symbio Hydrogen Academy qui dispense une formation spécifique pour assurer le déploiement de la filière hydrogène.

Principales sources utilisées

- ADEME. 2022. «Voitures électriques et bornes de recharge». Les Avis de l'ADEME. - <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/5877-avis-de-l-ademe-voitures-electriques-et-bornes-de-recharges.html>
- Amant S., Mallet C., Meunier N., Sorret J. et Subtil M., 2022. « Les idées reçues sur la voiture électrique ». Carbone 4. - <https://www.carbone4.com/analyse-faq-voiture-electrique>
- BG Conseil, 2022. «Étude prospective filière vélo - Quelles alliances entre l'industrie du vélo et l'industrie automobile ?». CARA. - <https://s3.cara.eu/uploads/sites/2/2022/07/Synthese-Etude-filiere-BG-conseil.pdf>
- CNPA. (2021). *Un impératif de transformation de l'Aval de la filière automobile en France à horizon 2030 afin de créer de la valeur et les emplois de demain*. - <https://www.am-today.com/sites/default/files/articles/62446/210930-cnpa20-20transformation20aval20-203020septembre-1.pdf>
- Delpont L., 2020. «Carbone Savoie monte dans l' Airbus des batteries». in Les Echos (mis en ligne le 9 mars 2020). - <https://www.lesechos.fr/pme-regions/auvergne-rhone-alpes/carbone-savoie-monte-dans-l-airbus-des-batteries-1183324#:~:text=Sp%C3%A9cialiste%20du%20graphite%20pour%20le,les%20batteries%20de%20v%C3%A9hicules%20C%C3%A9lectriques>
- Feitz A., 2021. «Auto : les constructeurs tentent de garder la main sur l'intelligence embarquée». Les Échos (mis en ligne le 6 août 2021). - <https://www.lesechos.fr/industrie-services/automobile/auto-les-constructeurs-tentent-de-garder-la-main-sur-l-intelligence-embarquee-1337451>
- Fogelman M., Didioui A. (2022, octobre). *Transformations et défis de la filière automobile* (Les Thémas de la DGE, n°4). DGE. - <https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/en-pratique/etudes-et-statistiques/themas/transformation-et-defis-de-la-filiere-automobile.pdf>
- France Industrie, non daté. «Industrie automobile», (consulté en octobre 2022). <https://www.france-industrie.pro/industrie-automobile/>
- Gaillard C., 2021. «L'Europe débloque 2,9 milliards d'euros pour une recherche partagée sur les batteries». in L'Automobile & L'Entreprise. - <https://www.auto-infos.fr/article/l-europe-debloque-2-9-milliards-d-euros-pour-une-recherche-partagee-sur-les-batteries.229519>
- IFP Énergies Nouvelles. (s.d.). *Le véhicule connecté et autonome*. - <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospectives/decryptages/transports/vehicule-connecte-et-autonome>
- KPMG, 2021. «Driving the change - Étude prospective sur le secteur automobile en France».
- Leblanc J., 2022. «Batterie solide. Où en est l'avenir annoncé de la voiture électrique ?». L'Argus (mis en ligne le 24 juillet). - <https://www.largus.fr/actualite-automobile/batterie-solide-ou-en-est-l-avenir-annonce-de-la-voiture-electrique-10849391.html>
- Le Figaro. 2022. «Batteries : en investissant 300 millions d'euros en France, le chimiste Solvay mise sur l'automobile». mise en ligne le 2 février 2022. - <https://www.lefigaro.fr/flash-eco/batteries-en-investissant-300-millions-d-euros-en-france-le-chimiste-solvay-mise-sur-l-automobile-20220202>
- Leprince L. 2022. «Les terres rares : le paradoxe environnemental ». CNRS (mis en ligne le 22 avril 2022). - <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/les-terres-rares-le-paradoxe-environnemental>
- L'Observatoire de la Métallurgie, 2013. «La filière automobile "amont" : étude des besoins de compétences actuels et futurs au niveau régional». https://www.observatoire-metallurgie.fr/sites/default/files/documents/2018-02/etude_automobile_0.pdf
- L'Usine Nouvelle, 2022. «Pas d'aimants, pas de transition énergétique». mis en ligne le 11 janvier 2022. - <https://www.usinenouvelle.com/article/2021-en-techno-pas-d-aimants-pas-de-transition-energetique.N1805667>
- Minéral Info, 2018. «Impacts des normes antipollution sur la demande mondiale en platinoïdes : cas du platine, du palladium et du rhodium». - <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/impacts-des-normes-antipollution-sur-demande-mondiale-platinoïdes-cas-du-platine-du>
- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. (2022, mars). *Stratégie nationale bas-carbone - La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*. - https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf
- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. 2021. «Données sur le parc automobile français au 1^{er} janvier 2021». - <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-le-parc-automobile-francais-au-1er-janvier-2021#:~:text=Au%201er%20janvier%202021%2C%20le,autobus%20et%20autocars%20en%20circulation.>
- Mondial de l'Auto, 2022. «Les fonderies françaises aussi font leur transition vers l'électrique». mis en ligne le 24 août 2022. <https://mondial.paris/actualite/fonderies-transition-electrique-6637.html#item=1>
- Mondial de l'Auto, 2022. «Quand les entreprises de la tech veulent concurrencer les constructeurs automobiles». mis en ligne le 25 juillet 2022. - <https://mondial.paris/actualite/voitures-electriques/entreprises-de-tech-veulent-concurrencer-constructeurs-automobiles-5357.html#item=3>
- Mondial de l'Auto, 2022. «Transition énergétique : un défi qui a commencé en 1970 !». mis en ligne le 7 septembre 2022. - <https://mondial.paris/actualite/voitures-a-hydrogene/transition-energetique-defi-commence-1970-7083.html#item=1>

- Mondial de l'Auto, 2022. «Un prototype de batteries recyclées bientôt commercialisé !». mis en ligne le 1^{er} septembre 2022. - <https://mondial.paris/actualite/voitures-electriques/batteries-recyclees-prototype-northvolt-6848.html#item=1>
- Mondial de l'Auto, 2022. «Voitures électriques : un passeport de traçabilité des batteries». mis en ligne le 24 septembre 2022. - <https://mondial.paris/actualite/voitures-electriques/voitures-electriques-passeport-tracabilite-batteries-8147.html#item=1>
- Nipper A., 2021. «Grâce aux micro-aimants, nous réduirons le néodyme présent dans les aimants haute performance, avance la médaille de l'innovation Nora Dempsey». in L'Usine Nouvelle. mis en ligne le 18 novembre 2022. - <https://www.usinenouvelle.com/article/grace-aux-micro-aimants-nous-reduirons-le-neodyme-present-dans-les-aimants-haute-performance-avance-la-medaille-de-l-innovation-nora-dempsey.N1806192>
- PFA, 2020. «Les priorités technologiques de la filière automobile et mobilités». - https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/industrie/feuille_de_route_pfa_version_finale_10h27.pdf
- PFA, 2021. «Feuille de route de la filière automobile à l'horizon 2030 - Réussir la transition énergétique et digitale». - <https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2021/10/Feuille-de-route-filie%CC%80re-auto-a%CC%80-2030-vF.pdf>
- PFA, 2022. «Le marché automobile français». - <https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2022/12/Dossier-de-presse-11-22-PFA-1.pdf>
- Sauze M. ; Barbusse S., 2022. « Transition(s) 2050 - Choisir maintenant, agir pour le climat : feuilleton - Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique ». Ademe. - https://librairie.ademe.fr/cadic/6842/feuilleton_materiaux_de_la_te_transitions2050_ademe.pdf
- Transition & Energies, 2021. « Le moteur électrique sans aimants, durable et performant, qui pourrait tout changer ». mis en ligne le 14 mai 2021. - <https://www.transitionsenergies.com/moteur-electrique-sans-aimants-durable-performant-tout-changer/>



FILIÈRE ÉNERGIES RENOUVELABLES ET RÉSEAUX ÉLECTRIQUES



En résumé – Les nouvelles énergies renouvelables (éoliennes et photovoltaïque notamment) jouent un rôle incontournable dans la trajectoire de neutralité carbone française. À l'échelle métropolitaine, le solaire photovoltaïque est la principale filière de développement d'électricité renouvelable, favorisant l'indépendance énergétique du territoire. La diversité des technologies disponibles, leur robustesse d'ensemble ainsi que les innovations potentielles, exposent relativement peu ces filières à des risques spécifiques de criticité ou de rupture, qui peuvent toutefois peser plus largement sur la perspective d'électrification décarbonée dans laquelle elles s'inscrivent, par exemple sur le développement du véhicule électrique. Parallèlement, la production de nouvelles capacités éoliennes et photovoltaïques peut davantage être affectée par une rareté croissante de métaux courants mais plus critiques, comme le cuivre et l'argent, en fonction de l'évolution des besoins de l'économie de manière plus générale. Enfin, l'adaptation du réseau électrique et de son fonctionnement à mesure de leur intégration constitue également un enjeu important.



Organisation de la filière

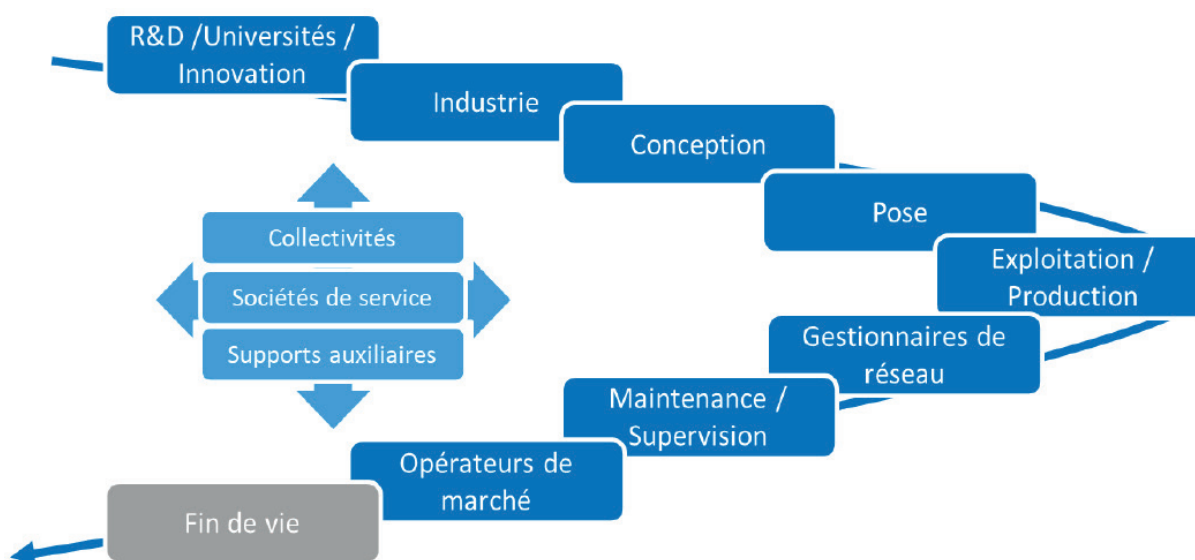
On qualifie de manière générale de « nouvelles énergies renouvelables » les moyens de production d'électricité parvenus récemment à maturité que constituent en particulier l'éolien et le photovoltaïque, par opposition aux filières plus anciennes que sont l'hydroélectricité et la filière bois. L'appellation « nouvelle » inclut également les filières en émergence, telles que les hydroliennes, dont le degré de maturité reste toutefois insuffisant aujourd'hui pour qualifier le potentiel et plus encore les enjeux du point de vue des matériaux.

Les activités constitutives de la production d'électricité à partir des nouvelles énergies renouvelables, au sens donc du développement rapide du photovoltaïque et de l'éolien, peuvent s'analyser selon trois dimensions :

- **une chaîne de valeur horizontale** liée au déploiement des installations de production d'électricité, qui se décline projet par projet et qui intègre les étapes classiques du développement de projets de ce type :
 - le développement initial, inclus le portage et l'ingénierie de pré-projet ;
 - la fourniture du système de production d'énergie et des autres composants nécessaires à l'installation de production, intégrant des composants de structure, des composants électriques, des systèmes électroniques et mécaniques, et leur assemblage ;
 - l'installation sur site et la mise en service, allant elle-même de l'ingénierie de conception et des travaux préparatoires sur site à la logistique d'installation et aux activités de viabilisation ;
 - l'exploitation, qui recouvre outre les activités d'exploitation proprement dites, de nouveaux besoins d'ingénierie, des services et de la maintenance ;
 - la gestion de la fin de vie, incluant le démontage et le recyclage et selon les cas, le renouvellement des moyens de production ou le démantèlement et la remise en état du site.

- **une chaîne de valeur verticale** liée à la fabrication industrielle en masse des moyens de production spécifiques de ces nouvelles énergies, qui recouvre de manière tout aussi classique :
 - la recherche et développement ;
 - les études d'ingénierie et de conception ;
 - l'extraction et la transformation des matériaux bruts nécessaires à la construction des moyens de production (silicium des panneaux photovoltaïques, fibres de verre, de carbone ou composés polymères des éoliennes, métaux entrant dans leur fabrication, béton...) ;
 - la fabrication des composants et l'assemblage des équipements en usine ;
 - leur acheminement vers les sites.
- **une chaîne de valeur transversale** liée à l'intégration de l'ensemble de ces nouveaux moyens de production dans le système électrique, du point de vue du fonctionnement du réseau et de l'équilibrage du système. Il s'agit notamment d'adapter le système à deux caractéristiques nouvelles de ces moyens de production, par rapport aux structures en place : le caractère beaucoup plus décentralisé de leur implantation, et la nature variable et fatale, bien que prévisible, de leur production. Cette chaîne comprend notamment :
 - la planification et l'intégration au système des nouveaux moyens de production concernés ;
 - l'adaptation et l'extension du réseau électrique pour permettre leur connexion, du niveau très haute tension au réseau de distribution ;
 - le déploiement de nouveaux moyens de flexibilité, tels que le pilotage de certaines consommations, et de stockage, du niveau infra-journalier au niveau inter-saisonnier ;
 - la mise au point et le déploiement d'éléments de stabilisation en tension et en fréquence du réseau, associés notamment à l'électronique de puissance.

Les typologies d'acteurs impliqués dans la filière photovoltaïque sont représentées de la manière suivante dans le rapport PERSES – Projet d'Enquête Régionale Sur l'Énergie Solaire en Auvergne Rhône Alpes :



Catégories d'acteurs de la chaîne de valeur des nouvelles énergies renouvelables électriques (Aura digital solaire, AuRA EE, INES, 2021)

Les conditions de mise en œuvre des chaînes horizontale et verticale sont évidemment différentes selon les filières : pour la chaîne horizontale elles dépendent notamment de la taille des projets et des conditions d'implantation, tandis que les filières industrielles sont pour l'essentiel distinctes selon le type d'énergie dans la dimension verticale. En revanche, la chaîne de valeur transversale, même si les besoins et les solutions techniques peuvent dans le détail être différents selon le type et la taille des moyens de production, traite bien de manière intégrée l'ensemble de ces solutions. Il est aussi à noter que la phase de « pose » implique de plus nombreuses entreprises de construction (études géotechniques, terrassement, fondations) dans la filière éolienne que dans la filière photovoltaïque.



Dynamique économique

Les énergies éolienne et photovoltaïque, bien qu'obéissant à des structurations industrielles et territoriales relativement similaires mais bien distinctes, voient du point de vue économique leur destin relativement lié. En effet, si leur niveau de développement peut s'avérer différent, c'est bien leur déploiement commun qui est aujourd'hui au cœur des enjeux de décarbonation de l'énergie.

Au niveau mondial, les investissements dans ces énergies renouvelables représentent presque la moitié des investissements directs dans la transition énergétique, dont Bloomberg New Energy Finance estime qu'ils ont dépassé pour la première fois en 2022 les investissements dans les énergies fossiles, à hauteur de 1 100 milliards de dollars. Leur déploiement est rapide : la production d'électricité annuelle mondiale d'éolien et de photovoltaïque a été multipliée par 5,7 entre 2011 et 2021, dépassant pour la première fois le seuil de 10 % du mix électrique. Cette croissance est appelée à se poursuivre, avec un rythme de déploiement de plus en plus rapide. Le scénario *Net Zero Émissions 2050* de l'Agence internationale de l'énergie projette par exemple un doublement de la production électrique mondiale d'ici à 2050, avec une part de 70 % pour l'éolien et le photovoltaïque réunis – soit une production 17 fois plus élevée qu'aujourd'hui.

La dynamique est plus mitigée en France, d'abord parce que cette croissance est avant tout tirée par les économies émergentes, où la croissance de la demande en électricité est la plus vive, mais aussi parce que notre pays a plus tardé que d'autres à soutenir ces filières. Ainsi, la France était la seule dans l'Union européenne à ne pas atteindre fin 2020 la part d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale à laquelle elle s'était engagée en 2010. Malgré cela, un fort développement peut être anticipé, à la fois du fait de la compétitivité croissante de ces modes de production, et de son besoin dans la stratégie de décarbonation nationale.

À court et moyen terme, les rythmes actuels de déploiement restent insuffisants, et le gouvernement comme les filières concernées se mobilisent pour atteindre les objectifs que la France s'est fixés :

- pour l'éolien terrestre, avec à peine plus de 20 GW installés fin 2022, et un rythme moyen de 1 GW par an, l'objectif fixé à fin 2023 par la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), soit 24,1 GW, ne sera pas atteint. L'objectif à 2028, de 33,2 à 34,7 GW, ne le sera qu'avec une accélération importante ;
- pour l'éolien en mer, la filière a pris beaucoup de retard, les premières mises en service du premier parc n'intervenant qu'en 2022. L'objectif PPE de 2,4 GW fin 2023 ne sera pas atteint, mais l'objectif de 5,2 à 6,2 GW en 2028 peut l'être si les appels d'offre lancés ou programmés trouvent des suites positives ;
- pour le photovoltaïque, avec 16 GW environ fin 2022, dont 2 GW installés dans l'année, l'objectif PPE fin 2023 de 20,1 GW a peu de chances d'être atteint. Une accélération peut en revanche permettre d'atteindre le niveau de 35,1 à 44 GW en 2028.

D'une manière générale, ces perspectives constituent un potentiel particulièrement intéressant de développement économique à l'échelle nationale. L'éolien terrestre et l'éolien offshore représentent ensemble le premier secteur d'emploi dans les énergies renouvelables, avec plus de 26 000 emplois sur le territoire national, dont près de $\frac{3}{4}$ dans l'éolien terrestre et $\frac{1}{4}$ dans l'éolien offshore, qui connaît une forte progression. L'emploi dans la filière photovoltaïque, après avoir connu un pic autour de 32 000 emplois il y a

une dizaine d'années, dont plus de 85 % ont été perdus avec l'abandon d'une filière de fabrication française, connaît à nouveau une belle dynamique, avec plus de 12 000 emplois consolidés en 2020 et une progression estimée supérieure à 60 % en 2021 pour s'approcher des 20 000 emplois.

Ensemble, les trois filières dépassent un chiffre d'affaires de 13 milliards d'euros par an, alors même que les investissements de la France restent faibles dans ce domaine : selon l'évaluation de Bloomberg NEF, les investissements dans la transition énergétique de la France en 2022 n'ont porté qu'à moins de 20 % sur les énergies renouvelables, contre près de 50 % en moyenne mondiale.

Qu'il s'agisse d'éolien ou de photovoltaïque, une partie importante de l'activité générée est directement rattachée aux sites, depuis les études et travaux nécessaires à la première installation, puis la maintenance et l'exploitation, et le démantèlement ou l'éventuel remplacement. Le déploiement de ces énergies renouvelables permet donc la création d'emplois non délocalisables, relativement bien répartis dans les régions, et de longue durée. Les perspectives de déploiement des filières sont donc porteuses à coup sûr d'une forte opportunité économique pour tous les territoires.

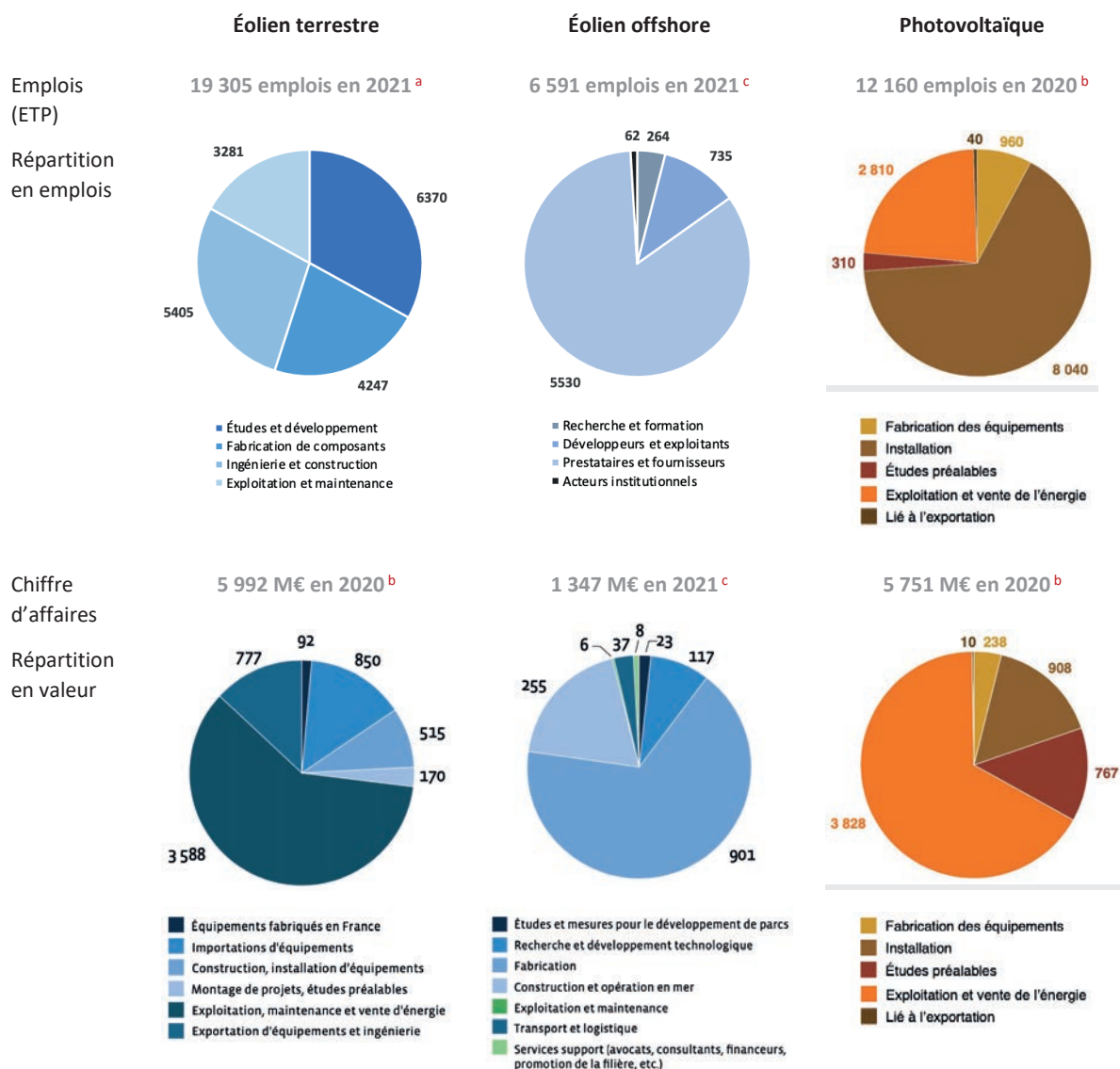
La fabrication des éoliennes – turbines, mâts et pales – et des panneaux photovoltaïques – modules et onduleurs – échappe toutefois pour une large part à la création de valeur en France, la majeure partie de cette production étant aujourd'hui importée, pour une part d'Europe dans le cas de l'éolien et pour l'essentiel de Chine dans le cas du photovoltaïque. Les éoliennes et les panneaux représentent pourtant entre 30 et 40 % du coût total d'investissement dans les projets de fermes éoliennes terrestres ou *offshores* ou de centrales photovoltaïques. Il existe donc un vrai enjeu économique de relocalisation des usines de fabrication de composants éoliens et de modules photovoltaïques.

Le réseau électrique

La dynamique économique porte aussi, au-delà des filières elles-mêmes, sur la mobilisation d'investissements et d'activités nécessaires à la bonne évolution, à mesure que ces moyens de production se développent, du système électrique dans sa globalité.

Il s'agit d'abord du réseau. Pour le réseau de transport (haute et très haute tension) dans son *Schéma décennal de développement du réseau* (SDDR) de 2020, RTE a évalué le besoin d'investissement supplémentaire pour l'adaptation aux renouvelables à 600 millions d'euros par an – par rapport à une base liée au développement et à la maintenance courante de 1,3 milliard par an. Il s'agit principalement du raccordement de projets d'éolien offshore au réseau, mais aussi d'adaptation du réseau et de ses équipements (relais, etc.) et de renforcement ciblé des interconnexions (avec des implications matériaux plus ou moins critiques selon qu'elles concernent ceux du réseau électrique, cuivre notamment, de l'électronique de puissance, et du génie civil, acier et béton par exemple). Dans son rapport de 2021 sur les *Éléments de prospective du réseau public de distribution d'électricité à l'horizon 2050*, Énedis a pour sa part chiffré les besoins, en première instance et de façon majorante, à 2 milliards d'euros par an pour intégrer au réseau de distribution de nouveaux projets au rythme voulu par la PPE, et davantage si ce rythme devait s'accélérer.

Emplois et chiffre d'affaire par filière renouvelable (France métropolitaine)



Sources : ^a. Estimations Institut négaWatt, d'après FEE, *Observatoire de l'éolien 2022*, septembre 2022.
^b. Observ'ER, *Le Baromètre 2022 des énergies renouvelables électriques en France*, janvier 2023, d'après ADEME, 2022.
^c. Données pour l'ensemble des énergies marines (dont 96 % pour l'éolien en mer), Observatoire des énergies de la mer, *Énergies marines renouvelables : les investissements et les emplois au rendez-vous*, juin 2022.

Ces actions sur le réseau ont vocation à être progressivement complétées par les innovations et activités nécessaires pour déployer, au rythme approprié, les moyens nécessaires au maintien de la tenue du système, en équilibre offre-demande et en tension. Il s'agit pour l'essentiel d'investissement dans des solutions de pilotage de la demande, permettant d'effacer certains usages ou d'en faire coïncider d'autres avec les pics de production, et dans des solutions de stockage, depuis les batteries jusqu'au « power-to-gas »¹, en passant par tous les échelons intermédiaires en termes d'énergie et de durée de stockage. Les besoins économiques dans ces quelques domaines restent difficiles à évaluer mais ils peuvent sans doute se chiffrer, compte tenu des volumes en jeu dans les différents scénarios, à plusieurs milliards d'euros par an.

1. Le *power-to-gas* se réfère à la formation d'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité excédentaire, ainsi qu'à son éventuelle recombinaison avec du CO₂ pour former et stocker du méthane de synthèse.



Relations de filière

Photovoltaïque et éolien

Les filières du photovoltaïque et de l'éolien constituent d'ores et déjà des filières industrielles matures et autonomes, là où les autres nouvelles filières de production d'électricité renouvelable comme les différentes technologies houlomotrices – utilisant l'énergie du mouvement de la houle – par exemple restent à une étape plus expérimentale.

La filière photovoltaïque se caractérise par un niveau d'intégration relativement faible avec d'autres filières. Les procédés de fabrication des panneaux lui sont en effet relativement spécifiques, tandis que les procédés mis en œuvre dans la filière éolienne, qu'il s'agisse de la métallurgie des mâts ou de la plasturgie des pales, relèvent plutôt de déclinaisons pour cette filière de procédés communs avec d'autres filières. Les composants électriques ou électroniques mis en œuvre dans ces moyens de production ne présentent par ailleurs pas de particularité notable, mais soulignent le lien évident avec ces deux filières industrielles.

Le tableau résume les besoins en matière caractéristiques par capacité de production, en moyenne sur les filières toutes technologies confondues, du photovoltaïque (en distinguant les centrales au sol et le diffus) et de l'éolien (en distinguant terrestre et offshore).

Principaux matériaux mobilisés pour l'installation de capacités de production photovoltaïque ou éolienne

En kg de matériau / MW	Photovoltaïque		Éolien	
	au sol	en toiture	terrestre	offshore
Métaux				
Acier	102 600	7 400	113 000	326 000
Ferroalliages	2 100	2 100	5 000	14 425
Aluminium	20 000	30 000	2000	2 000
Cuivre	3 000	3 000	3000	10 000
Molybdène		200	180	220
<i>métaux spécifiques au photovoltaïque</i>				
Argent	19,1	19,1		
Cadmium	0,84	1		
Indium	12,5	12,5		
Gallium	22,2	22,2		
Germanium	0,91			
Selenium	0,42	0,22		
Silicium	2 930	2 930		
Tellure	7,75	7,75		
Vanadium		2		
<i>métaux spécifiques à l'éolien</i>				
Chrome			599	456
Dysprosium			1,27	20,5
Manganèse			423	423
Néodyme			36,2	141,3
Nickel			400	400
Niobium			38	38
Praséodyme			3	20
Terbium			1	3
Yttrium			1,69	27,2
Zinc			5500	5 500
Minéraux				
Béton	15 400		390 000	263 000
Verre plat	54 000	68 000		
Granulats				567 000
Composites				
Verre autre			6 820	9 920
Résines thermodurcissables			4 180	6 080

Source : Estimations Institut négaWatt (2022) pour le modèle entrées-sorties négaMat, d'après ADEME, Ecofys, Ecoinvent, Hespul, JRC.

Les métaux présentés ne sont pas tous impliqués dans l'ensemble des technologies de la filière. Par exemple : seule la technologie photovoltaïque dite de CIGS utilise deux métaux rares : l'indium et le gallium, seule une partie des technologies éolienne synchrone utilisent du néodyme et du dysprosium.

Du point de vue des relations de ces filières avec des activités industrielles plus amont, liées à l'extraction des matériaux primaires et à leur transformation pour les besoins manufacturiers, la fabrication et l'installation des moyens de production éolien et photovoltaïque présentent peu d'enjeux particuliers. Qu'il s'agisse du **béton** des fondations, des **métaux** nécessaires aux structures (acier) ou aux composants électriques (aluminium, cuivre...) et électroniques ainsi que les **mousses** et **fibres des pales**, les matériaux nécessaires sont pour l'essentiel communs à d'autres filières et ces énergies renouvelables ne représentent en général qu'une fraction relativement modeste des besoins, loin d'être structurante pour ces filières amont.

Le cas du **silicium** représente une exception notable : si la majorité de la consommation de silicium dans le monde entre dans la production d'alliages d'aluminium (43% de la consommation totale en 2019), utilisés notamment dans l'automobile, et de silicones (37%), la production de cellules photovoltaïques, avec 18% de la consommation totale, représente surtout plus de 90% de la demande de silicium polycristallin de qualité électronique, extrêmement purifié (le reste correspond essentiellement aux besoins de l'électronique).

À l'aval de la fabrication des panneaux ou des éoliennes, les activités liées à l'implantation sur site des installations présentent peu d'enjeux notables d'intégration avec d'autres filières, à l'exception de l'éolien *offshore*, dont les infrastructures support des éoliennes constituent des ouvrages massifs. Cela vaut pour l'éolien dit planté, et la réalisation des fondations incluant le forage de pieux comme pour l'éolien flottant, qui s'appuie sur des plateformes comparables à celles de l'industrie pétrolière.

Des sujets relatifs à l'intégration interviennent également, sous des angles divers, dans la phase d'exploitation. Ceux-ci concernent notamment les compétitions d'usage des sols, et les solutions de co-activité. L'éolien terrestre, s'il n'est pas incompatible avec le maintien de certaines productions agricoles, ne présente pas non plus de synergies particulières avec les activités agricoles. Le photovoltaïque en revanche, selon les logiques d'implantation appliquées aux parcs au sol en particulier, peut venir confisquer des sols et entrer en compétition avec d'autres activités, agricoles ou forestières, ou s'intégrer au contraire dans des logiques de complémentarité voire de synergie : c'est le cas vis-à-vis de l'agriculture avec les nouvelles pratiques dites d'agrivoltaïsme, ou vis-à-vis de certaines activités industrielles lorsque les parcs photovoltaïques viennent utilement valoriser des friches industrielles ou, mieux encore, participer à des efforts de reconversion de sites industriels pollués tels que les raffineries.

L'éolien *offshore* interagit pour sa part avec la filière de la pêche industrielle, de par son impact sur les zones de pêche et la ressource halieutique ; au-delà des contraintes de circulation des navires, ou des perturbations sonores notamment pour la faune liées à la construction, cet impact peut être positif, via le double effet de la création d'une réserve et de la formation de récifs autour de leurs structures.

Filières mobilisées pour l'adaptation du système électrique

Les nouvelles énergies renouvelables électriques, au sens du développement rapide du photovoltaïque et de l'éolien, et potentiellement d'autres qui suivent comme l'hydrolien, ont enfin vocation à s'intégrer fortement avec d'autres filières (*power-to-gas* par exemple) dans la perspective de l'évolution du fonctionnement du système électrique qui doit accompagner leur pénétration croissante. Il reste difficile, dans ce domaine qui reste fortement ouvert, d'identifier les dynamiques d'intégration les plus structurantes. On peut néanmoins pointer quelques enjeux d'ores et déjà bien cernés, comme l'impulsion que donne cette perspective à tout le secteur de l'électronique de puissance, mobilisée autour de l'évolution des services systèmes nécessaires au fonctionnement du système électrique, au secteur des batteries, ou encore à la mobilisation de différentes filières pour adapter leurs outils au besoin de fourniture de *power-to-gas*.

Le déploiement des renouvelables, directement ou à travers des briques telles que le *power-to-gas*, vient pour finir s'intégrer dans une transformation profonde des modèles de certaines activités industrielles lourdes. La nécessité de s'appuyer sur des procédés décarbonés ouvre par exemple des perspectives importantes d'association entre les nouvelles énergies renouvelables et la production d'acier comme de l'ensemble des filières utilisant l'hydrogène comme matière première (industrie de l'ammoniac, etc.), pour lesquelles l'électrolyse doit se substituer aux filières actuelles de craquage du méthane. Dans un autre registre, certaines industries plus ou moins électro-intensives commencent à reconsidérer leur modèle en cherchant à s'appuyer sur une production renouvelable, via des partenariats ou en propre sur leur site, qu'elles associent à des capacités de stockage pour assurer leur secours électrique tout en fournissant sur cette base des services au système électrique, dessinant la perspective de nouveaux écosystèmes industriels.

Globalement, les relations des filières des nouvelles énergies renouvelables électriques avec d'autres filières apparaissent davantage comme des forces et des opportunités que comme des points éventuels de fragilité. Dans une perspective de développement de ces moyens de production, cette interaction apporte à la fois une perspective de réorientation bienvenue pour des filières menacées par la transition énergétique et des possibilités de synergies bénéfiques à l'ensemble de l'économie.



Dépendance/vulnérabilité

Du point de vue de la souveraineté, le déploiement des énergies renouvelables électriques consiste au premier ordre à remplacer des filières de production énergétique s'appuyant sur des stocks épuisables et massivement importés, qu'il s'agisse des ressources fossiles ou de l'uranium nécessaire au fonctionnement du nucléaire, par des filières s'appuyant sur des flux disponibles localement. Quelle que soit l'analyse que l'on fait des dépendances associées à l'importation de ces ressources et de leur évolution dans le temps, ce transfert vers une ressource primaire qui n'est par nature sujette ni à tensions d'approvisionnement ni à concurrence d'accès est en soi un atout.

Ce remplacement peut néanmoins engendrer un transfert de dépendance sur les ressources non énergétiques nécessaires à ces filières renouvelables qui pourrait s'avérer tout aussi problématique. La souveraineté s'évalue alors à l'aune de la maîtrise des technologies et filières de production d'une part ; et des besoins en matériaux d'autre part.

Sur le plan des technologies d'abord, l'accès aux moyens de production d'énergie photovoltaïque et éolienne, aux capacités de fabrication de ces outils de production et aux ressources nécessaires à cette fabrication est aujourd'hui assez généralisé dans le monde. Ainsi, même si l'amélioration des procédés reste un enjeu de compétitivité sur l'ensemble de la chaîne de valeur, on n'identifie pas de barrière à l'accès de la France aux différentes technologies nécessaires – les retards constatés aujourd'hui sont plutôt imputables à des problèmes de compétitivité comparative par rapport à des fabrications délocalisées ou d'acceptabilité de l'implantation locale des capacités de production.

Au contraire, l'investissement industriel dans ces filières pourrait permettre à l'industrie nationale de se replacer dans la course du point de vue de l'innovation et de la captation de la valeur générée par leur développement international. Ainsi, la France pourrait faire le choix industriel, pour sa souveraineté énergétique, de relocaliser une part importante de la production des équipements éoliens et photovoltaïques. Dans le domaine éolien, elle a notamment l'opportunité, même si elle a pris beaucoup de retard, de reconstituer autour de ses activités de chantiers navals et d'exploitation offshore une filière d'éolien en mer conforme à ses besoins de développement et positionnée à l'exportation. Dans le domaine du photovoltaïque, elle peut comme d'autres pays européens l'envisagent ou le font déjà, à commencer par l'Allemagne, se doter de gigafactories de production de panneaux. Dans le cadre d'une stratégie de relocalisation de la production de panneaux, la France pourrait à la fois développer de façon plus massive l'investissement dans les technologies éprouvées et s'engager dans le développement de nouvelles technologies (cellules pérovskite, panneaux organiques, photovoltaïque à couche mince, etc.).

La maîtrise des technologies et la capacité de relocalisation industrielle ne permettent toutefois pas de s'affranchir des besoins d'importation, puisque a minima les matériaux nécessaires à la construction et à l'exploitation de ces moyens de production ne sont, pour une large part, pas disponibles en quantité suffisante sur le territoire (voir section substituabilité).



Circularité

La circularité potentielle des filières de production d'énergie renouvelable électrique repose d'abord sur la capacité technologique à recycler les matériaux utilisés dans ces moyens de production après leur arrêt. Le recyclage des éléments correspondants est de plus en plus encadré. Ainsi, les fabricants de panneaux photovoltaïques et des onduleurs associés ont par exemple l'obligation réglementaire d'assurer la collecte et le recyclage des équipements dans le cadre de la Directive européenne DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques), depuis sa transposition dans le droit français en 2005. En pratique, l'éco-organisme en charge de la collecte pour traitement des panneaux photovoltaïques en fin de vie est SOREN, qui est membre de l'association PV Cycle opérant à l'échelle européenne. De plus, les systèmes photovoltaïques ayant obtenu un tarif d'achat ou un complément de rémunération ont l'obligation d'être recyclés lors du démantèlement de l'installation. De la même manière, les derniers appels d'offre sur l'éolien offshore intégraient une clause de recyclabilité intégrale de leurs matériaux.

Le taux moyen de recyclage des matériaux contenus dans les panneaux photovoltaïques est estimé aujourd'hui à 90%, avec des taux allant jusqu'à 97%. Un même niveau est visé à terme pour les éoliennes, lorsque les solutions seront apportées à la principale limite au recyclage de leurs composants, qui concerne les pales : celles-ci sont aujourd'hui fabriquées en mousse recouverte de fibre plastique thermoformée, et ce procédé thermique fait obstacle à la recyclabilité de ces fibres. La possibilité de remplacer le matériau de ces coques par une fibre extrudée permet désormais ce recyclage.

Les taux d'incorporation de matières issues de recyclage dans la fabrication des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des éléments systèmes associés restent cependant, comme dans le reste de l'économie, globalement très limités. C'est dans l'amélioration de ce taux d'incorporation que réside pour l'essentiel l'amélioration de la circularité des filières renouvelables.

Ce potentiel doit tenir compte de la durée de vie des équipements et du rythme de croissance du parc. La capacité des filières éolien et photovoltaïque à recycler leurs propres matières est fonction du rapport au moment voulu entre le volume nécessaire à la construction de nouveaux moyens de production et le volume de matériaux issus du déclassement d'équipements, qui lui-même reflète le volume construit dans le passé. On projette une durée de vie d'au moins vingt à trente ans pour les panneaux photovoltaïques ou les éoliennes. Par conséquent, la filière ne peut compter que partiellement sur le recyclage de ses propres matières tant qu'elle reste en forte croissance. Toutefois les principaux composants dont ont besoin les éoliennes et les panneaux photovoltaïques, en proportion massique, sont des matériaux suffisamment courants (verre, aluminium, acier) pour que la filière bénéficie de matières recyclées issues d'autres activités industrielles (construction, automobile, etc.). Sur des métaux plus spécifiques comme les composants des aimants permanents des éoliennes offshore, qui consomment aujourd'hui par exemple 10% environ du néodyme à l'échelle mondiale, des filières de recyclage après broyage existent déjà en Chine ou au Japon et se mettent en place aux États-Unis et en Europe.



Décarbonation

Les nouvelles énergies renouvelables sont bien sûr au cœur des stratégies de décarbonation. Elles forment, avec la filière nucléaire, les seules options pour maintenir et renforcer la décarbonation de la production d'électricité, qui peut à son tour participer plus largement à décarboner l'ensemble du système énergétique grâce à l'électrification des usages.

La production d'énergie par l'éolien ou le photovoltaïque n'émet évidemment pas directement de gaz à effet de serre, contrairement à la combustion des énergies fossiles. Néanmoins, tirer le plein bénéfice de cette caractéristique dans une stratégie de réduction des émissions suppose de maîtriser trois enjeux.

Le premier concerne les émissions indirectes liées à la production de ces filières, c'est-à-dire leur contenu en CO₂ équivalent en analyse cycle de vie. Il est estimé en France par l'ADEME à 14 g CO₂éq/kWh pour l'éolien terrestre, 16 g CO₂éq/kWh pour l'éolien offshore, et 44 g CO₂éq/kWh pour les centrales photovoltaïques, soit 9 à 28 fois moins qu'une centrale au gaz et 22 à 70 fois moins qu'une centrale au charbon (respectivement plus de 400 g CO₂éq/kWh et plus de 1000 g CO₂éq/kWh). Comme le nucléaire, dont les émissions sont estimées à 12 g CO₂éq/kWh au niveau mondial par le GIEC, et 6 en France par l'ADEME, les énergies renouvelables sont dites « bas carbone ».

Ce contenu carbone est assez largement dominé par les activités de fabrication des composants et de construction des installations, qui impliquent à la fois des procédés industriels relativement gourmands en énergie, comme certaines étapes de la fabrication des panneaux photovoltaïques, ou eux-mêmes directement émetteurs de gaz à effet de serre, comme la production de l'acier ou du béton nécessaires à la structure ou aux fondations des éoliennes.

Les pistes de progrès dans ce domaine sont pour partie liées à l'amélioration des performances des filières elles-mêmes, comme l'augmentation du rendement des process industriels liés à la fabrication de leurs composants spécifiques, la réduction à la conception des quantités de matériaux nécessaires par capacité installée, ou la progression de la productivité électrique des capacités installées. Mais l'essentiel des gains se situe plutôt dans d'autres filières, dont le développement des capacités éoliennes et photovoltaïques ne constituera dans tous les cas qu'un débouché parmi d'autres.

Il est également à noter que le recyclage de certains des matériaux, par exemple l'acier des mâts des éoliennes, peut être considéré comme un crédit carbone, ou un facteur négatif dans le bilan en analyse cycle de vie, dans la mesure où il se substitue alors à une première production plus consommatrice d'énergie du même matériau. Ainsi, la circularité croissante de ces filières s'inscrit clairement dans une baisse de leur empreinte carbone résiduelle. Compte tenu de tous ces facteurs et de la décarbonation globale des activités industrielles, RTE estime par exemple que l'empreinte en CO₂ du photovoltaïque en France, aujourd'hui évaluée à 44 g CO₂éq/kWh, peut atteindre en 2050 un niveau de 28 g CO₂éq/kWh en évolution pessimiste, et 14 en évolution tendancielle.

Le deuxième sujet majeur concerne le temps de retour énergétique : il s'agit du temps nécessaire à partir de sa mise en service pour qu'un nouveau moyen de production éolien ou photovoltaïque rembourse son énergie grise, c'est-à-dire produise plus d'énergie qu'il a fallu pour le construire (et qu'il en faudra pour le démanteler). Si ce temps est trop long, il existe une crainte qu'un développement trop rapide des énergies renouvelables conduise, à l'opposé du but recherché, à accroître le recours aux énergies fossiles.

De nombreuses études indiquent aujourd'hui, en lien avec leurs gains sur le plan économique, les performances de construction des moyens de production renouvelables conduisent à des temps de retour énergétique inférieurs à 1,5 an, et souvent moins en Europe, ce ratio restant orienté à la baisse. Avec une telle performance, le développement des renouvelables peut à terme s'affranchir des énergies fossiles. Des études prospectives ont même montré récemment que, rapporté aux émissions de gaz à effet de serre cumulées, le gain lié au déploiement des énergies renouvelables sera d'autant plus grand que celui-ci sera rapide.

La troisième préoccupation liée au déploiement des nouvelles énergies renouvelables électriques, par rapport à la décarbonation, concerne le risque de recours accru aux centrales thermiques lié à la variabilité fatale de ces moyens de production. De nombreuses études, comme les scénarios très complets développés par RTE pour la France, montrent que le déploiement de ces énergies renouvelables, partant d'un système électrique reposant fortement sur les moyens thermiques fossiles comme cela reste le cas sur la « laque de cuivre » que représente le réseau électrique européen, a un impact positif sur les émissions. C'est-à-dire que le solde est positif entre les périodes où les énergies renou-

velables réduisent le recours aux centrales thermiques par leur production, et celles où elles nécessitent ce recours parce qu'elles ne produisent pas.

À plus long terme, l'enjeu de la décarbonation du système électrique est d'éliminer les émissions associées à l'ensemble des éléments nécessaires à son adaptation à la montée en puissance des renouvelables variables, avec deux défis. Le premier consiste à décarboner les centrales thermiques dont l'usage résiduel reste nécessaire, en les alimentant avec des combustibles eux-mêmes issus d'une production renouvelable. Le second consiste à limiter le besoin de tels moyens de production pilotables par les solutions de flexibilité de la demande et de stockage, dont le cycle de vie doit lui-même être aussi décarboné que possible. Les scénarios comme ceux de RTE et de nombreux autres montrent qu'une trajectoire de ce type permet d'atteindre une décarbonation quasi complète du système électrique.



Innovation

La production éolienne et la production photovoltaïque peuvent aujourd'hui être considérées comme des filières matures, et leur développement technologique actuel est le fruit d'efforts intenses, qui ont notamment conduit à un gain de performance en coût d'un facteur 3 ou 4 pour l'éolien et d'un facteur 10 pour le photovoltaïque lors de la dernière décennie. Le champ de l'innovation appliquée à ces filières apparaît donc aujourd'hui restreint.

Pour l'éolien, l'innovation porte notamment sur les performances des matériaux associées à une augmentation continue de la puissance et donc de la taille des éoliennes. Il s'agit de progresser sur les caractéristiques mécaniques, sur les procédés de fabrication et sur la recyclabilité des polymères utilisés pour les pales, et d'optimiser le fonctionnement et les choix de matériaux de l'ensemble générateur. L'innovation concerne aussi la recherche d'autres modèles d'éoliennes que l'éolienne dite horizontale à trois pales, adaptées le cas échéant à des usages à plus petite échelle ; toutefois, ce modèle résulte d'une optimisation aérodynamique que les études d'autres concepts ne conduisent à ce jour pas à remettre en cause.

Pour le photovoltaïque, l'innovation porte essentiellement sur les alternatives aux technologies dites « cristallines », basées sur le silicium (monocristallin, polycristallin ou amorphe), qui représentent plus de 95% du marché mondial. Ces alternatives se concentrent jusqu'ici sur les technologies dites en « couches minces », qui utilisent plutôt que le silicium des assemblages complexes de métaux mettant en jeu le cadmium et le tellure, ou le cuivre, l'indium et le sélénium (plus éventuellement le gallium). Outre qu'un déploiement plus important de ces technologies confronterait davantage la filière à des enjeux de criticité et de rareté des matériaux, elles n'ont à ce jour, malgré un important effort de recherche et développement, pas fait la preuve de leur capacité à dépasser les performances des technologies au silicium, qui ont au contraire énormément progressé.

En matière d'innovation sur la production d'électricité renouvelable, les enjeux portent peut-être davantage sur les autres filières nouvelles, en particulier pour la production hydrolienne. De nombreux concepts d'équipements susceptibles de capter l'énergie des vagues ou celle des courants, en mer ou même en rivière, se développent. Aucun d'entre eux ne présente à ce jour des performances susceptibles de pouvoir le comparer à celles de l'éolien ou du photovoltaïque, mais ce domaine reste ouvert à des avancées significatives. En l'état, les concepts à l'étude reposent sur des matériaux proches des technologies éoliennes ou suffisamment courants pour ne pas faire apparaître d'enjeux matériaux spécifiques à l'éventuelle émergence de ces solutions.

Ces nouvelles formes de production électrique ont en tout état de cause très peu de chances de venir, à un horizon visible, se substituer à l'éolien et au photovoltaïque, dont elles doivent plutôt être envisagée comme un complément potentiellement utile pour une plus grande optimisation du système. C'est davantage dans le champ des services complémentaires au système autour d'une production de plus en plus basée sur des énergies renouvelables variables que l'innovation se joue.

Celle-ci concerne d'abord les solutions de flexibilité et de stockage. Pour les premières, il s'agit surtout d'améliorer le potentiel de pilotage du système par la demande autour de

solutions de programmation et de synchronisation de certains usages par exemple, via l'application adaptée à ce secteur d'innovations dans le champ notamment du numérique. Pour les secondes, trois secteurs très différents peuvent être concernés, en fonction des volumes d'énergie et des temps de stockage nécessaires :

- le recours aux batteries, avec un enjeu fort sur l'évolution des technologies et donc des matériaux mobilisés (lithium, cobalt...);
- les alternatives aux stations de turbinage électrique et pompage (STEP) pour un niveau de stockage médian, par exemple les solutions de stockage par air comprimé, avec peu d'enjeux identifiables sur les matériaux nécessaires ;
- enfin, les solutions de type *power-to-gas* pour le stockage intersaisonnier, avec l'amélioration des performances des électrolyseurs puis une compétition entre différentes approches technologiques (utilisation directe de l'hélium ou passage par la méthanation, par voie chimique ou bactériologique...), susceptibles de comporter des enjeux matériaux importants mais difficiles à caractériser aujourd'hui.



Territoire

Dans la métropole de Lyon, le taux de dépendance énergétique aux énergies non renouvelables, majoritairement produite hors du territoire, s'élève encore à plus de 90% (Grand Lyon, 2019). Pour cette section, la situation de la filière régionale sera aussi partiellement abordée afin de situer le territoire de la métropole dans son contexte local. En effet, la territorialité régionale (EnR électrique, méthanisation, bois) est intéressante car elle nécessite une coordination et une solidarité à différentes échelles entre les territoires à la recherche de l'équilibre entre production locale et consommation.

État des lieux et dynamique du développement des capacités renouvelables

Photovoltaïque

La région Auvergne-Rhône-Alpes est la région qui compte le plus grand nombre d'installations photovoltaïques raccordées au réseau (Aura digital solaire, AuRA EE, INES, 2021). Il reste cependant de grands potentiels de développement. À l'échelle métropolitaine lyonnaise, le solaire photovoltaïque est la principale filière de développement de la production d'électricité renouvelable. Le gisement théorique de production annuelle est estimé à 1,9 TWh, le potentiel réel étant limité par la concurrence dans l'usage des toitures (Grand Lyon, 2019).

La métropole détient le record de la plus grande ombrière française (Corbas), et une ferme solaire verra le jour en 2025 à Saint-Priest sur un sol pollué (3,18 hectares).

Eolien

La région Auvergne-Rhône-Alpes a un potentiel de développement éolien conséquent, dont le développement pourrait offrir à la métropole une électricité peu carbonée dans la logique de bassin versant écologique. L'éolien ne représentait que 1,6% de la consommation électrique régionale en 2018 (IET AuRA, 2019), alors que l'éolien terrestre représentait 5% de la consommation au niveau national.

En revanche sur le territoire de la métropole lyonnaise, aucune éolienne n'est mise en service.

Filières « nouvelles énergies renouvelables » implantées sur le territoire

Le territoire de la métropole lyonnaise présente une concentration d'entreprises en amont de la chaîne de valeur, les entreprises en aval étant dispersées sur le territoire régional. Ces entreprises sont notamment des entreprises d'étude et de développement de projet (exploitation/production) : prestations d'études (environnement, mesures de vent, acoustique, notamment pour l'éolien) et développement de projets (sélection de site, concertation, plan de financement). Sur le territoire, les antennes des principaux producteurs sont les suivantes : Voltalia, Boralex, BayWa RE, RES/Groupe Hanwha, Neoen, Valorem, UrbaSolar, etc. Le territoire de la métropole accueille aussi le siège de plusieurs producteurs nationaux : Corfu Solaire, Sun'R, et bien sûr, Compagnie Nationale du Rhône.

Points particuliers du photovoltaïque

Le tissu industriel est historiquement présent dans la région, avec une difficulté à faire face à la concurrence asiatique. Si de nombreux industriels de la région fabriquent des composants destinés aux installations photovoltaïques (panneaux, onduleurs, mais aussi systèmes de fixation, connectique, etc.), il convient de préciser qu'à l'exception de certains acteurs historiques de la filière, la majorité des sites de fabrication de ces derniers ne sont pas basés en France. Voici plusieurs entreprises du Rhône qui fabriquent des composants :

- APOLLON SOLAR (69) Modules solaires photovoltaïques - Production en AURA.
- EIDILIANS (69) Tuiles photovoltaïques - Production en AURA.
- IRFTS (69) Fabricant français de structures pour modules - Production AURA.
- NEXANS FRANCE 69 Fabricant de câbles électriques et télécom - Production AURA.
- ARKEMA 69 Fabricant de composants pour modules solaires - Production AURA.
- MERSEN 69 Fabricant de composants électriques solaires (fusibles/parafoudres) - Production AURA.

Plusieurs fournisseurs de panneaux importants sont installés dans la proximité directe de la métropole (<20 km) : NED, EKLOR, ESTG, et une antenne de SOLAR DISTRIBUTION. Le secteur de la pose est celui comportant les entreprises les plus artisanales (majorité d'entreprises de 2 à 5 salariés à l'échelle régionale), et le plus de recours à des salariés étrangers détachés. Un besoin important de main d'œuvre qualifiée est identifié par le rapport PERSES pour répondre aux objectifs de développement. Une formation des demandeurs d'emplois est active à Feyzin (BAO formation, DualSun).

Parmi les acteurs de la recherche, on retrouve l'Institut National des Énergies Solaires (INES) au Bourget-du-Lac (Savoie) et l'Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL) à Lyon.

L'acteur historique Hespul, basé à Lyon, compte également parmi les pionniers nationaux du photovoltaïque.

Points particuliers de l'éolien

À l'échelle nationale, l'éolien représentait environ 18200 emplois directs et indirects en 2018. La région est la troisième région en termes d'emploi avec 1748 emplois directs et indirects, l'Île-de-France étant le plus gros bassin d'emploi avec 4290 actifs.

Plus de 90 entreprises sont présentes sur le secteur éolien en région (IET AuRA, 2019). Ces entreprises représentent l'ensemble de la chaîne de valeur, mais avec une forte proportion d'industriels. En effet, 45% des entreprises œuvrent dans la fabrication de composants, les autres filières étant réparties dans des proportions proches entre l'étude et le développement (15%), la construction (16%), l'exploitation et maintenance (14%), et les activités transversales (10%). Près de la moitié des entreprises appartiennent à un grand groupe, plus d'un quart sont à capitaux étrangers. Des PME et ETI, pour certaines très spécialisées dans l'éolien, côtoient de grands énergéticiens français (Compagnie Nationale du Rhône, Engie Green, EDF Renouvelables, Omexom – Vinci). Parmi les 65 sites de production de composants, près de 50% des fabricants produisent du matériel électrique ou électronique (circuits, générateurs, transformateurs), un tiers fournissent des pièces mécaniques ou hydrauliques (multiplicateurs, couronnes d'orientation, systèmes de freinage).

Malgré la très faible proportion d'éolienne installées, 45% de ces entreprises sont installées dans le Rhône.

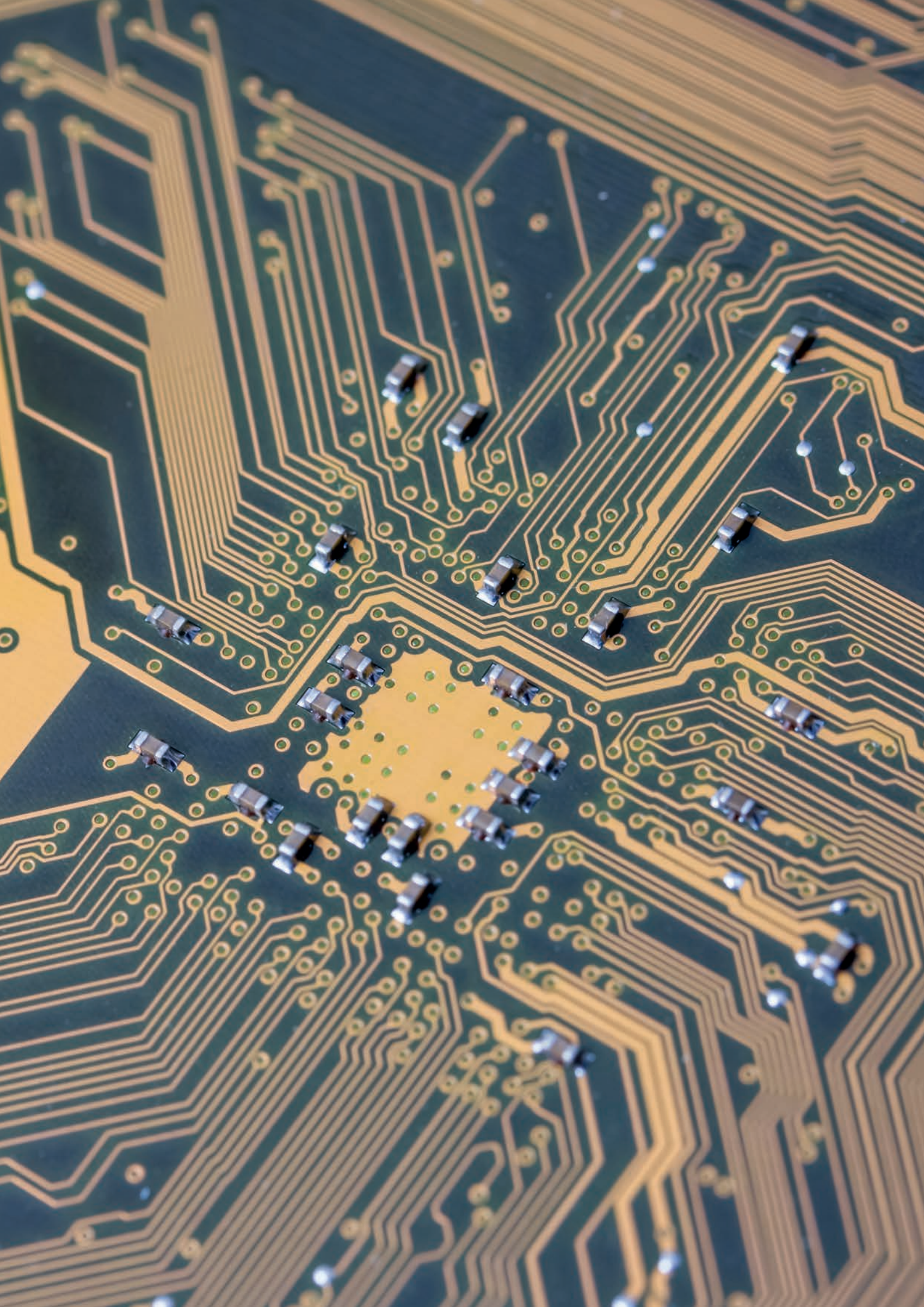
À proximité du territoire, des associations favorisent le développement de projets éoliens et des acteurs soutiennent l'innovation :

- Auvergne Rhône Alpes Energie Environnement (Lyon) propose son expertise, développe et accompagne des projets notamment à travers le fonds OSER.
- Énergie Rhône Vallée (Valence) investit dans la filière à travers la création, le rachat et la prise de participation dans des installations.

- France Énergie Éolienne, association des professionnels de la filière, promeut l'énergie éolienne en France et en Auvergne-Rhône-Alpes à travers un groupe régional.
- Le laboratoire Geomas de l'INSA Lyon (Villeurbanne) héberge plusieurs projets par exemple pour optimiser les fondations d'éoliennes afin de faire face aux futures opérations de *repowering*.
- Le pôle de compétitivité Tenerrdis (Grenoble) participe à l'amélioration des prévisions et de la rentabilité des infrastructures, l'optimisation de leur maintenance et le développement de solutions face aux contraintes environnementales.

Principales sources utilisées

- ADEME (2022). *Transition[s] 2050 – Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique*.
- Aura digital solaire, AuRA EE, INES. (2021). PERSES, *Projet d'enquête régionale sur l'énergie solaire*.
- Commissariat général au développement durable (2022). *L'éolien et les moteurs pour véhicules électriques : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles*. France énergie éolienne (2022). Observatoire de l'éolien 2022.
- France territoire solaire (2023). *Observatoire de l'énergie solaire photovoltaïque en France - 3^e trimestre 2022*.
- Grand Lyon. (2019). *Schéma Directeur des Énergies*.
- IFP Énergies nouvelles (2020). *Les métaux dans la transition énergétique - Études prospectives*.
- IFP Énergies nouvelles & IRIS (2019). *Vers une géopolitique de l'énergie plus complexe ? Une analyse prospective tridimensionnelle de la transition énergétique* - Policy Research Working Paper.
- Intelligence économique et territoriale d'Auvergne Rhône Alpes (2019). *Panorama régional : la filière éolienne en Auvergne-Rhône-Alpes*.
- International Energy Agency (2022). *Special Report on Solar PV Global Supply Chains*.
- International Energy Agency (2022). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions – World Energy Outlook Special Report*.
- International Energy Agency (2023). *Energy Technology Perspectives 2023*.
- International Renewable Agency (2022). *Renewable Power Generation Costs in 2021*.
- Observatoire des énergies de la mer (2022). *Énergies marines renouvelables : les investissements et les emplois au rendez-vous*.
- Observ'ER (2023). *Le Baromètre 2022 des énergies renouvelables électriques en France*.
- RTE (2021). *Futurs énergétiques 2050*.



FILIÈRE ÉLECTRONIQUE - L'EXEMPLE DES CIRCUITS INTÉGRÉS

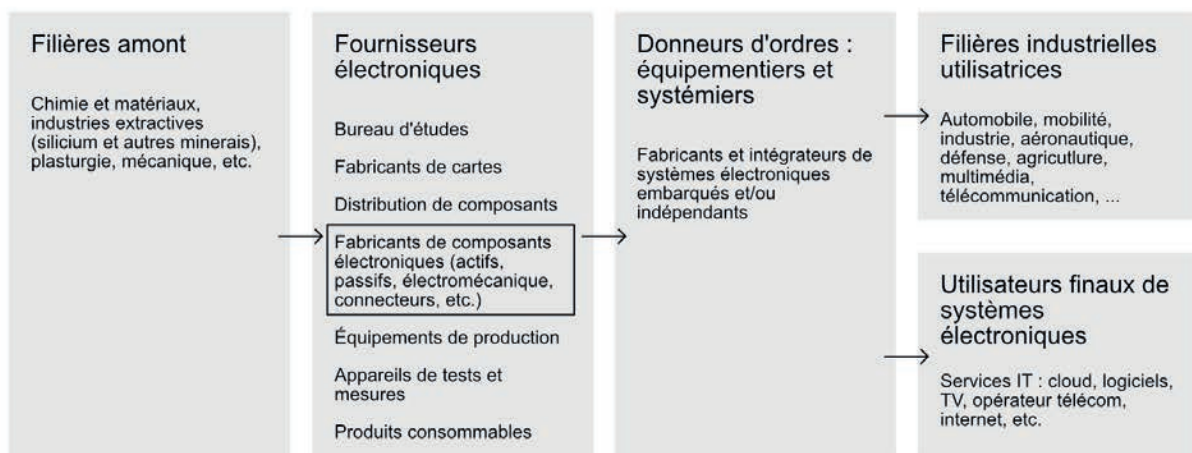


En résumé – On associe généralement électronique et numérique. Pourtant, même si les deux domaines se recoupent, ils ne se superposent pas entièrement. L'électronique correspond à la production et à l'usage de composants électroniques, qu'ils traitent un signal analogique ou un code binaire. Le secteur numérique s'intéressera plutôt aux usages de ces composants électroniques dont la finalité est le traitement de code binaire et aujourd'hui, la connexion à distance. Tout en décrivant la filière électronique, nous nous intéresserons ici principalement à un type de composant électronique qui est aussi la clé de voûte de la numérisation du monde : le circuit intégré.



Organisation de la filière

La filière électronique s'organise autour de différents types d'industries. En amont, le secteur de la chimie et les industries extractives fournissent les gaz, solvants et matériaux nécessaires à la fabrication des composants. De même, de nombreuses entreprises conçoivent et fournissent les pièces mécaniques pour les machines industrielles essentielles aux chaînes de production complexes de la filière électronique. Cette dernière a plusieurs facettes : concepteurs et fabricants de machines spécialisées, fabrication de composants électroniques, assembleurs de composants sur des cartes électroniques, testeurs, distributeurs, et bureaux d'étude. Toute la filière interagit avec les équipementiers et concepteurs de systèmes électroniques qui vont faire des demandes de spécifications orientant les choix de développement, afin de répondre aux utilisateurs finaux, soit des industries (automobile, télécommunications, etc.) ou des entreprises numériques (services IT, opérateurs, etc.). Cette fiche va se concentrer plus particulièrement sur les fabricants de composants électroniques actifs, notamment les circuits intégrés.



Filière des industries électroniques de l'amont à l'aval

Encadré en noir : le maillon de la filière analysé dans cette fiche.

Source : adapté du schéma de In Extenso "Enjeux et perspectives pour la filière française de la fabrication électronique", 2019.

Au cœur de cette filière, les cartes électroniques sont les dispositifs électroniques fondamentaux des systèmes et ensembles électroniques. Ils permettent de réaliser des fonctions électroniques complexes et sont généralement composées :

- De composants actifs, principalement les transistors discrets et les circuits intégrés, aussi appelés « puces électroniques ». Ces derniers sont composés de transistors, eux-mêmes gravés sur un matériau semi-conducteur, comme le silicium. Ces composants permettent la réalisation d'écriture de mémoire et d'opérations logiques.
- De composants passifs, comme, par exemple, les résistances, condensateurs, filtres, oscillateurs, transformateurs, et diodes ;
- De connecteurs : internes, d'entrée et de sortie ;
- Tous ces composants sont assemblés sur un même circuit imprimé (PCB) afin d'être connectés entre eux et dont le fonctionnement cohérent de l'ensemble est organisé par un logiciel (embarqué ou non).

La composante la plus connue de la filière électronique est sûrement celle des circuits intégrés, c'est-à-dire, la part de la filière qui fabrique les composants logiques (micro-processeur, etc.) et les composants mémoire (RAM, disques durs HDD et SSD) qui sont la pierre angulaire des capacités de calcul et de stockage des données. Ce segment de la filière est aussi celui qui représente le marché le plus important et permet de rentrer en détail dans la structuration des chaînes d'approvisionnement et de fabrication électroniques et de faire un panorama des acteurs mondiaux les plus importants.

Conception de la circuiterie

1. Le socle du « Chip IP core » désigne les entreprises qui vendent des schémas de circuiterie sous licence, c'est en quelque sorte l'achat de propriété intellectuelle des blocs élémentaires de base permettant de construire des systèmes logiques plus complexes.
2. Les outils EDA (Electronic Design Automation) sont des logiciels qui servent à la conception de circuits intégrés (en se basant sur les blocs d'IP vu précédemment), 80% du marché est monopolisé par trois acteurs américains : Mentor, Cadence et Synopsys.

Fabrication du circuit intégré

1. **Matériaux.** Une fois la circuiterie conçue, la fabrication est possible. En premier lieu, il est nécessaire d'obtenir les matériaux et les substances chimiques, l'industrie électronique fait grande consommation de gaz (nitrogène, HFC, CFC, etc.) et de matériaux (plastiques, eau purifiée, cuivre, aluminium, étain, or, argent, silicium, etc.).
2. **Chaîne de production.** Viennent ensuite les fabrications d'équipements industriels destinés à la filière électronique, comme les machines de gravure sur wafer pour les circuits intégrés (disques de silicium épais de 0,5 à 0,7 cm). Le néerlandais ASML a aujourd'hui le monopole des machines permettant de graver à moins de 10 nanomètres (nm).
3. **Conception.** De grandes entreprises conçoivent leurs composants pour ensuite les faire fabriquer en interne ou dans d'autres fonderies. Les entreprises capables de concevoir et de fabriquer leurs composants sont appelées IDM pour Integrated Device Manufacturers, comme Intel ou Samsung.
4. **Design.** Apple, AMD, Qualcomm, Nvidia et bien d'autres font le design (*fabless*) et laisse la fabrication à des entreprises dédiées.
5. **Fabrication.** Ces entreprises dédiées sont appelées fonderies, comme TSMC et UMC à Taiwan, SMIC en Chine ou GlobalFoundries aux États-Unis. Ils reçoivent le design des composants et prennent en charge leur fabrication.
6. **Assemblage.** Ces composants sont ensuite testés et packagés en aval (Outsourced Semiconductor Assembly and Test). Ils seront ensuite assemblés sur des circuits imprimés ou des cartes électroniques en fonction des besoins des clients finaux, que cela soit des clients industriels ou des entreprises IT.



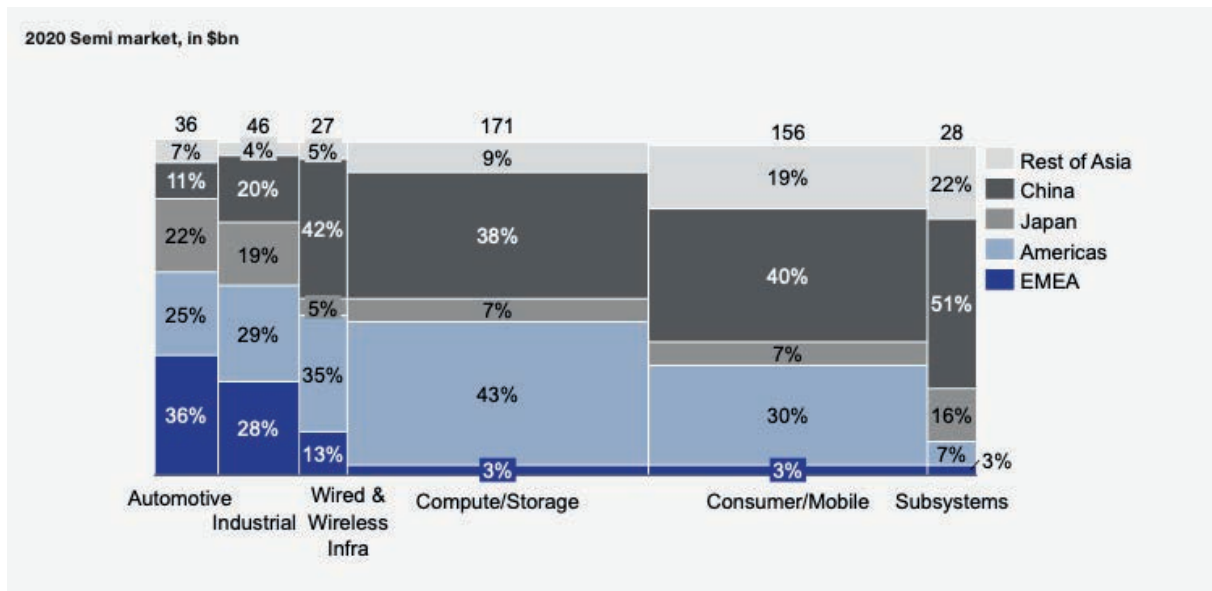
Dynamique économique

Historiquement, la filière électronique en France a été tirée par le secteur des télécommunications. La délocalisation de la production vers d'autres pays, en Asie notamment, a entraîné la fermeture de nombreuses unités de production. L'effectif salarié dans la filière a baissé de 35% entre 1997 et 2015. Le savoir-faire français s'est aujourd'hui plutôt tourné vers les marchés professionnels : industrie, automobile, énergie, etc.

Aujourd'hui, la filière représenterait 70 000 emplois directs et 150 000 emplois indirects, auxquels s'ajoutent 10 000 personnes dédiées à la recherche. Ces emplois sont majoritairement concentrés sur la fabrication des composants (30 000 emplois) et la sous-traitance pour la fabrication de cartes électroniques (25 000 emplois). D'après une étude du cabinet Kyu datant de 2020, la filière pourrait créer 18 000 nouveaux postes durant les trois prochaines années pour compenser le turn-over et les départs à la retraite. En plus, 3 000 nouvelles créations de poste sont envisagées dans la filière.

En termes d'activité économique, la filière électronique représente un chiffre d'affaires de 15 milliards d'euros porté par plus de mille entreprises. Les fabricants de semi-conducteurs sont à l'origine de plus de la moitié de ce chiffre d'affaires, comme l'entreprise franco-italienne STMicroelectronics (plusieurs sites de production, dont en Isère), l'isérois Soitec ou le groupe belge XFAB qui produit à Corbeille-Essonne. La croissance annuelle dans la filière serait de l'ordre de 3 à 5% selon les activités, poussée par la croissance mondiale de la production électronique. Sachant que la filière électronique française dépend d'industries comme l'automobile, les équipements industriels, l'énergie ou l'aéronautique, sa croissance sera aussi liée en partie à l'évolution de ces secteurs.

À l'échelle européenne, les plus gros acheteurs de composants actifs (notamment les circuits intégrés) sont Bosch (3,5 milliards de dollars en 2020) et Continental (3,4 milliards de dollars en 2020). L'Europe représente les marchés les plus importants uniquement sur l'automobile et l'industrie. Cette position européenne est analogue à celle de la filière française.



Marchés des semi-conducteurs par région

(Gartner, avril 2021 et analyse ASML), exprimé en milliards de dollars.

Source : ASML EU Chips Act Position Paper.

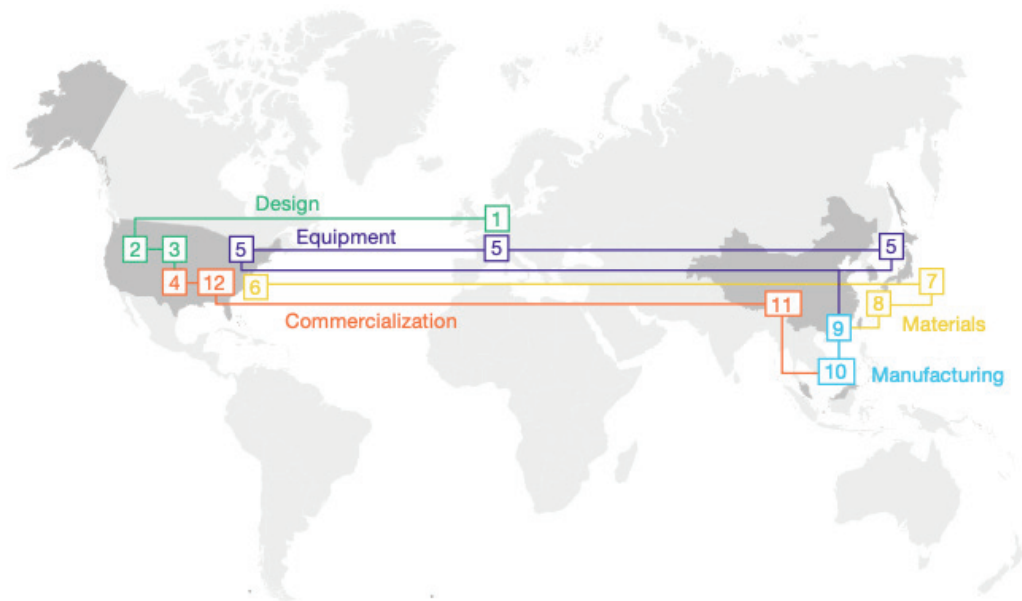
Dans tous les cas, les activités de la filière électronique en France sont vouées à augmenter, notamment avec l'arrivée du Paquet législatif européen sur les semi-conducteurs, qui encourage leur production en Europe.



Relation de filière

La fabrication de composants électroniques est paradoxale : les chaînes de fabrication sont mondialisées et interdépendantes, mais aussi très concentrées sur certaines zones qui sont autant de points de passage obligés et donc de possibles goulots d'étranglement. Par exemple, la fabrication de circuits intégrés, avec une finesse de gravure inférieure à 10 nanomètres, passera nécessairement par les fonderies taïwanaises qui sont monopolistiques sur ce segment. Ces fonderies dépendent elles-mêmes des machines de lithographie produites par une seule entreprise, le néerlandais ASML. Plus les technologies sont avancées, moins il y a d'acteurs capables de les produire, d'où la formation de monopoles. Or, les nouveaux équipements grand public, comme les smartphones d'Apple ou de Samsung, dépendent directement de ces chaînes, en plus des autres chaînes, pour les composants moins avancés (composants passifs, écrans, etc.) et de l'assemblage.

Cette grande interdépendance peut transmettre des secousses le long des chaînes et des secteurs qui dépendent de composants électroniques. Une carte électronique étant un assemblage de composants, le retard de livraison ou l'incapacité d'obtenir un ou des composants peuvent stopper une chaîne de production. De même, l'ajout des composants électroniques dans de nombreux produits rend d'autres secteurs dépendants de la filière électronique. Par exemple, le secteur automobile a largement souffert de l'incapacité à se fournir en cartes électroniques et en composants dédiés, stoppant certaines chaînes de production automobile.



Le parcours mondial d'un processeur d'application pour smartphone

Source : BCG SIA, Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain, avril 2021.



Dépendance/vulnérabilité

En termes d'approvisionnement matériel, la filière électronique utilise de nombreux métaux qui présentent un risque d'approvisionnement différencié. Althaf & Babbitt (2021) ont étudié les risques de disruption sur les chaînes d'approvisionnement de la filière électronique en fonction de la demande, de l'offre, des risques sociopolitiques et environnementaux sur un peu de moins de 40 métaux et minéraux critiques pour la filière. Du point de vue de la volatilité du prix et des risques environnementaux, l'or (Au), le rhodium (Rh), le platine (Pt) et le palladium (Pd) sont soumis à un risque élevé. Du point de vue de la demande et des risques géopolitiques, le cobalt (Co), le gallium (Ga) et certaines terres rares seront probablement mis en tension.

Au-delà des métaux, la filière électronique utilise de nombreux gaz spéciaux comme du nitrogène trifluorure (NF_3), de l'hexafluorure de tungstène (WF_6), du chlorure d'hydrogène (HCl), de l'ammoniac (NF_3), ou du germane (GeH_4). Les gaz majeurs utilisés sont

l'azote (N), l'hydrogène (H), l'argon (Ar), l'hélium (He), l'oxygène (O) et le dioxyde de carbone (CO₂) (Linde Electronics, 2022). Un gaz, le néon (Ne), est notamment nécessaire pour les lasers utilisés par la lithographie de pointe (193 nm UV) dite « Deep Ultraviolet Lithography » (DUV). Or, l'Ukraine est un producteur majeur de néon car c'est un coproduit du procédé Haber-Bosch utilisé pour produire du fertilisant pour les champs de blé du pays. Ingas et Cryoin, deux entreprises ukrainiennes, représentent 50% de la production de néon utilisée par l'industrie électronique pour la lithographie ultraviolette. La guerre en Ukraine a provoqué un nouveau choc dans les chaînes d'approvisionnement et les prix de sont envolés, autant lié à l'embargo russe sur l'exportation de ses gaz que la disruption de la production ukrainienne ou que la création de stocks supplémentaires par les fabricants de composants.

Pour les métaux comme pour les gaz, la filière électronique pourrait faire face à des difficultés d'approvisionnement liées à certains types de tension (géopolitiques, environnementales, etc.) ou faire face à un effet cocktail entre différents types de risques. Les goulots d'étranglement des chaînes d'approvisionnement sont nombreux et situés à différents niveaux. Dans une ère géopolitique et environnementale de plus en plus incertaine, de nombreux chocs sont à prévoir.



Circularité

Les cartes et composants électroniques utilisent de nombreux métaux en petite quantité difficilement récupérables en fin de vie. De même, les composants électroniques sont dispersés dans une multitude d'objets et de produits courants allant du smartphone à la brosse à dent « intelligente ». Si ces objets ne sont pas réutilisables, alors ils deviennent des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) avec un traitement de recyclage particulier. D'après Florian Fizaine (2020), la recyclabilité des métaux présents dans ces déchets est un delta entre le prix par métal, la concentration de ce métal dans le produit, et la différence de concentration relative entre le produit et les gisements « naturels ». Toutefois, l'auteur remarque que la hausse du prix du métal n'a que peu d'effet sur le taux de recyclage. Une concentration plus importante du métal dans le produit a plus d'effets : pour 1% de concentration supplémentaire, le taux de recyclage pourrait augmenter de 2,52%. De même, les métaux qui sont plus concentrés dans les déchets que dans les gisements ont un taux de recyclage plus élevé (l'or par exemple).

Alexandre Charpentier Poncelet et ses collègues (2022) ont aussi examiné les taux de perte et la durée de vie des 61 métaux du tableau périodique des éléments. .

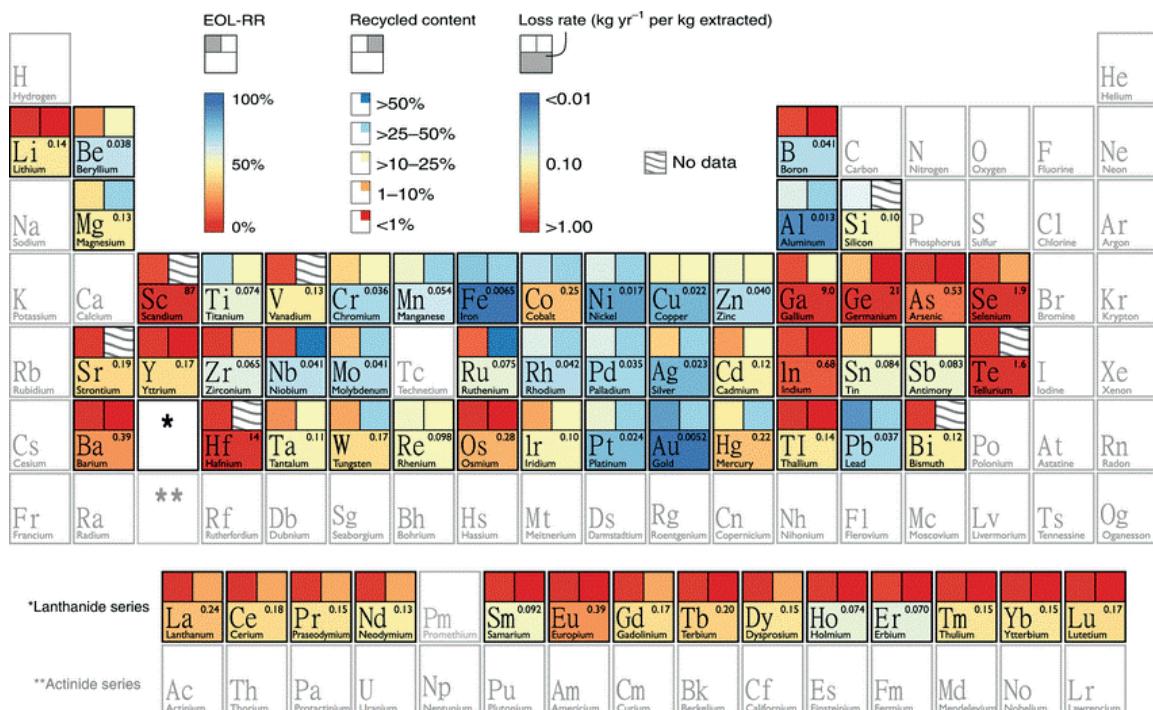


Tableau périodique des éléments représentant les taux de perte (loss rate) par rapport au taux de recyclage en fin de vie (EOL-RR) et au contenu recyclé (recycled content)

Source : Charpentier Poncelet et al. 2022.

D'après leur étude, les petits métaux et métaux rares, largement utilisés par la filière électronique sont aussi ceux avec le taux de recyclabilité le plus bas et la durée de vie la plus courte. Pour la plupart, ces métaux sont soit utilisés en quantité trop petite pour être récupérée, soit utilisés dans des alliages. Le taux de recyclage des petits métaux utilisés dans la filière électronique se situe généralement entre 0 et 5%.

Il y a encore aujourd'hui très peu d'incitations à récupérer les petits métaux utilisés dans l'électronique du fait même de leur faible concentration et de leur faible prix. Certains métaux comme l'or ou le platine sont très bien récupérés dans des installations comme celle d'Umicore à Hoboken en Belgique et constituent un modèle d'affaires opérant. Cela est dû aux prix de ces métaux et à la plus forte concentration de l'or et du platine dans les déchets électroniques que dans la croûte terrestre. Mais la plupart du temps, les déchets électroniques seront broyés jusqu'à obtenir de la grenaille alu-cuivre-laiton et les autres métaux seront perdus. Il y a donc une énorme marge de progression pour rendre la filière électronique circulaire, ce qui nécessitera de repenser des méthodes de conception, un objectif non prioritaire à ce stade pour cette filière.



Décarbonation

Il n'existe pas à ce jour une estimation globale de l'empreinte carbone de la filière électronique ou d'estimation pour la filière française. Certains processus de fabrication sont étudiés par des analyses de cycle de vie, d'autres par des estimations économiques en se basant sur les flux import/export. De plus, il existe une grande variété de composants et de processus de fabrication très différents les uns des autres, ce qui complexifie l'analyse.

En général, l'empreinte environnementale de la filière électronique est estimée par rapport à ses émissions de gaz à effet de serre, incluant l'ensemble des gaz utilisés, dont les HFC qui ont un effet réchauffant plus élevé (de 34 à 40 fois l'effet d'émissions de dioxyde de carbone). La consommation d'eau finale est également quantifiée : elle inclut les prélèvements moins le recyclage, la réutilisation et le rejet d'eau dans l'usine ; les polluants de l'air et de l'eau.

Dans un pays leader sur la fabrication électronique comme Taïwan, d'après les données disponibles entre 2015 et 2020, les émissions de gaz à effet de serre des fabricants de composants électroniques augmenteraient de 7,5% par an, la consommation d'électricité de 8,9% par an, et la consommation d'eau de 6,1% (Roussilhe, à paraître). Dans le cas précis de Taïwan, une zone de production focalisée sur les technologies les plus avancées (<10 nm), leur industrie électronique pourrait maintenir l'île dans un verrou carbone, c'est-à-dire, une situation où, dans un contexte économique de rendements d'échelle, tant les institutions publiques que les acteurs privés inhibent radicalement la compétitivité et le déploiement d'alternatives à faible émission de carbone.

Les produits de la filière électronique (composants, cartes électroniques, logiciels embarqués) se trouvent dans une multitude de services et de biens dans tous les secteurs d'activités. En effet, le phénomène de numérisation pousse à inclure des composants électroniques dans un nombre croissants de biens de consommation courants mais aussi au sein des chaînes de production industrielles. De façon indirecte, la numérisation s'est rendue indispensable au fonctionnement du secteur des services qu'elle a en partie créé. À ce titre, il est complexe de déterminer si les activités et produits de la filière constituent globalement un levier pour les stratégies de décarbonation : à certains égards, oui, à d'autres égards, non. La question de fond sur la filière électronique serait donc plutôt de se demander si la numérisation des activités humaines a un impact positif au niveau macroscopique.

Dans son rapport technique le groupe de travail n°3 du GIEC (2022) souligne bien l'existence de solutions numériques positives pour les trajectoires de décarbonation. Mais dans une vision plus large, ce dernier estime : « À l'heure actuelle, la compréhension des impacts directs et indirects de la numérisation sur la consommation d'énergie, les émissions de carbone et les possibilités d'atténuation est limitée (confiance moyenne) ». La numérisation n'apporte pas une réponse positive à la transition écologique par défaut. Des composants électroniques peuvent être utilisés autant pour améliorer l'extraction de barils de pétrole (émissions ajoutées) ou pour réduire les pertes de transport et de

transmission de l'électricité (émissions évitées). Les impacts environnementaux des composants électroniques, et par extension de la numérisation, mériteraient d'être étudiés en fonction de chaque cas d'usage.



Substituabilité

Une fois qu'un service, un produit ou une chaîne de production ont été numérisés, c'est-à-dire, qu'une partie ou toutes les opérations dépendent d'équipements électroniques connectés (distants ou sur place) et de logiciels, il est très dur de revenir en arrière, même si cela est possible.

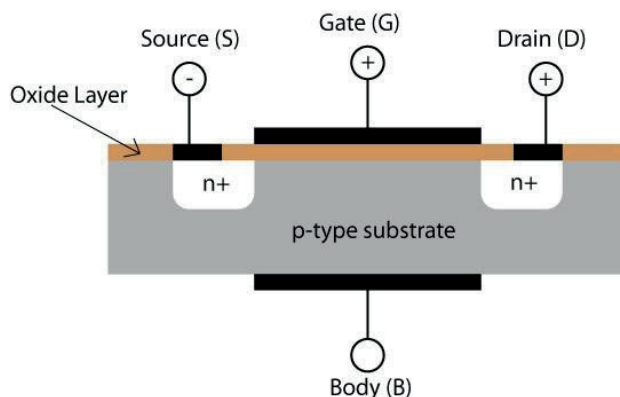
Au niveau des composants électroniques, de nombreuses recherches sont en cours pour trouver de nouveaux matériaux plus performants mais les questions de substituabilité ne sont pas centrales. La filière doit plutôt gérer des problèmes de chaînes d'approvisionnement. Par exemple, en avril 2022, des équipementiers industriels ont acheté des machines à laver pour récupérer leurs puces afin de maintenir leur approvisionnement (Protocol).

Il est aussi possible de choisir l'intégration de composants moins avancés que les circuits intégrés actuels mais dont l'industrialisation est mature et les flux d'approvisionnement sécurisés. De même, il est possible d'arrêter d'intégrer de composants électroniques dans les objets et produits usuels. En 2021, certains constructeurs automobiles, dans l'impossibilité de se fournir en composants électroniques pour leurs portes et monte-vitres, ont décidé de revenir temporairement à des monte-vitres mécaniques (avec une manivelle).



Innovation

L'innovation dans la filière électronique a été portée par la loi de Moore. Cette dernière stipule que nous doublons le nombre de transistors sur les puces à peu près tous les deux ans. Nous doublons donc aussi la puissance sur les puces tous les deux ans et nous divisons par deux le coût de ces composants. Bien que très longtemps vérifiée, cette loi a tendance à ralentir et nous arrivons bientôt à la limite physique des transistors : on ne pourra pas graver en dessous de 2 nanomètres, soit 10 atomes de silicium. Cette distance en nanomètre indique la «gate length», c'est-à-dire la longueur du substrat métallique qui sépare la source du drain dans un transistor. En dessous de 2 nm (soit 10 atomes de silicium), la «gate» n'est pas assez épaisse pour empêcher le transfert d'électrons entre la source et le drain.



Exemple simplifié des parties d'un transistor dit MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

Source : Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS).

Au vu de cette limite physique, la recherche en microélectronique s'est orientée vers de nouvelles pistes, soit en tentant de repousser toujours plus loin les limites de la miniaturisation, soit en se diversifiant.

Des gains d'efficacité seront encore possibles au niveau des composants mais il y a de fortes chances que ces gains soient moins importants que ceux obtenus grâce à la miniaturisation des transistors. La recherche de pointe (quantique, photonique, graphène) nécessite des investissements colossaux qui ne sont pas à portée de toutes les entreprises. Ainsi, on peut estimer que l'innovation se portera encore pour un certain temps sur d'autres choix d'architecture. Tous les gains à obtenir au niveau logiciel sont a priori hors de la filière électronique à proprement parler, à moins que des entreprises au sein de cette dernière pivotent leur métier et leur effort de R&D.



Territoire

17% des activités de la filière électronique sont situées en région Auvergne-Rhône-Alpes, soit la deuxième zone d'activité française. La région est notamment portée par les industriels du semi-conducteur comme STMicroelectronics, Soitec, quelques industriels de la connectique comme Radiall et des donneurs d'ordre comme Alstom. STMicroelectronics et Soitec sont aujourd'hui les principaux fabricants français de semi-conducteurs avec XFAB.

STMicroelectronics emploie 48 000 personnes dont 11 300 en France et a réalisé 12,8 milliards d'euros de revenus en 2021. La stratégie de l'entreprise cible trois segments : la mobilité, notamment les composants dédiés aux automobiles avec des clients comme Bosch ou Continental ; le secteur de l'énergie et de la production d'électricité ; l'Internet des Objets. La direction de l'entreprise n'envisage pas d'aller vers la fabrication de nœuds technologiques très avancées (<10 nm) du fait des investissements colossaux pour ouvrir ce type d'usines (en moyenne 20 milliards de dollars).

Soitec emploie quant à elle 2 000 personnes, en grande majorité en France, et a réalisé un chiffre d'affaires de 863 millions d'euros en 2021 (dont 90% à l'international). L'entreprise fabrique des *wafers* (des tranches fines utilisées pour les semi-conducteurs) avec leur technologie propriétaire, FD-SOI (Silicone sur Isolant), à destination des télécommunications (5G), du secteur automobile et industriel, et objets connectés. Les télécommunications représentent néanmoins la plus grande partie du chiffre d'affaires de Soitec aujourd'hui (72%).

Du fait de la présence de STMicroelectronics et de Soitec en Isère, la région Auvergne-Rhône-Alpes est une zone stratégique de la fabrication de semi-conducteurs en France. Ces deux entreprises misent à peu près sur les mêmes marchés et développent des produits de haute-technologie pour continuer de croître sur les secteurs visés (automobile, industrie, télécommunications, IoT/objets connectés). Les collectivités territoriales et les institutions publiques vont se trouver sur une ligne de crête. D'un côté, ils peuvent avoir un rôle à jouer pour accompagner leurs activités, tout en sachant que les niveaux d'investissements dans la fabrication de semi-conducteurs sont tellement élevés que seuls l'État et l'Union Européenne peuvent les soutenir financièrement dans leur évolution. De l'autre, les usines de semi-conducteurs vont renforcer la pression sur l'usage de ressources locales et les autorités locales vont devoir gérer des arbitrages de plus en plus difficiles. Le cas de Crolles en donne l'exemple aujourd'hui : des collectifs citoyens se forment pour contester l'usage grandissant de l'eau lié aux nouvelles usines prévues par STMicroelectronics. De façon générale, des chocs et des turbulences sont à prévoir sur l'ensemble des chaînes d'approvisionnement liés à des tensions grandissantes autant au niveau local que global.

Principales sources utilisées

- Althaf Shahana, Babbitt Callie (2021), *Disruption risks to material supply chains in the electronics sector*, Resources, Conservation & Recycling n°167.
- Charpentier Poncelet Alexandre et al. (2022), *Losses and lifetimes of metals in the economy*, *Nature Sustainability*.
- Fizaine Florian (2020), *The economics of recycling rate : New insights from waste electrical and electronic equipment*, Resources Policy n°67.
- GIEC (2022), *Technical Summary*. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Kyu et CSF Industrie électronique (2020), *Cartographie des formations diplômantes menant aux secteurs de l'électronique et de la photonique*.
- Linde Electronics (2022), *Leading in electronic gases – Supplying the semiconductor, solar, display, and LED markets*.
- Protocol (2022), *The chip shortage is so bad companies are ripping them out of washing machines*. - <https://www.protocol.com/bulletins/chip-shortage-washing-machines>.
- Roussilhe Gauthier et al. (2022), *From Silicon Shield to Carbon Lock-in ? The Environmental Footprint of Electronic Components Manufacturing in Taiwan (2015-2020)*.
- Theis Thomas N., Philip Wong H.-S. (2017), *The End of Moore's Law: A New Beginning for Information Technology*, *Computing in Science & Engineering* n°19.

Analyse transversale

Si elle demeure partielle, l'approche par filières de transformation et de consommation des matériaux proposée dans cette étude permet de souligner la complexité des étapes menant de l'extraction des matières dans l'environnement à leur usage final par la société, ainsi que la multiplicité des enjeux qu'elles soulèvent en termes de cohérence de filière, de dépendance aux importations, de soutenabilité (circularité et décarbonation), de substituabilité ou encore d'innovation. Un regard transversal permet ainsi de mettre en évidence les spécificités de chaque filière, mais également leurs résonances ainsi que de possibles tensions entre elles. Voici quelques éclairages qui nous semblent importants de retenir.

Une dynamique économique contrastée - Certaines filières connaissent un recul simultané de leur marché domestique et de leur capacité de production. C'est le cas du textile – où la baisse des consommations en valeur masque cependant une progression des volumes mis sur le marché – ainsi que de la filière papier-carton et automobile. Pour d'autres filières, la désindustrialisation conduit à une situation paradoxale où le marché continue de croître tandis que la production baisse, comme en témoignent les filières automobile et métallurgie. D'autres filières enfin affichent une production à la hausse tirée par un marché dynamique : construction bois, chimie, énergies renouvelables électriques, électronique.

Par ailleurs, **plusieurs filières souffrent d'un déficit de structuration entre leurs différents maillons** : entre l'amont forestier, les scieries et les activités de fabrication de produits bois pour la filière construction bois ; faiblesse des activités de fabrication de fils et de vêtements pour la filière textile ; faiblesse des activités de fabrication de composants et d'équipements pour les filières du véhicule électrique, des énergies renouvelables électriques et de l'électronique. Notons également que la dynamique de certaines filières dépend de l'évolution de la demande provenant d'autres filières situées plus en aval : c'est le cas par exemple de la métallurgie dont l'activité dépend en large partie de celles de la construction et de la fabrication de matériels de transport (automobile, aéronautique et ferroviaire principalement).

Leur dépendance à l'égard de matériaux importés et/ou en tension prend également plusieurs formes. Certaines filières font face à un risque d'approvisionnement sur certaines matières premières lié à leur possible raréfaction et/ou leur concentration géographique : le textile avec le coton et le pétrole ; la chimie avec le pétrole ; la métallurgie, l'automobile, l'électronique ou les énergies renouvelables électriques avec certains métaux. Mais la contrainte sur la disponibilité des matières premières peut buter également sur les limites planétaires. Les enjeux de décarbonation ou de préservation de la biodiversité peuvent inciter en effet à réduire l'extraction de biomasse (bois, coton), de pétrole ou de métaux. Par ailleurs, la dépendance matérielle aux importations peut se manifester également à un stade de transformation plus avancé, comme c'est le cas pour les produits bois pour la construction, les fils et tissus pour la filière textile, la pâte à papier et les papiers bruts pour la filière papier-carton, les produits métalliques (hors acier, plomb et cuivre) pour la métallurgie et l'automobile. Enfin, certaines filières soulèvent des problématiques de dépendances à l'égard de briques technologiques pour lesquelles la France, et plus largement l'Europe, affichent un retard ou un sous-développement massif au regard d'autres pays tels que la Chine ou les États-Unis. Il s'agit notamment de la fabrication d'équipements et composants pour les énergies renouvelables électriques, l'automobile (batteries en particulier) ou l'électronique. Au global, les filières du véhicule électrique et des produits électroniques sont probablement celles pour lesquelles le facteur de dépendance matérielle est le plus aigu.

Face à l'enjeu climatique, les filières étudiées font plus ou moins partie du problème et de la solution.

Certaines d'entre elles sont appelées à jouer un rôle de premier plan en matière de décarbonation de l'énergie et de ses usages. Il s'agit bien entendu du développement des énergies éolienne et photovoltaïque, de l'électrification du parc automobile et de la construction bois, qui doivent venir en substitution de productions fortement émettrices de gaz à effet de serre (combustibles fossiles, ciment). La contribution de ces filières à la décarbonation dépend cependant de certains paramètres : degré de recours aux centrales thermiques pour palier la variabilité des renouvelables ; taille, nombre et intensité d'usage des véhicules électriques et mode de production de l'électricité pour l'automobile ; impact sur le puits de carbone forestier et le puits de carbone des bâtiments pour la construction bois. Les autres filières abordées (chimie, métallurgie, textile papier-carton, électronique) sont confrontées à des enjeux majeurs de décarbonation de leurs matières premières, de leur mix énergétique ou encore de leurs process de production.

Le chemin vers la circularité s'avère complexe. Il suffit pour s'en convaincre de regarder la situation des filières métallurgie et papier-carton. Si elles présentent un taux élevé d'incorporation de matières issues du recyclage dans leur production, elles sont néanmoins dans l'incapacité de valoriser le gisement de déchets métalliques et papier-carton disponible en France, dont une large partie est exportée. De plus, cette circularité apparente des filières ne débouche pas nécessairement sur une circularité des consommations dès lors que celles-ci demeurent croissantes et supérieures à la production nationale. D'autres filières comme celles du véhicule électrique et des énergies renouvelables électriques montrent que les boucles de circularité ne pourront jouer un rôle significatif dans la réponse aux besoins de matériaux de la filière que lorsque les véhicules et les installations déployés massivement aujourd'hui arriveront en fin de vie. Plus largement, le défi de la circularité pose trois grands enjeux d'innovation pour les filières considérées dans cette étude :

- **un enjeu d'éco-conception** afin d'amplifier l'intégration de matières secondaires ou biosourcées aux produits de la filière et de réduire le recours aux matières critiques, nocives et/ou peu recyclables, d'allonger la durée de vie et le potentiel de réemploi des produits et de leurs composants, et d'améliorer la recyclabilité des matières qu'ils contiennent ;
- **un enjeu de développement des procédés de collecte et de tri des produits et de récupération** des matières qu'ils contiennent, en particulier en vue d'alimenter l'amont des filières (recyclage en boucle fermée) ;
- **un enjeu de diversification des possibilités de recyclage matières** (recyclage en boucle ouverte) afin de mieux valoriser le gisement disponible.

De ce point de vue, la filière chimie semble pouvoir jouer un rôle important aussi bien sur la valorisation d'intrants biosourcés (bioéconomie), qu'en matière de recyclage des plastiques, des fibres textiles et des métaux. Enfin, un autre enjeu clé de la circularité des filières concerne la réduction des écarts entre les consommations matérielles, les capacités de production industrielle et les gisements de ressources secondaires ou biosourcées du pays, en favorisant une maîtrise des premières (sobriété), une consolidation des secondes (réindustrialisation) et une valorisation soutenable des troisièmes.

www. Retrouvez
toutes les études sur
millenaire3.
com

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