



THE CARBON  
TRANSITION  
THINK TANK

# DÉCARBONER L'INDUSTRIE SANS LA SABORDER

DANS LE CADRE DU  
**PLAN DE TRANSFORMATION  
DE L'ÉCONOMIE FRANÇAISE**

JANVIER 2022



# Avant-propos

## L'industrie, organe vital de l'économie

Après des années de déclin relatif durant lesquelles l'industrie a vu passer son poids dans l'économie d'un quart à un peu plus de 10 % du PIB et de l'emploi, la crise du COVID-19 a ouvert les yeux du public sur l'importance de l'industrie.

Si l'énergie est le système sanguin de notre économie, l'industrie en est le métabolisme. Elle ingère ses aliments sous leur forme brute (les minerais, l'énergie, les hydrocarbures) pour les transformer en substances et produits (barres d'acier, blocs de béton, poutres en bois, colles, peintures, engrais, rails, routes, câbles, trains, automobiles, smartphones, petites cuillères et meubles en kit) qui permettront toutes nos activités (se déplacer, se nourrir, habiter, se divertir, exercer la démocratie et lire ce rapport à l'abri des intempéries). Et, comme tout métabolisme, elle excrète des déchets.

Pour la comprendre, il est essentiel de réaliser que l'industrie française est largement ouverte sur le monde, en compétition avec les industries du reste de l'Europe et des autres continents. Cela explique les désindustrialisations et délocalisations de ces dernières décennies, qui ont façonné l'industrie nationale et son déclin relatif des dernières années. Malgré des secteurs comme la chimie ou la sidérurgie qui exportent une partie importante de leur production, la balance commerciale des biens industriels en France s'est dégradée au fil des ans (jusqu'à atteindre un déficit annuel de 58 milliards d'euros en 2018, pour les industries extractives et manufacturières [1]). Elle a en même temps vu fondre son poids dans l'économie, passant de presque 25 % dans les années 1980 à seulement 13 % des emplois aujourd'hui [1]–[3].

Reposant intégralement sur des chaînes logistiques longues et intégralement dépendantes de la disponibilité en pétrole (transport de marchandises, de matériaux et de composants intermédiaires principalement par la route, le bateau ou plus marginalement l'avion), notre système productif est aujourd'hui très vulnérable aux crises peu prévisibles qui peuvent les atteindre, comme l'ont par exemple démontré les récentes ruptures d'approvisionnement en puces électroniques.

**Le décarboner est un enjeu incontournable, à la fois pour lui assurer sa propre résilience et pour rendre possible la transformation de l'ensemble de l'économie,** qui ne pourra se passer d'un système productif à la hauteur de ses nouvelles ambitions et des dynamiques qui mèneront à les atteindre.

# À propos du Plan de transformation de l'économie française

Le Plan de transformation de l'économie française (PTEF) vise à proposer des **solutions pragmatiques pour décarboner l'économie**, secteur par secteur, en favorisant la résilience et l'emploi.

Initié au début du premier confinement, ce plan s'inscrit dans la perspective du fameux « monde d'après », et a vocation à alimenter le **débat public** : entre autres celui qui va précéder l'élection présidentielle de 2022. Il s'agit de concevoir à grande échelle un programme systémique de mesures opérationnelles (réglementaires, économiques, fiscales, sociales, organisationnelles) destinées à rendre l'économie effectivement compatible avec la limite des 2°C désormais communément prise pour objectif.

L'élaboration du PTEF repose sur quatre piliers :

- Adopter une approche globale, systémique et cohérente du point de vue des lois de la physique et de la technique, et des flux économiques.
- S'intéresser aux vraies ressources rares : les ressources physiques et les compétences, l'emploi étant au cœur du dispositif.
- Faire des propositions pragmatiques, opérables dès à présent, de façon à ouvrir un chemin de décarbonation réaliste et cohérent au sein d'une transformation de long-terme qui impose un rythme de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'environ 5 % par an en moyenne dès aujourd'hui.
- Ne pas construire une trajectoire qui reposerait sur le pari de la croissance économique comme phénomène exogène, ni sur des évolutions technologiques supposées advenir mais encore non éprouvées.

Le PTEF est organisé selon quatre catégories :

- secteurs « usages » : [mobilité quotidienne](#), [mobilité longue distance](#), [logement](#), [usages numériques](#) ;
- secteurs « serviciels » : [santé](#), [culture](#), [administration publique](#) ; [défense](#), [enseignement supérieur et recherche](#) ;
- secteurs « amont » : [agriculture-alimentation](#), [forêt-bois](#), [énergie](#), [fret](#), [matériaux et industrie](#), [industrie automobile](#) ;
- et enfin chantiers transversaux : [emploi](#), [finance](#), bouclage énergétique, bouclage matières, [villes et territoires](#).

Certains secteurs (enseignement supérieur et recherche, défense et sécurité intérieure, forêt-bois) ont fait l'objet de recherches préparatoires mais ne seront finalement pas détaillés, au moins dans un premier temps. Certains sujets initialement traités dans des chantiers transversaux (résilience et impacts, villes et territoires), ont finalement été en partie intégrés aux travaux sectoriels ou à d'autres projets du *Shift Project* connectés (comme le projet Stratégies de résilience des territoires). D'autres sujets initialement traités dans des secteurs (la cohérence énergétique et matérielle, le numérique) sont devenus des chantiers transversaux.

Les 500 000 € collectés en 2020 grâce à près de 4 000 donatrices et donateurs (que nous remercions !), ont permis de réaliser de premières publications en 2020, et de lancer les travaux sectoriels début 2021. Pour aller plus loin, le *Shift Project* a lancé fin avril 2021 un « [Appel à contribution](#) » destiné aux entreprises, pour financer et nourrir le PTEF. En parallèle, la [consultation « Big Review »](#) lancée en octobre 2020 par les *Shifters* s'est poursuivie jusqu'à l'été 2021.

**En 2020, tous les travaux sectoriels et transversaux ont été menés de front (voir la [synthèse](#)). En 2021, les travaux de recherche continuent, cette fois secteur par secteur, en consultant et en mobilisant le plus grand nombre d'acteurs possible.** Nous avons publié en avance de phase un premier rapport sur l'aérien, qui tient une place à part dans le PTEF du fait de l'urgence de la situation du secteur : « [Pouvoir voler en 2050](#) ». Après la publication de nombreux rapports sectoriels (sur l'[administration publique](#), l'[automobile](#), la [santé](#), la [culture](#), l'[emploi](#)), nous sommes heureux de vous présenter ce nouveau rapport final publié dans le cadre du PTEF.

# À propos du think tank *The Shift* *Project*

Le *Shift Project* est un *think tank* qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, sa mission est d'**éclairer et d'influencer** le débat sur la transition énergétique et climatique en Europe.

Le *Shift Project* constitue des **groupes de travail** autour des enjeux les plus décisifs de la transition, produit des **analyses** robustes et chiffrées sur ces enjeux et élabore des **propositions** rigoureuses et innovantes. Il mène des campagnes d'**influence** pour promouvoir les recommandations de ses groupes de travail auprès des décideurs politiques et économiques. Il organise également des **événements** qui favorisent les discussions entre parties prenantes et bâtit des **partenariats** avec des organisations professionnelles et académiques, en France et à l'étranger.

Le *Shift Project* a été fondé en 2010 par plusieurs personnalités du monde de l'entreprise ayant une expérience de l'associatif et du public. Il est soutenu par plusieurs **grandes entreprises** françaises et européennes, ainsi que par des organismes publics, des associations d'entreprises et depuis 2020 par des PME et des particuliers. Il est épaulé par un réseau de plusieurs **milliers de bénévoles** présents sur tout le territoire : *The Shifters*.

Depuis sa création, le *Shift Project* a initié **plus de 40 projets d'étude**, participé à l'émergence de deux manifestations internationales (*Business and Climate Summit*, *World Efficiency*), et organisé plus de 70 colloques, forums, ateliers et conférences. Il a pu influencer significativement plusieurs débats publics et décisions politiques importantes pour la transition énergétique, en France et au sein de l'Union européenne.

L'ambition du *Shift Project* est de mobiliser les entreprises, les pouvoirs publics et les corps intermédiaires sur les risques, mais aussi et surtout sur les opportunités engendrées par la « double contrainte carbone » que représentent ensemble **les tensions sur l'approvisionnement énergétique et le changement climatique**. Sa démarche est marquée par un **prisme d'analyse particulier**, fondé sur la conviction que l'énergie est un facteur de développement de premier ordre : dès lors, les risques induits par le changement climatique, intimement liés à l'usage de l'énergie, relèvent d'une complexité systémique et transdisciplinaire particulière. Les enjeux climat-

énergie conditionnent l'avenir de l'humanité, il est donc nécessaire d'intégrer cette dimension le plus rapidement possible à notre modèle de société.

# Remerciements

Ce rapport est le fruit d'un travail orchestré par l'équipe projet du secteur « Industrie » du PTEF, composée de **Eric Bergé**, chef de projet « Industrie lourde », **Denis Gasquet**, chef de projet « Après-première Vie », **Erwan Proto**, chargé de projet « Industrie » et ingénieur modélisation, **Maxime Efoui-Hess**, coordinateur du secteur « Industrie », ainsi que **Baptiste Andrieu** et **Mathilde Lavelle**, chargés de projet « Industrie » lors de la réalisation de la première version du travail sur l'industrie dans le PTEF, publiée en 2020. L'ensemble de ce travail a été accompagné par **Laurent Morel** et **Jean-Marc Jancovici**, administrateurs du *Shift Project*.

Les aspects développés sur les emplois, les compétences et la formation ont été construits et développés en collaboration avec **Vinciane Martin** et **Yannick Saleman**, respectivement chargée et chef de projet du chantier transversal sur l'emploi dans le PTEF.

Des professionnels des différents secteurs traités ont contribué à la consolidation du rapport au travers de leur relecture, dont parmi elles et eux :

- Dominique Copin, consultant-conférencier, expert du Captage-Stockage de CO<sub>2</sub>.
- Daniel Broseta, Université de Pau et Pays de l'Adour
- Nicolas Vallin
- Fabien Perdu, CEA-LITEN

Les aspects liés à l'industrie automobile et aux batteries ont été construits en collaboration avec **Laurent Perron** et **Jacques Portulier**, chefs de projets sur l'industrie automobile dans le PTEF.

Ce projet a bénéficié de l'apport d'une équipe d'étudiantes et d'étudiants de l'ISAE-Supaéro, encadrée pendant un semestre par le coordinateur de projet Maxime Efoui-Hess, dans le cadre du Projet Ingénierie et Entreprise (PIE). *The Shift Project* remercie l'ISAE-Supaéro et les équipes pédagogiques ayant rendu ce partenariat possible.

*The Shift Project* et l'équipe projet remercient chaleureusement l'ensemble des étudiants pour leur investissement dans la production de documents et d'analyses de qualité, qui ont été cruciales dans la construction des modélisations et conclusions publiées dans ce rapport :

- Léo Clauzel,
- Damien Glattard,
- Samy Gane,
- Aurélien Mure,

- Elena Zakrjevski.

Ce projet a également reçu le soutien des *Shifters* qui nous ont accordé leur temps, ainsi que des membres de l'équipe de *The Shift Project* dont **Emma Stokking, Ilana Toledano et Pauline Brouillard** qui pilotent la tâche essentielle de rendre lisibles et diffusables les conclusions et messages de nos travaux. Un grand merci également à **Florine Marx, Véronique Molénat, Amal Renne et Ariane Duclert** pour leur relecture !

L'équipe remercie également l'ensemble des personnes qui ont apporté leur aide, leur expertise et leurs conseils dans l'élaboration de cette publication, ainsi que les organisations ayant bien voulu partager certaines données, expertises et avis.

***Les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport ne peuvent être attribuées ni aux contributeurs, ni aux relecteurs cités ci-dessus.  
Le contenu de ce rapport n'engage que le Shift Project.***

Crédit photo : ID 652234 sous licence Pixabay

# Table des matières

<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>1</b>
<b>À propos du Plan de transformation de l'économie française</b> .....	<b>3</b>
<b>À propos du think tank <i>The Shift Project</i></b> .....	<b>5</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>7</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>9</b>
<b>Table des figures</b> .....	<b>12</b>
<b>Table des tableaux</b> .....	<b>14</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>16</b>
<b>MESSAGES-CLES</b> .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b>L'APPAREIL PRODUCTIF : ORGANE VITAL DE L'ECONOMIE TRANSFORMEE</b> .....	<b>17</b>
<b>I. Le secteur industriel français, vision d'ensemble</b> .....	<b>20</b>
A. Un secteur lourd et multiple .....	20
B. Des émissions de différentes natures .....	21
<b>II. L'industrie à l'échelle d'une société décarbonée : un double enjeu</b> .....	<b>24</b>
A. Une décarbonation à la fois inévitable et doublement contrainte .....	24
B. Périmètre de l'étude.....	26
<b>DECARBONER L'INDUSTRIE LOURDE</b> .....	<b>29</b>
<b>I. Décarboner l'industrie sidérurgique</b> .....	<b>30</b>
A. La filière aujourd'hui et sa feuille de route.....	30
B. Comment aller plus loin sur les leviers technologiques ?.....	33

C. L'impact des transformations du reste de l'économie sur la demande en acier.....	36
D. La filière sidérurgique après transformation.....	37
<b>II. Décarboner l'industrie cimentière et du béton .....</b>	<b>39</b>
A. La filière aujourd'hui et sa feuille de route.....	39
B. Comment aller plus loin dans la décarbonation ? .....	40
C. La filière ciment-béton après transformation .....	45
<b>III. Décarboner l'industrie de la chimie .....</b>	<b>47</b>
A. La filière aujourd'hui et sa feuille de route.....	47
B. Comment aller plus loin dans la décarbonation ? .....	49
C. La filière chimique après transformation .....	51
<b>IV. La décarbonation de l'industrie lourde dans le PTEF .....</b>	<b>52</b>
A. Vision globale.....	52
B. Rendre possibles les innovations de ruptures.....	54
<b>DECARBONER L'INDUSTRIE MANUFACTURIERE .....</b>	<b>56</b>
<b>I. A l'interface entre usages et matières premières .....</b>	<b>57</b>
<b>II. Un nouveau segment clef : la production de batteries .....</b>	<b>58</b>
Les impacts de production d'une batterie .....	58
Structurer la filière batterie de la mobilité électrifiée .....	60
Une vulnérabilité déplacée vers l'amont de la chaîne de valeur .....	65
<b>PORTER LA FILIERE DE L'APRES-PREMIERE VIE (APV) A LA BONNE ECHELLE .....</b>	<b>67</b>
<b>I. L'APV : définition.....</b>	<b>68</b>
<b>II. Un rôle clé dans la décarbonation de la production industrielle .....</b>	<b>69</b>
<b>III. Structurer la filière ne peut se passer d'une véritable politique industrielle.....</b>	<b>71</b>

<b>CAPTER LE CARBONE DE L'INDUSTRIE .....</b>	<b>73</b>
<b>I. Le CCS dans le PTEF : prioriser une technologie limitée .....</b>	<b>74</b>
Une technologie mûre mais limitée .....	74
Le recours au CCS dans le PTEF .....	77
<b>II. Le captage du carbone à grande échelle : la mobilisation des puits .....</b>	<b>78</b>
<b>PRODUIRE DANS UNE SOCIETE TRANSFORMEE, POUR DES USAGES DECARBONES</b> <b>.....</b>	<b>80</b>
<b>ANNEXE 1 : LA QUESTION DU COUT – LA PRODUCTION D’HYDROGENE ET LE CCS</b> <b>POUR LA SIDERURGIE .....</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>84</b>

# Table des figures

Figure 1 – Nombre d’emplois industriels (en milliers) et part de l’industrie dans l’emploi et la valeur ajoutée (prix courants), entre 1949 et 2018 Source : .....	21
Figure 2 : Répartition sectorielle des émissions sur le territoire français Source : figure de The Shift Project à partir de (I4CE, 2020), (CITEPA, 2019) [6], [7] .....	22
Figure 3 : Répartition sectorielle de la consommation d’énergie de l’industrie Source : figure de The Shift Project à partir de (CITEPA, 2019), (EUROSTAT, 2020) [7], [8] .....	23
Figure 4 : Répartition sectorielle des émissions dues aux procédés industriels Source : figure de The Shift Project à partir de (CITEPA, 2019) [7] .....	23
Figure 5 – Evolution des émissions de GES de l’industrie en France entre 1990 et 2019 Source : graphique de The Shift Project à partir de (CITEPA, 2021) [4] .....	25
Figure 6 – Emissions de GES de la filière métallurgie des métaux ferreux et non-ferreux, entre 1990 et 2019 Source : (CNI, 2021) [13] .....	30
Figure 7 – Usages finaux de l’acier dans les secteurs avals Source : (A3M, 2021) [16] ..	31
Figure 9 – Evolution des émissions GES du secteur de la sidérurgie en France dans le PTEF entre 2016 et 2050 (en MtCO <sub>2</sub> e) Source : calculs de The Shift Project .....	38
Figure 10 : Evolution de la production de ciment et des émissions de GES associées en France, entre 1990 et 2018 Source : (GCCA, 2018) [21] .....	39
Figure 11: Emissions de GES pour la filière ciment française selon la feuille de route du CNI et du SFIC entre 2015 et 2050 Source : (CNI et SFIC, 2021) [10] .....	40
Figure 12: Empreinte carbone des systèmes constructifs Source : (IFPEB et Carbone 4, 2020) [23] .....	42
Figure 13 : Evolution de la répartition des matériaux employés dans la superstructure, en maison individuelle et logements collectifs Sources : calculs de The Shift Project à partir de (ADEME, 2019) [24] .....	43
Figure 14: Réductions des émissions de GES du secteur permises par les leviers du PTEF, entre 2015 et 2050 Vision « filière ciment » Source : calculs de The Shift Project .....	44
Figure 15: Réductions des émissions de GES du secteur permises par les leviers du PTEF, entre 2015 et 2050 Vision « filière béton » Source : calculs de The Shift Project .....	45
Figure 16: Evolution des besoins en béton, ciment et clinker dans l’économie transformée entre 2015 et 2050 (en base 100, année 2015 en référence) Source : calculs de The Shift Project .....	46
Figure 17 : Exemple de potentiel de création d’emplois par le développement de la filière bois Source : calculs de The Shift Project (les résultats concernant la filière bois ne sont ici présentés qu’à titre indicatif, afin d’illustrer un scénario dans lequel ils permettent de compenser les pertes) .....	46

Figure 18: Evolution des émissions GES de l'industrie de la chimie en France, 1990–2019 (en MtCO <sub>2</sub> e/an) Source : (CNI, 2021) [25].....	47
Figure 19 – Evolutions des émissions de GES de la production et de l'intensité en GES de la production, industrie chimique et pharmaceutique Source : (MTE, 2021) [26]....	48
Figure 20 : Répartition des émissions de la filière chimie en France en 2018, selon les sites Source : (CNI, 2021) [25] .....	48
Figure 21 : Evolution des émissions GES du secteur de la chimie en France dans le PTEF entre 2015 et 2050 (en MtCO <sub>2</sub> e) Source : calculs de The Shift Project.....	51
Figure 22 : Evolution des émissions GES du secteur de l'industrie lourde en France dans le PTEF entre 2015 et 2050 (en MtCO <sub>2</sub> e) Source : calculs de The Shift Project.....	53
Figure 23 – Les différentes technologies associées au CCS : CCU, BECCS et DAC Source : (ADEME, 2020) [18].....	75

# Table des tableaux

Tableau 1 – Emissions de GES et données économiques principales des filières de l'industrie en France Source : calculs de The Shift Project à partir de (CITEPA, 2021) (INSEE, 2018) [4], [5] .....	20
Tableau 2 – Leviers mobilisés par la feuille de route du secteur, et projection des effets Source : (CNI, 2021) [13].....	32
Tableau 3 – Flux de ferrailles en France en 2017 Source : synthèse de The Shift Project sur la base de (ADEME, 2020) [17] .....	34
Tableau 4 : Potentiel annuel de stockage du carbone par CCS pour la filière ciment Source : (ADEME, 2021) [18].....	34
Tableau 5 : Evaluation la quantité d'électricité associée à la production d'hydrogène par électrolyse pour produire l'ammoniac français Source : calculs de The Shift Project .....	35
Tableau 6 – Evolution des demandes en acier dans les secteurs avals et effet sur les volumes d'acier produits en 2050 Source : calculs de The Shift Project à partir de (A3M, 2021) [16].....	37
Tableau 7 : Réductions des émissions de GES du secteur permises par les leviers du PTEF, entre 2015 et 2050, sur les deux voies de production Source : calculs de The Shift Project.....	38
Tableau 8 : Seuils maximum de contenu carbone par m <sup>2</sup> fixé par la RE2020 Source : (MTE, 2021) [22].....	40
Tableau 9: Evolution des émissions de GES de production du béton, entre 2015 et 2050 après mobilisation des leviers technologiques de progrès unitaires Source : calculs de The Shift Project.....	41
Tableau 10 : Part des trois familles de leviers de décarbonation de l'industrie lourde dans l'effort total de réduction à 2050 Source : calculs de The Shift Project.....	54
Tableau 11 – Empreinte carbone de la production de batteries selon la zone géographique et contribution de la phase amont (extraction, première transformation, production des matériaux actifs) Source : calculs de The Shift Project [28] à partir de [27], [29]–[47].....	59
Tableau 12 : Evolutions des capacités des batteries dans les véhicules électrifiés dans le PTEF Source : (The Shift Project, 2021) [20].....	61
Tableau 13 – Evolution de l'impact carbone territorial de la filière batterie, dans l'économie du PTEF Source : calculs de The Shift Project [28].....	65

Tableau 14 : évaluation de sensibilité du prix de la production d'acier suivant le coût de production de l'hydrogène Source : calculs de The Shift Project **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 15 – Analyse de sensibilité du prix de l'acier sous CCS Source : calculs de The Shift Project ..... 83

# Liste des abréviations

<b>APV</b>	Après-Première Vie
<b>CBAM</b>	Carbon Border Adjustment Mechanism
<b>CCS</b>	Carbon Capture and Storage <i>(en français : Captage et Stockage du Carbone – CSC)</i>
<b>CNI</b>	Conseil National de l'Industrie
<b>DRI</b>	Direct Reduced Iron <i>(en française : réduction directe du fer)</i>
<b>GES</b>	Gaz à Effet de Serre
<b>SNBC</b>	Stratégie Nationale Bas Carbone
<b>VUL</b>	Véhicule Utilitaire Léger
<b>Whc</b>	Watt-heure de capacité de batterie <i>(désigne la capacité de stockage d'une batterie et non une consommation électrique)</i>

# Messages-clés

## Une décarbonation à la fois inévitable et doublement contrainte

L'industrie représente près de 1/5 des émissions territoriales françaises, soit bien plus que son poids économique.

Elle a fait depuis les années 1990 un effort de décarbonation, principalement mené par le secteur de la chimie, lui ayant permis d'atteindre une baisse de ses émissions annuelles de 60 MtCO<sub>2</sub>e [4]. Mais cet effort reste très insuffisant pour atteindre l'objectif d'une nouvelle réduction de 80 % à 2050.

C'est sur l'industrie lourde que pèse très nettement la principale part des efforts à mener. La chimie, la métallurgie (principalement la sidérurgie, c'est-à-dire la production d'acier) et l'industrie des matériaux de construction (principalement le ciment), représentent à elles seules les ¾ des émissions du secteur [4].

A la fois colonne vertébrale et secteur à part entière, l'enjeu de l'industrie est double. Elle doit permettre aux autres secteurs de se transformer – en produisant les biens et infrastructures dont ils ont besoin pour décarboner leurs activités – tout en assurant que cette production devienne elle-même décarbonée et presque totalement indépendante des intrants fossiles.

### Seule une combinaison des trois familles de leviers disponibles permet d'atteindre l'objectif de – 80 % des émissions carbonées à 2050 pour le secteur :

- **Les leviers de progrès continu** (efficacité énergétique, changement des combustibles des fours, recyclage mécanique etc.), qui permettent d'assurer **40 % du chemin total de décarbonation du secteur** ;
- **La mobilisation des leviers de rupture technologique** (recours à l'hydrogène produit par électrolyse, recours au CCS, recyclage chimique etc.), qui permettent d'assurer **40 % du chemin total de décarbonation du secteur** ;
- **Les leviers de sobriété** (sobriété sur les emballages plastiques, sobriété imposée par la construction neuve etc.), qui permettent d'assurer **20 % du chemin total de décarbonation du secteur**.

Ainsi, **bien que la transformation de l'industrie dans le PTEF soit parfois plus ambitieuse que les feuilles de route sectorielles sur la mobilisation des leviers technologiques, elle ne peut se passer d'une adaptation à une sobriété doublement inévitable.** Inévitable en ce qu'elle découle des contraintes des autres secteurs, en aval, qui ne peuvent atteindre leurs propres objectifs qu'en recourant à une part de sobriété. Inévitable aussi en ce qu'elle est indispensable à l'industrie elle-même pour se placer sur la bonne trajectoire.

**De plus, les technologies de rupture sont un pari à pousser, mais restent un pari. Les risques d'échec étant bien plus forts sur les leviers technologiques de rupture que sur les leviers de progrès continu, il est essentiel de comprendre qu'il doit être envisagé de recourir à une sobriété plus intense si leur déploiement échoue dans les années à venir.** Pousser leur développement devra donc s'accompagner d'outils de suivi, permettant de détecter un écart trop grand à la trajectoire qui permet de les mobiliser à temps, et n'affranchira en rien de préparer l'adaptation à la sobriété.

01

**L'APPAREIL  
PRODUCTIF :  
ORGANE VITAL  
DE L'ÉCONOMIE  
TRANSFORMÉE**

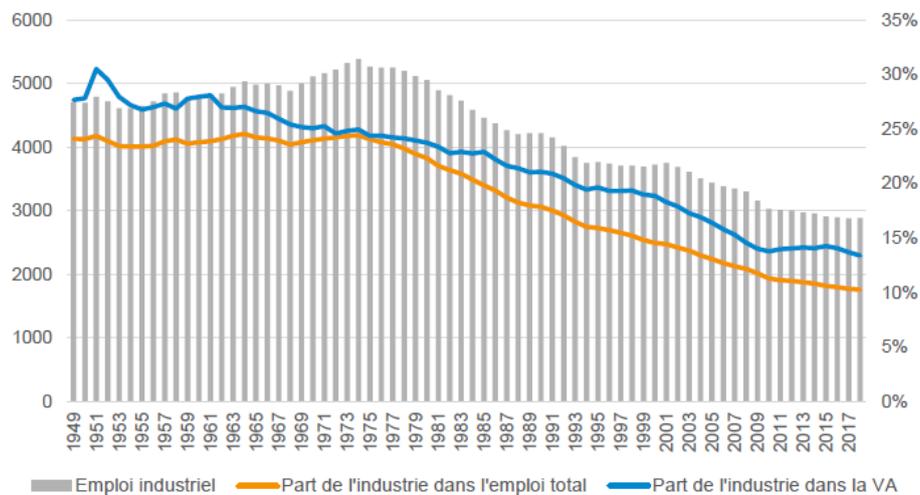
# I. Le secteur industriel français, vision d'ensemble

## A. Un secteur lourd et multiple

Emissions GES annuelles et données économiques principales en France, 2016	Emissions GES (en MtCO <sub>2</sub> e)	Part dans GES France (en %)	Part dans VA France (en %)	Emplois directs (en milliers)	Part dans emploi France (en %)
Chimie	20,7	5%	0,8%	139	0,6%
Sidérurgie	14,1	3%	0,1%	21	0,1%
Cokefaction et raffinage	13,6	3%	0,2%	9	0,0%
Ciment, chaux, plâtre	13,8	3%	0%	6	0,0%
<b>Total périmètre PTEF</b>	<b>62,3</b>	<b>14%</b>	<b>1,1%</b>	<b>175</b>	<b>0,7%</b>
Papier carton	2,635	0,6%	0,2%	58	0,2%
Verre	3,248	0,7%	0,4%	34	0,1%
Métaux précieux	2,282	0,5%	0,1%	20	0,1%
Industries réfractaires	1,294	0,3%	0%	3	0,0%
Industries extractives	1,146	0,3%	0%	20	0,1%
Fonderie	0,498	0,1%	0%	17	0,1%
<b>Total industrie lourde</b>	<b>73,4</b>	<b>16%</b>	<b>2%</b>	<b>327</b>	<b>1,3%</b>
<b>Total industrie manufacturière</b>	<b>20,3</b>	<b>5%</b>	<b>9%</b>	<b>2526</b>	<b>11%</b>
<b>Total industrie (hors énergie)</b>	<b>93,7</b>	<b>21%</b>	<b>11%</b>	<b>2853</b>	<b>12%</b>

**Tableau 1 – Emissions de GES et données économiques principales des filières de l'industrie en France**  
*Source : calculs de The Shift Project à partir de (CITEPA, 2021) (INSEE, 2018) [4], [5]*

En raison de capitaux importants et d'une automatisation croissante, l'industrie pèse tant en valeur ajoutée qu'en emplois directs dans l'économie française (10 à 12 %, majoritairement pour l'industrie manufacturière) et génère une très large activité de services support qui vient y ajouter des emplois indirects.



Note : l'industrie correspond ici à la branche « Industrie manufacturière, industries extractives et autres (énergie, eau, gestion des déchets et dépollution) ».

**Figure 1 – Nombre d'emplois industriels (en milliers) et part de l'industrie dans l'emploi et la valeur ajoutée (prix courants), entre 1949 et 2018**  
**Source : (INSEE, 2021) [6]**

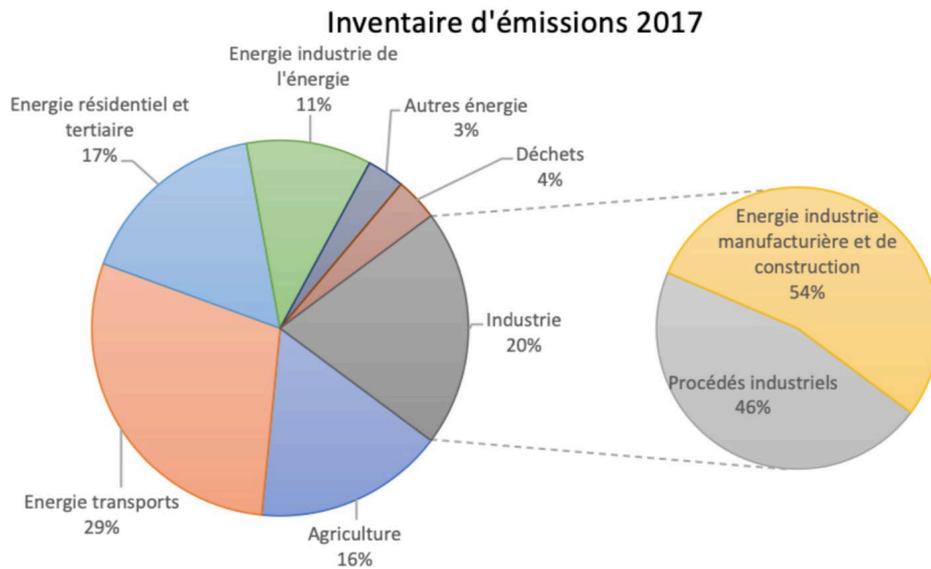
Pour comprendre les dynamiques de transformations pouvant être impulsées au sein du secteur industriel, quatre de ses grandes particularités doivent être comprises, parce qu'elles en formeront les points de départ et la toile de fond :

- L'industrie est un secteur fortement exposé à la concurrence internationale (certains secteurs de l'industrie lourde comme la chimie ou l'acier sont totalement mondialisés et les usines françaises sont les maillons d'une chaîne de valeur globale) ;
- La balance commerciale de l'industrie française s'est fortement dégradée au cours des trois dernières décennies [1]–[3] ;
- Ces secteurs fortement émetteurs sont déjà soumis au système européen des ETS ;
- Le fait qu'une partie des émissions de l'industrie soit le produit direct des réactions chimiques entrant en jeu dans les procédés de production implique une mobilisation de leviers supplémentaires au simple changement de mix énergétique.

## B. Des émissions de différentes natures

**L'industrie en France représente 20 % des émissions annuelles de GES [7] [8],** soit bien davantage que son poids dans l'économie française.

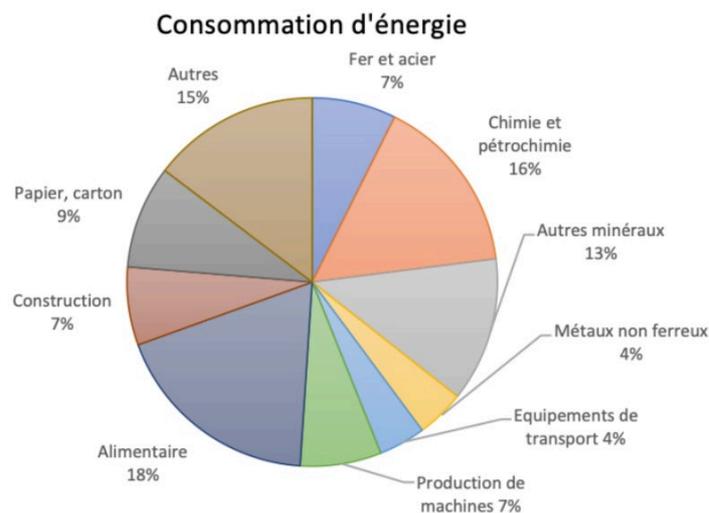
Les gaz à effet de serre émis par le secteur de l'industrie sont pour 77 % du CO<sub>2</sub>, pour 20 % des HFCs et les 3 % restants sont du N<sub>2</sub>O et autres gaz [8], **pour un total de 95,4 MtCO<sub>2</sub>e.**



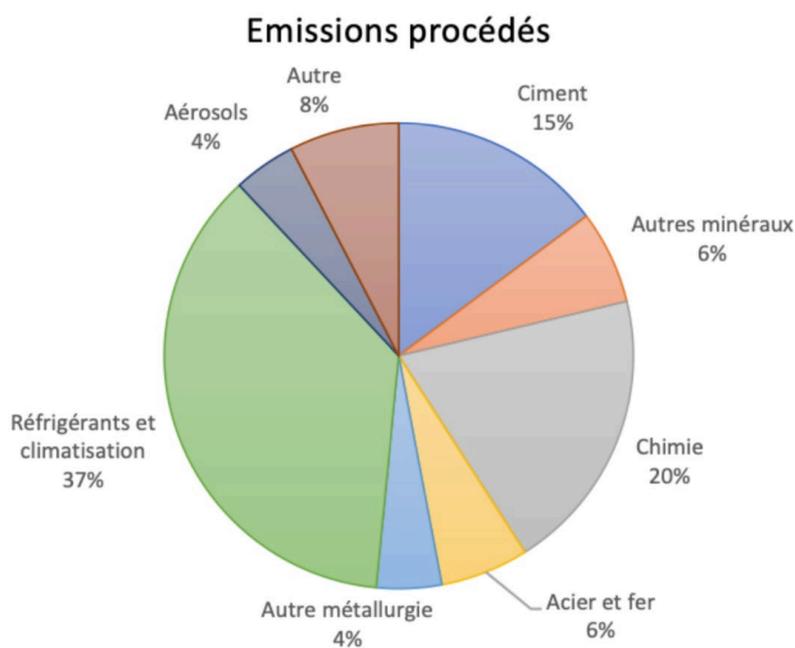
**Figure 2 : Répartition sectorielle des émissions sur le territoire français<sup>1</sup>**  
**Source : figure de The Shift Project à partir de (IACE, 2020), (CITEPA, 2019) [7], [8]**

Ces émissions viennent pour 46 % des procédés eux-mêmes et pour 54 % de la combustion de carburants pour produire de l'énergie. Ces consommations d'énergie et émissions de procédés proviennent d'une dizaine de filières industrielles (figure 2, figure 3).

<sup>1</sup> Afin de ne pas représenter d'émissions négatives, les émissions dues à l'utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (- 31,9 MtCO<sub>2</sub>e) n'ont pas été représentées sur ce schéma, les émissions annuelles de la France hors utilisation des terres étant de 464,6 MtCO<sub>2</sub>e.



**Figure 3 : Répartition sectorielle de la consommation d'énergie de l'industrie<sup>2</sup>**  
**Source : figure de The Shift Project à partir de (CITEPA, 2019), (EUROSTAT, 2020) [8], [9]**



**Figure 4 : Répartition sectorielle des émissions dues aux procédés industriels<sup>3</sup>**  
**Source : figure de The Shift Project à partir de (CITEPA, 2019) [8]**

L'importance des infrastructures et des intrants physiques supportant les activités industrielles en fait **un secteur dont les vulnérabilités face aux risques physiques sont plurielles, conséquentes et internationales (99 % des minerais métalliques, 100 % du minerai de fer et 53 % de l'acier consommé en France en 2017 ont été importés [10])**. L'appareil productif étant la colonne matérielle de l'intégralité de notre

<sup>2</sup> Le total de consommation d'énergie est de 26,5 Mtep, correspondant à 51,4 MtCO<sub>2</sub>e.

<sup>3</sup> Le total est de 43,9 MtCO<sub>2</sub>e

économie, il est indispensable d'en assurer la résilience de manière concrète et stratégique.

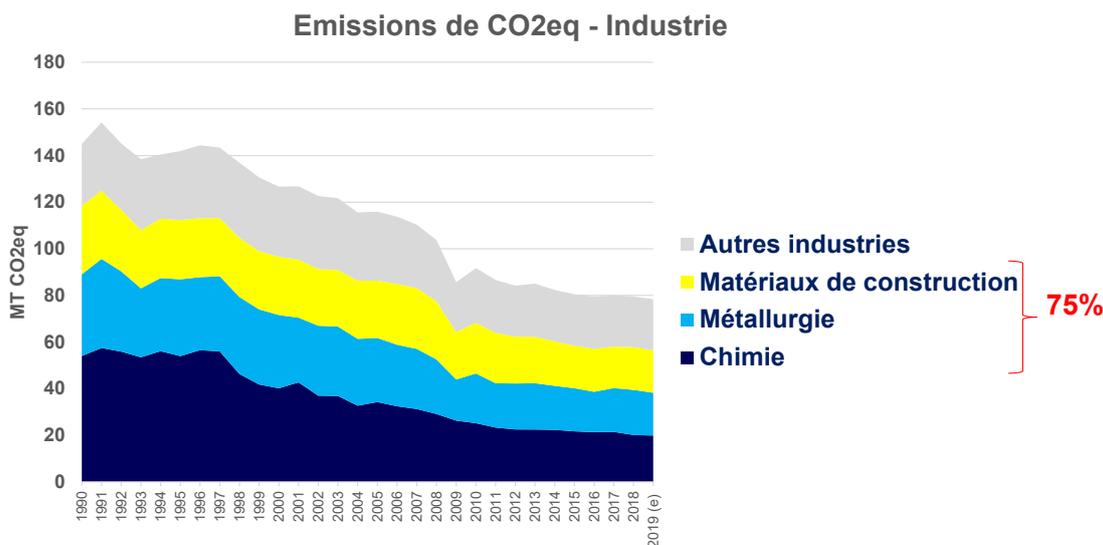
Ses acteurs sont familiers de la gestion des risques associés à leurs infrastructures et intrants. Ainsi les propositions du PTEF visent-elles à s'appuyer sur cette capacité de réflexion et d'organisation stratégiques, dans le but de construire une résilience nationale.

## **II. L'industrie à l'échelle d'une société décarbonée : un double enjeu**

### **A. Une décarbonation à la fois inévitable et doublement contrainte**

Elle a fait depuis les années 1990 un véritable effort de décarbonation, principalement mené par le secteur de la chimie, lui ayant permis d'atteindre une baisse de ses émissions annuelles de 60 MtCO<sub>2</sub>e [4]. Mais cet effort reste très insuffisant pour atteindre l'objectif d'une nouvelle réduction de 80 % à 2050 par rapport à 2015.

C'est sur l'industrie lourde que pèse très nettement la principale part des efforts à mener. La chimie, la métallurgie (principalement la sidérurgie, c'est-à-dire la production d'acier) et l'industrie des matériaux de construction (principalement le ciment), représentent à elles seules les ¾ des émissions du secteur [4]. La moitié des gaz à effet de serre de l'industrie provient même d'un petit groupe de 15 sites uniquement (parmi lesquels les usines métallurgiques de Fos-sur-Mer et Dunkerque ou encore les raffineries de Normandie).



**Figure 5 – Evolution des émissions de GES de l'industrie en France entre 1990 et 2019**

**Source : graphique de The Shift Project à partir de (CITEPA, 2021) [4]**

L'industrie manufacturière (automobile, cosmétique, alimentation, machines etc.) qui assemble et produit les biens intermédiaires et finaux ne pèse qu'1/4 des émissions du secteur mais dicte en revanche la demande de son homologue lourd.

A la fois colonne vertébrale et secteur à part entière, l'industrie porte un enjeu double. Elle doit permettre aux autres secteurs de se transformer – en produisant les biens et infrastructures dont ils ont besoin pour décarboner leurs activités – tout en assurant que cette production devienne elle-même décarbonée et presque totalement indépendante des intrants fossiles.

L'industrie se doit de remplir deux missions au sein du PTEF :

- **Permettre la transformation** : l'appareil productif doit être en mesure de produire les biens nécessaires à tous les autres secteurs de l'économie, dont les services, les usages et les infrastructures ont été transformés pour devenir résilients.
- **Assurer sa propre résilience** : les chaînes de valeur de l'industrie doivent être rendues intrinsèquement résilientes. L'industrie se doit de comprendre quelles sont les vulnérabilités de ses activités, comment les amoindrir ou les contourner, notamment en se rendant capable de produire les biens nécessaires tout en diminuant ses émissions propres.

Pour y parvenir, l'industrie doit mobiliser deux leviers :

- Réduire les émissions provenant de sa consommation d'énergie, carbonée et considérable (la chimie consomme par exemple de grandes quantités de gaz naturel, et le ciment des hydrocarbures liquides et solides).

- Réduire les émissions de procédé qui sont issues des réactions chimiques entrant en jeu dans la production des matières premières et transformées (transformation du minerai de fer en acier, transformation du gaz naturel en hydrogène puis ammoniac qui servira pour les engrais etc.).

A moins de radicalement changer la voie chimique, les émissions de procédé apparaissent quant à elles inévitables, bien qu'elles soient loin d'être anecdotiques. Les 2/3 des émissions des fours de cimenteries proviennent par exemple de la réaction chimique du calcaire [11], et l'hydrogène (permettant de produire de l'ammoniac, élément de base des engrais azotés) est produit par une réaction (le vaporéformage) produisant de grandes quantités de CO<sub>2</sub> après avoir fait réagir du gaz naturel avec de la vapeur d'eau.

## B. Périmètre de l'étude

### 1. Les filières concernées

Le secteur industrie dans le plan de transformation regroupe les filières extractives, de première transformation et manufacturières. Il comprend toutes les chaînes de production du territoire et tend à avoir une vision d'ensemble des chaînes de valeur dont sont issus les biens consommés et utilisés en France.

**L'industrie lourde** est considérée comme la partie la plus amont de nos activités, puisqu'elle établit le lien entre nos secteurs économiques et les ressources non-énergétiques leur étant directement ou indirectement nécessaires. Cette partie du système de production est traitée notamment au travers de trois filières :

- **L'acier,**
- **Le ciment,**
- **La chimie.**

**L'industrie manufacturière** est considérée comme l'interface entre les flux de matières de l'industrie lourde et les autres secteurs de l'économie. L'ambition étant de construire une vision générale sur cet ensemble de filières multiple et hétérogène, les questions liées aux biens sont traitées au travers de deux grands axes :

- **La filière de production de batteries,** dont l'exemple permet de comprendre comment les besoins des secteurs de l'économie en transformation appellent de nouveaux impératifs de production pour l'industrie.

- **La structuration des filières de recyclage et de réemploi**, au travers desquelles apparaissent les principales questions à soulever pour construire une véritable stratégie de gestion de nos biens.

Le présent document rassemble les directions de transformation générales ayant été construites à ce stade. Il a vocation à donner la vision d'ensemble qui se dessine pour l'appareil productif français une fois devenu résilient, en soulignant les considérations systémiques qui y sont attenantes. Deux documents complémentaires ont été également produits :

- **Un rapport sur la transformation de la filière Ciment** – un travail complémentaire est mené sur la filière de l'industrie lourde cimentière, afin d'en faire apparaître les axes de décarbonation principaux, ainsi que les alternatives de sobriété à réfléchir notamment en lien avec les transformations portées dans le secteur du logement.
- **Un rapport sur la transformation de la filière Chimie** – un travail complémentaire est mené sur la filière de l'industrie lourde chimique, afin d'en faire apparaître les axes de décarbonation principaux, ainsi que les alternatives de sobriété à réfléchir notamment en lien avec les transformations portées dans le secteur du recyclage et du réemploi.

## 2. Le périmètre géographique

Le périmètre du PTEF est territorial : les objectifs de décarbonation (- 5 %/an) étant construit sur une approche semblable à celle de la Stratégie Nationale Bas Carbone [12], ce sont bien les émissions du territoire qui seront comptabilisées, et non son empreinte.

Les limites associées à ce périmètre sont aujourd'hui largement documentées (par exemple par le Haut Conseil pour le Climat [13]) et ont été intégrées aux réflexions du PTEF pour décrire la manière dont ses conclusions doivent être remises en contexte « empreinte ». Dans les travaux sur l'industrie, l'approche retenue est la suivante :

- Les analyses physiques (flux de matière, consommations d'énergie, émissions de GES) sont réalisées au niveau territorial ;
- Les leviers du PTEF industrie sont construits de manière à être appropriables par les pouvoirs publics français dès les 5 années du mandat présidentiel qui s'annonce : pour certains parce qu'ils peuvent être directement déployés sur le territoire, pour d'autres parce que les sphères françaises sont en mesure de les porter et les défendre à l'échelle européenne ;

- le lien entre les volumes de production de l'industrie et l'évolution de la demande, pilotée par les usages aval (mobilité, logement, emballages etc.), est modélisé différemment suivant les filières :
  - Pour les filières à forte implantation nationale (comme le ciment-béton), le lien entre production et demande est établi de manière directe ;
  - Pour les filières dont le marché est international et européen (la chimie par exemple), les projections sont développées au regard des dynamiques et réglementations européennes (directive européenne sur les plastiques par exemple) et en supposant parfois une transmission des dynamiques françaises au niveau européen, dans un contexte où la France ne restera pas seule sur le continent dans une démarche de transformation de l'ampleur du PTEF ;
  - Les autres filières, comme celle de l'industrie manufacturière, suivent des trajectoires indexées sur l'évolution des usages français ;
- Les leviers indispensables aux transformations (financements, réglementations, normes etc.) sont formulés au niveau européen lorsque l'échelle nationale les rend sans effet de par la conformation du marché ou de la gouvernance ;

**Les conclusions ici présentées** ne sont donc pas exhaustives et n'épuisent en rien les sujets essentiels liés à la transformation de notre système industriel, mais **elles dressent les directions principales à explorer, les limites des leviers technologiques, les interactions avec les transformations des autres secteurs** et la méthodologie à adopter pour être en mesure de dimensionner les filières de production qui permettent la résilience des autres secteurs.

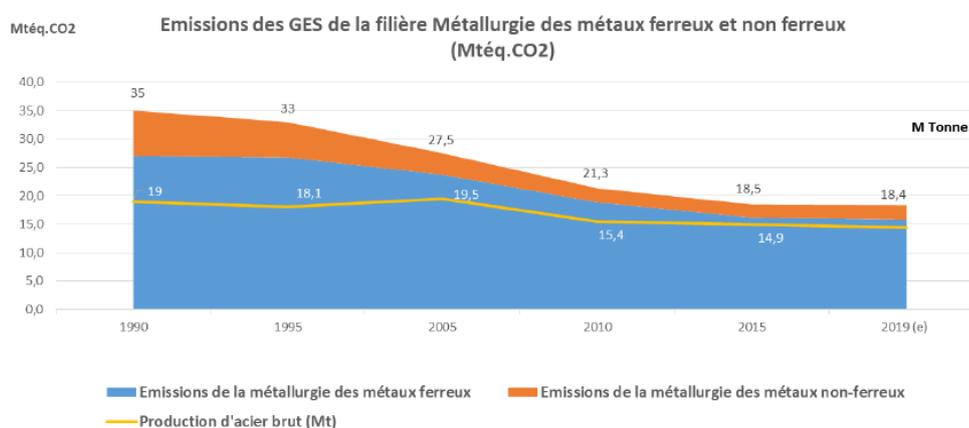
02

**DÉCARBONER  
L'INDUSTRIE  
LOURDE**

# I. Décarboner l'industrie sidérurgique

## A. La filière aujourd'hui et sa feuille de route

La sidérurgie est le 2<sup>e</sup> secteur industriel le plus émetteur de GES après la chimie, avec 17 MtCO<sub>2</sub>e émises par an<sup>4</sup> lorsqu'on lui intègre les émissions qu'il génère via la cokerie (qui représente près de 3 MtCO<sub>2</sub>e/an) [4].



**Figure 6 – Emissions de GES de la filières métallurgie des métaux ferreux et non-ferreux, entre 1990 et 2019**

Source : (CNI, 2021) [14]

**La filière fonte (hauts fourneaux) représente de l'ordre de 70 % de la production française**, avec ses deux grands sites que sont Fos et Dunkerque [15]. Avec une émission de CO<sub>2</sub> (directe et indirecte avec la fabrication du coke et de la chaux) par tonne d'acier de **1,9 tCO<sub>2</sub>e/t** [16], cette voie de production d'acier primaire (c'est-à-dire non-recyclé) est particulièrement carbonée :

- Elle engendre des émissions due à l'intensité énergétique du procédé (environ 20 GJ par tonne produite [16]), dont la fabrication du coke à partir de houille ;
- Elle engendre également des émissions de procédé, essentiellement la réaction du coke (du carbone) avec le minerai de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) qui produit le fer (Fe) et du CO<sub>2</sub>.

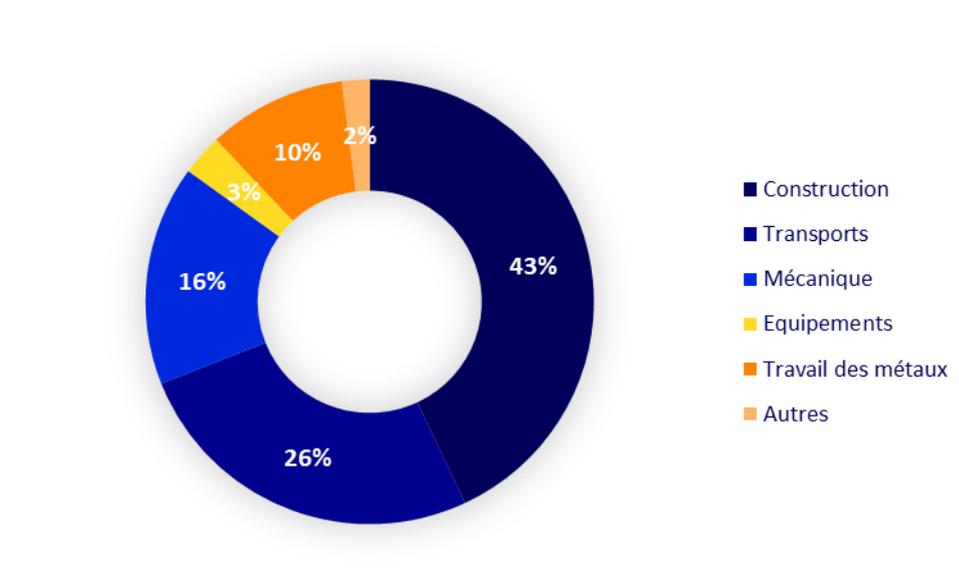
**La filière électrique, qui utilise de la ferraille pour la refondre, assure 30 % de la production d'acier** [15]. Elle produit de l'acier secondaire ou recyclé, souvent employé

<sup>4</sup> Données 2016

dans des usages moins hauts de gamme que l'acier primaire. Grâce à l'électricité décarbonée du territoire, ses émissions par tonne d'acier produit sont inférieures à **0,4 tCO<sub>2</sub>e/t en France** [16].

Dans un secteur déjà placé sous le régime des EU-ETS, la réforme de 2021 constituera une véritable incitation, la baisse annuelle des quotas gratuits étant entérinée. Sans pilotage efficace des conséquences, cela peut cependant pousser les acteurs soit à décarboner, soit à délocaliser.

La sidérurgie française est un secteur ultra-concentré, un seul acteur assurant plus de 70 % de la production française [15]. Elle est par contre très fortement intégrée dans des dynamiques internationales, contrôlée par des multinationales régies par des impératifs mondialisés : avec 17 milliards d'euros de production en 2018, la filière française en exporte en effet près de 14 milliards et importe tout autant pour une balance commerciale qui reste, bon an, mal an, à l'équilibre [15].



**Figure 7 – Usages finaux de l'acier dans les secteurs avals**  
Source : (A3M, 2021) [17]

**Ses débouchés sont pour presque aux trois quarts liés aux activités de la construction et du transport** (Figure 7). Les transformations que le PTEF déploie dans les secteurs du logement et de la mobilité (longue distance, quotidienne, fret et industrie automobile) ont donc un impact majeur sur les besoins en acier.

La feuille de route de la filière publiée en mai 2021 est encore partielle à ce stade vis-à-vis des objectifs de la SNBC, son horizon temporel s'arrêtant à 2030 et non 2050.

Leviers de décarbonation mobilisables	Effet des leviers sur les GES en 2030 (en ktCO <sub>2e</sub> )
Amélioration de l'efficacité énergétique dans la production d'acier	non chiffré
Augmentation du taux de recyclage d'acier circulaire	-2600
"Smart Carbon" : innovation et évolutions technologiques dans la fabrication d'acier	-4100
Filière acier haut-fourneau (en % par rapport à 2015)	-31%

**Tableau 2 – Leviers mobilisés par la feuille de route du secteur, et projection des effets**  
**Source : (CNI, 2021) [14]**

La réduction d'environ 30 % des émissions de la filière annoncée à 2030 est déjà très significative. Atteindre cet objectif s'appuie dans la feuille de route sur deux leviers centraux de la filière intégrée :

- **Le recyclage de l'acier :**
  - **En développant la filière électrique** afin de pousser plus loin les taux de recyclage de ferraille en France, plutôt que de les exporter pour réimporter de l'acier plus carboné (par exemple de Turquie).
  - **En introduisant des ferrailles dans la filière haut fourneaux** (certains projets étant déjà programmés à Fos-sur-Mer et Dunkerque pour 2024), qui permet de s'appuyer sur les installations déjà existantes.
- **Utiliser de nouvelles technologies « Smart Carbon »**, comme le projet IGAR Hybrid HF3 consistant à substituer le coke et le charbon par une réinjection des gaz sidérurgiques et potentiellement de l'hydrogène.

L'amélioration de l'efficacité énergétique, si elle est évidemment indispensable, ne représente qu'un potentiel de réduction des émissions limité, la plupart des installations sidérurgiques étant aujourd'hui déjà fortement optimisées [14].

L'enjeu étant de placer la filière sur une trajectoire de - 5 %/an menant à 80 % de réduction des émissions à 2050, **le PTEF propose de porter les leviers plus loin que dans la feuille de route sectorielle.**

## **B. Comment aller plus loin sur les leviers technologiques ?**

Il sera difficile d'aller véritablement plus vite, les investissements dans la sidérurgie – industrie capitaliste par excellence – étant considérables. Ils engagent pour des dizaines d'années, doivent donc être évalués avec minutie et exigent de construire une trajectoire viable et claire.

**Les voies technologiques pour réduire les émissions en France sont au nombre de trois :**

- **Le développement de l'acier électrique,**
- **Le déploiement des technologies de réduction directe du minerai de fer,**
- **Le captage et le stockage du carbone (CCS).**

### **1. Pousser le développement de l'acier recyclé**

Favoriser le recyclage, c'est favoriser l'exploitation de nos déchets sidérurgiques en produisant de nouveaux produits à partir des ferrailles issues des usages du territoire. Or la France exporte aujourd'hui 4 Mt de ferraille par an, qui partent se faire transformer, notamment par la voie électrique, sur des territoires à l'électricité plus carbonée.

**Il est ainsi préconisé dans le PTEF de pousser la réincorporation de nos ferrailles dans l'économie sidérurgique nationale :**

- **En développant la filière électrique sur le territoire,** qui peut s'appuyer sur un mix électrique bien plus décarboné que ceux vers lesquels les exportations se font actuellement ;
- **En augmentant le taux d'incorporation des ferrailles dans la filière intégrée.**

<b>Flux et incorporation des ferrailles dans la production d'acier en France, en kt</b>	<b>2017</b>
<b>Collecte ferraille</b>	<b>12,6</b>
<b>Importation</b>	<b>1,9</b>
<b>Exportation</b>	<b>6,2</b>
<b>Utilisation locale</b>	<b>8,3</b>
<b>Production par filière intégrée</b>	<b>10,9</b>
<i>Taux d'incorporation ferraille</i>	21%
<b>Production par voie électrique</b>	<b>4,7</b>
<i>Taux d'incorporation ferraille</i>	100%
<b>Production par fonderie</b>	<b>1,3</b>
<i>Taux d'incorporation ferraille</i>	100%
<b>Production totale d'acier</b>	<b>16,8</b>
<i>Taux d'incorporation moyen</i>	49%

**Tableau 3 – Flux de ferrailles en France en 2017**

Source : synthèse de *The Shift Project* sur la base de (ADEME, 2020) [18]

## 2. Le CCS, captage et stockage du carbone

L'importante production de CO<sub>2</sub> par les installations sidérurgiques et sa concentration sur un nombre restreint de site (11) permettent selon l'ADEME d'envisager un potentiel de 11,5 MtCO<sub>2</sub>/an captable et stockable (toutes contraintes prises en compte) une fois le CCS déployé.

<b>Volumes annuels de carbone captables et stockables en France (en MtCO<sub>2</sub>)</b>	<b>Volume émis</b>	<b>Volume captable</b>	<b>Volume stockable</b>
<b>Acier</b>	23	17	11,5

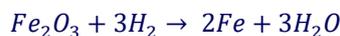
**Tableau 4 : Potentiel annuel de stockage du carbone par CCS pour la filière ciment**

Source : (ADEME, 2021) [19]

Dans le PTEF, le potentiel de captage et stockage du carbone sur lequel s'appuie la transformation de la sidérurgie est de 4 MtCO<sub>2</sub>/an.

### 3. La réduction directe du fer avec l'hydrogène

Cette technologie repose sur l'utilisation d'hydrogène plutôt que de ressources fossiles pour réduire le minerai de fer, ce qui permet d'éviter les émissions générées lors de la réaction.



#### Équation de réduction du minerai de fer par l'hydrogène

Appelée DRI (*direct reduction of iron*), cette voie n'est intéressante que si l'hydrogène est décarboné. Il existe plusieurs variantes allant d'un apport partiel d'hydrogène à 100 % d'hydrogène issu d'électrolyse. En se plaçant à un horizon post 2030, c'est cette dernière option qui est ici retenue.

Sur la base d'une hypothèse classique de 55 kWh/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>, il faut près de 3 TWh d'électricité décarbonée pour produire une tonne d'acier à partir de minerai de fer (Tableau 2).

Production d'hydrogène par électrolyse (en place du vapocraquage) pour l'acier	Besoins en H <sub>2</sub> (en t)	Besoins en élec. (en TWh)
Pour 1 Mt d'acier produite en France	55	3

**Tableau 5 : Evaluation la quantité d'électricité associée à la production d'hydrogène par électrolyse pour produire l'ammoniac français**  
Source : calculs de The Shift Project

Le projet HYBRIT en Suède devrait être le premier à exploiter cette voie à grande échelle, grâce à l'électricité décarbonée de Vattenfall et à des investissements massifs afin d'exploiter les larges réserves.

### 4. Nos hypothèses sur l'utilisation des leviers de décarbonation

A horizon 2030, nous considérons que la filière suit la trajectoire décrite dans la feuille de route de la filière sidérurgique publiée en juin 2021.

A horizon 2050, la décarbonation de la filière s'appuie sur la mobilisation de trois grands leviers :

- **Le développement de la voie électrique**, qui restera globalement stable en volume (compte tenu de la disponibilité des ferrailles et des effets de la sobriété des secteurs aval) tout en continuant son optimisation ;
- **Pour la filière intégrée deux voies sont possibles :**

- **La réduction directe du fer (DRI) par de l'hydrogène décarboné** qui suppose des consommations supplémentaires d'électricité décarbonée, non intermittente et non effaçable assez considérables.
- **Le CCS.**

Pour la filière intégrée, en s'appuyant de manière équilibrée sur les deux leviers disponibles, **la demande supplémentaire en électricité générée par les besoins en hydrogène pour la DRI s'élève à 13 TWh, pour assurer la production de 4 Mt d'acier.**

Les ordres de grandeurs des coûts entre ces deux solutions ne sont pas très éloignés. Mais les choix industriels extrêmement lourds ne pourront se faire que sur des analyses beaucoup plus poussées. Un autre paramètre majeur sera la disponibilité et le coût de l'électricité.

Sur le fond, l'impact de ce surcoût est bien relativement moindre que pour le ciment par exemple : avec un prix de l'acier historiquement dans un couloir de 400 à 600 USD/t. Mais c'est un marché mondialisé où un écart de prix de quelques €/t peut vous faire perdre un marché.

## C. L'impact des transformations du reste de l'économie sur la demande en acier

Le PTEF entraînant une transformation systémique de l'économie, les secteurs débouchés de l'industrie sidérurgique voient également leurs propres dynamiques affectées, entre autres par l'effet de leviers de sobriété inévitables au respect de leurs propres impératifs :

- Dans le domaine de la construction, la baisse de la construction neuve, dont le rythme décroît à partir de 2030 pour atteindre 250 000 logements neufs construits par an en 2050 [20], engendre une réduction des usages du béton armé de 15 %. Cet effet se combine à l'intensification de l'emploi de matériaux bio- et géo-sourcés, qui entraîne une réduction de 23 % des volumes de béton (comme détaillé dans la partie de ce rapport portant sur l'industrie cimentière et du béton, ainsi que dans le rapport dédié) ;
- Les transformations des usages de mobilité (quotidienne, longue distance et fret) poussent l'industrie automobile à prévoir à partir de 2030 une réduction du nombre de véhicules neufs produits, qui atteint environ un tiers à 2050 [21].
- Les autres secteurs clients de la sidérurgie restent stables, dans les projections construites dans le PTEF.

Demandes en acier dans les secteurs aval du PTEF	Part du secteur dans la demande acier en 2018	Evolutions du secteur en 2050, en volume de biens	Effet sur les volumes d'acier en 2050
Construction	43%	-23%	-10%
Transports	26%	-33%	-9%
Mécanique	16%	0%	0%
Equipements	3%	0%	0%
Travail des métaux	10%	0%	0%
Autres	2%	0%	0%
<b>Total</b>	100%		-18%
<b>Production d'acier (en Mt)</b>	<b>15</b>		<b>12</b>

**Tableau 6 – Evolution des demandes en acier dans les secteurs aval et effet sur les volumes d'acier produits en 2050**

Source : calculs de The Shift Project à partir de (A3M, 2021) [17]

Les grandes hypothèses suivantes de sobriété provenant des autres chantiers du PTEF entraîneront une érosion des besoins nationaux en acier de 18% entre 2030 et 2050.

**Dans le cas où une stratégie priorisant la réduction des importations est engagée,** les effets de la sobriété sur l'activité des acteurs industriels sont diminués, **la réduction des volumes d'acier consommés se limitant à - 20 % à 2050.**

## D. La filière sidérurgique après transformation

Notre scénario de base distingue deux périodes de décarbonation :

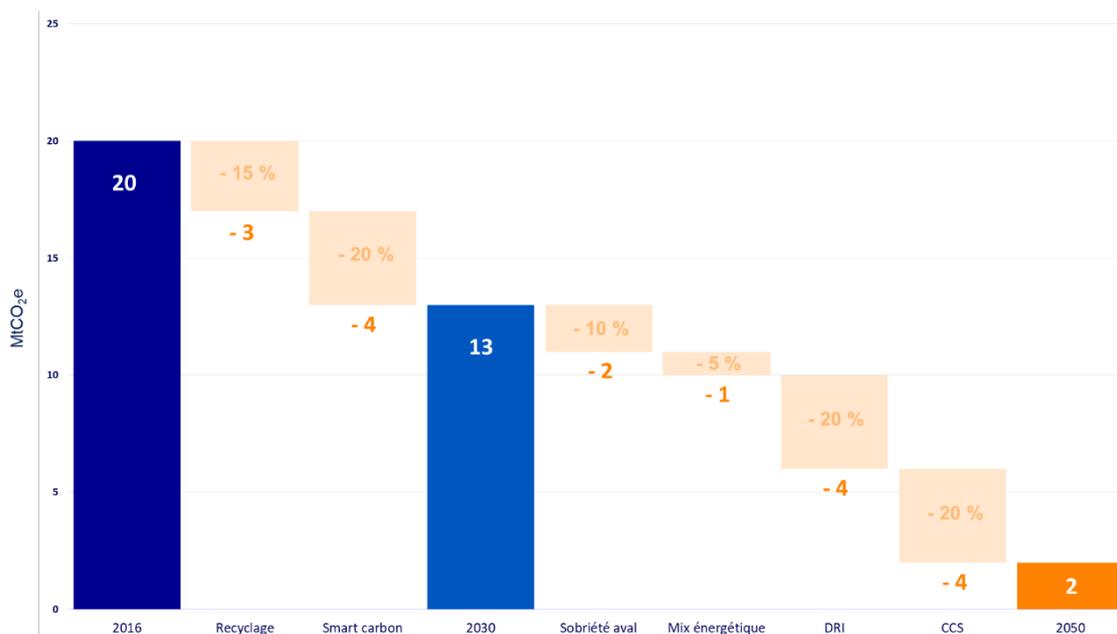
La transformation de la filière acier par le PTEF s'organise en deux grandes périodes :

- **2022-2030** : période lors de laquelle 30 % de réduction des émissions sont assurés selon la stratégie définie par la feuille de route de la filière (efficacité énergétique, acier électrique, réemploi des ferrailles dans les hauts fourneaux, techniques de production « Smart Carbon ») [14];
- **2030-2050** : la combinaison des leviers déjà mobilisés avec le déploiement industriel du CCS, de la voie de production d'acier par réduction directe du minerai de fer (Direct Reduced Iron – DRI), et la mise en place de leviers sobriété dans les secteurs aval de l'économie, est ce qui permettra de suivre la trajectoire qui mène à l'objectif de 80 % de réduction des émissions en 2050.

Production d'acier et émissions de GES associées	2016	2030	2050
--	------	------	------

	Prod. acier (en Mt)	GES (en MtCO <sub>2e</sub> )	Prod. acier (en Mt)	GES (en MtCO <sub>2e</sub> )	Prod. acier (en Mt)	GES (en MtCO <sub>2e</sub> )	Réduction 2050-2016
<b>Voie hauts-fourneaux</b>	10,5	19,4	10,5	12,7	8,6	1,2	-94%
<b>Voie électrique</b>	4,5	1,4	4,5	1,4	3,7	0,5	-63%
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>20,8</b>	<b>15</b>	<b>14,1</b>	<b>12,2</b>	<b>1,7</b>	<b>-92%</b>

**Tableau 7 : Réductions des émissions de GES du secteur permises par les leviers du PTEF, entre 2015 et 2050, sur les deux voies de production**  
**Source : calculs de The Shift Project**



**Figure 8 - Evolution des émissions GES du secteur de la sidérurgie en France dans le PTEF entre 2016 et 2050 (en MtCO<sub>2e</sub>)**  
**Source : calculs de The Shift Project**

Le profil économique du secteur en 2050 est encore à construire, à ce stade : plusieurs dynamiques sont en effet en mesure de produire des effets concurrents.

Bien que les volumes de production accusent des réductions lors de la transformation, il est probable que le prix des aciers décarbonés va, lui, augmenter.

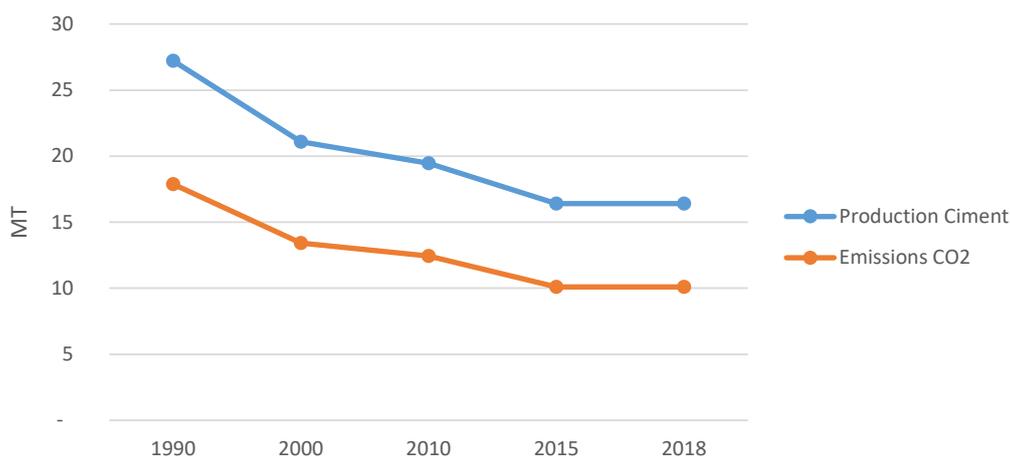
Les impacts de ces évolutions sur l'emploi nécessitent une investigation non réalisée dans le cadre du PTEF à ce stade, mais seront influencés par la capacité de l'industrie sidérurgique à se positionner sur le marché de l'acier décarboné, ce qui pourrait engendrer une stabilisation de la production nationale plutôt que sa réduction grâce à une hausse des exportations, notamment vers le reste de l'Europe qui n'aurait pas le même avantage concurrentiel sur le contenu carbone de ses produits.

Dans une économie transformée, l'acier décarboné s'intégrera de plus dans des chaînes économiques et d'activités qui l'appelleront. Dans le secteur de la construction, la norme RE2020 va instaurer une pression à la décarbonation de tous les matériaux de construction. 50 à 100 kg d'acier étant employés dans 1 m<sup>3</sup> de béton armé, les acteurs du bâtiment vont être à la recherche d'acier décarboné afin de décarboner le béton qu'ils emploient. Le même type de dynamiques apparaîtra dans les autres secteurs : le suivi et la réglementation des contenus carbone des produits et des usages de l'économie dans son ensemble orienteront les choix d'approvisionnements des acteurs productifs, qui se tourneront vers les aciers compatibles avec l'évolution des normes et de la demande, par exemple dans l'automobile.

## II. Décarboner l'industrie cimentière et du béton

### A. La filière aujourd'hui et sa feuille de route

Suite aux dernières décennies marquées par un certain attentisme et des progrès limités dans la décarbonation de son offre malgré la mise en place de crédits carbone par l'Europe (le système EU ETS), la filière ciment-béton française va affronter le mur de la nouvelle norme RE2020.



**Figure 9 : Evolution de la production de ciment et des émissions de GES associées en France, entre 1990 et 2018**  
Source : (GCCA, 2018) [22]

Les marges de progrès sont assez considérables. La profession elle-même vient finalement d'afficher une feuille de route collective pour décarboner son activité de 24 % à l'horizon 2030 et sa volonté d'aller vers un objectif de 80 % afin de correspondre à la SNBC (Figure 10).

**Figure 10: Emissions de GES pour la filière ciment française selon la feuille de route du CNI et du SFIC entre 2015 et 2050**  
**Source : (CNI et SFIC, 2021) [11]**

De cette évolution dans la mobilisation de la filière peut être extrait un premier constat important : ce que la menace de taxation (les ETS) n'a pas réussi à faire, une véritable norme performancielle semble être en mesure de le déclencher.

Sans doute imparfaite, cette réglementation est une décision courageuse et ambitieuse : elle fixe une quantité maximale de GES par m<sup>2</sup> neuf construit à partir de 2022. Si les cimentiers et les bétonniers font les innovations et efforts nécessaires, cela pourrait représenter pour la France l'occasion de devenir le laboratoire mondial de la décarbonation de la construction.

Seuils de contenu carbone fixés par la norme RE2020	2022	2025	2028	2031
<b>Maisons individuelles</b>				
<b>Seuil</b>	<b>640</b>	<b>530</b>	<b>475</b>	<b>415</b>
Baisse par rapport à 2022	0	-110	-165	-225
<b>Logements collectifs</b>				
<b>Seuil</b>	<b>740</b>	<b>650</b>	<b>580</b>	<b>490</b>
Baisse par rapport à 2022	0	-90	-160	-250

**Tableau 8 : Seuils maximum de contenu carbone par m<sup>2</sup> fixé par la RE2020**  
**Source : (MTE, 2021) [23]**

## B. Comment aller plus loin dans la décarbonation ?

Nous pensons que la transformation du secteur peut aller plus vite et plus loin, sans pour autant compter sur des ruptures technologiques totalement incertaines.

**Les marges de manœuvre techniques et produits pourraient permettre de baisser les émissions de la filière de 50 % en 2050**, en utilisant des techniques connues (c'est-à-dire sans s'appuyer sur des technologies de rupture) :

- Amener les installations et usines françaises au niveau des meilleurs standards mondiaux en termes d'efficacité énergétique,
- Maximiser l'usage de combustibles alternatifs, en particulier la biomasse,
- Déployer les ciments à bas taux de clinker et/ou baisser les dosages dans les bétons
- Adapter aussi vite que possible les normes du béton pour mettre en œuvre les progrès techniques
- Intégrer le critère « CO<sub>2</sub> » du projet aux appels d'offre en TP et génie civil est une urgence et ne pose aucun problème de mise en œuvre.

Emissions GES de production d'un béton moyen armé (en kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> )	2015	2030	2050
Fabrication (ciment)	190	142	95,5
Transport/installation (acier)	69	43	29,5
Vie et usage	-10	-10	-10
Fin de vie	2	2	2
Recyclage	-10	-10	-10
<b>Total (hors recyclage)</b>	251	177	117
<i>Evolution par rapport à 2015</i>		-30%	-53%

**Tableau 9: Evolution des émissions de GES de production du béton, entre 2015 et 2050 après mobilisation des leviers technologiques de progrès unitaires**

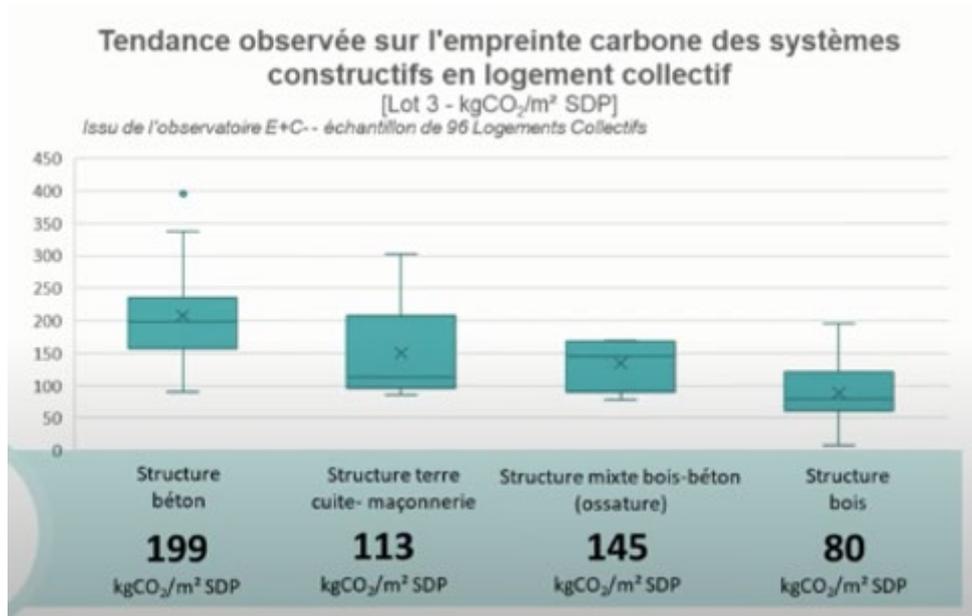
*Source : calculs de The Shift Project*

**Ces efforts considérables seront néanmoins insuffisants pour atteindre les objectifs de la RE2020 et de la SNBC, ce qui rend inévitable le recours à d'autres leviers, de sobriété et de rupture :**

- Réduire les quantités de béton consommées en optimisant ses usages (design des ouvrages, bâtiment) ;
- La progression de la mixité des matériaux dont le bois, les autres matériaux biosourcés (paille, chanvre...) mais aussi les autres systèmes constructifs de type sandwich.
- **Pour accompagner cette transformation, il sera nécessaire de structurer la filière bois et réguler les exports de bois bruts ;**
- L'évolution des tendances de construction/rénovation du secteur du logement décrites dans les travaux prospectifs du secteur « Logement » du PTEF [20]

permettra finalement d'atteindre une réduction des émissions de la filière ciment-béton de l'ordre de 80 % en 2050 ;

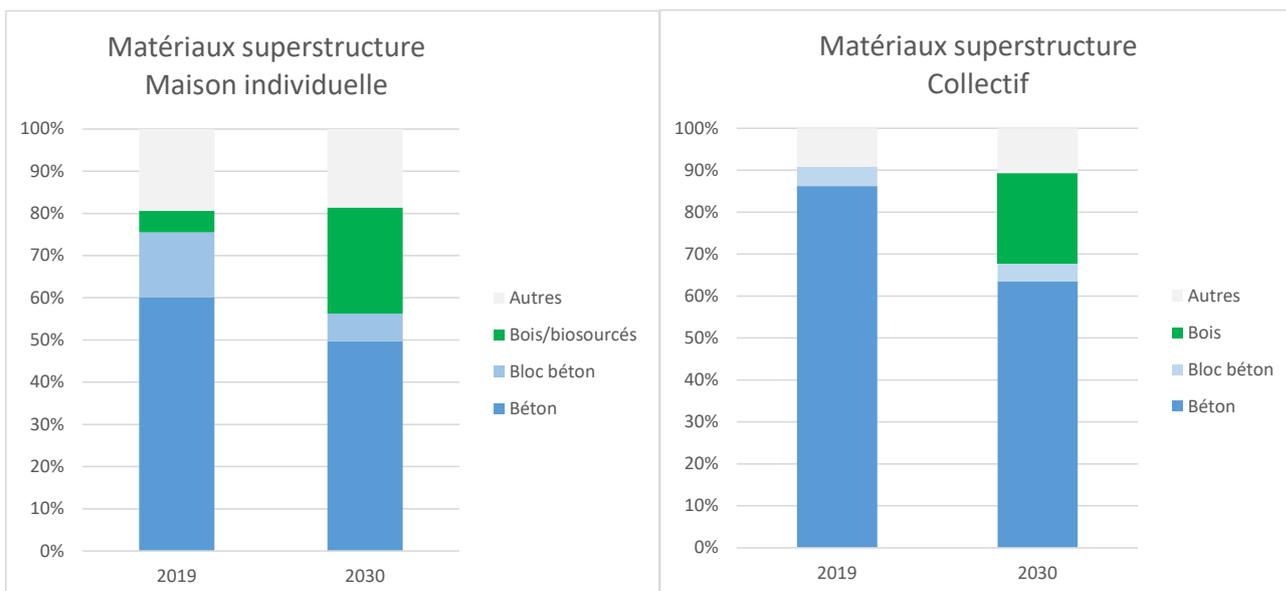
- Déployer le potentiel accessible en CCS sur les cimenteries éligibles.



**Figure 11: Empreinte carbone des systèmes constructifs**

**Source : (IFPEB et Carbone 4, 2020) [24]**

Dans la construction neuve, une structure en bois est intrinsèquement moins intense en kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> qu'une structure tout béton, facilitant ainsi le passage des seuils de la norme RE2020 à l'horizon 2030 pour les ouvrages du bâtiment. Le béton restera ainsi présent dans les fondations, la mixité deviendra la règle, et la part de marché du béton sera réduite en particulier dans la maison individuelle.



**Figure 12 : Evolution de la répartition des matériaux employés dans la superstructure, en maison individuelle et logements collectifs**  
Sources : calculs de The Shift Project à partir de (ADEME, 2019) [25]

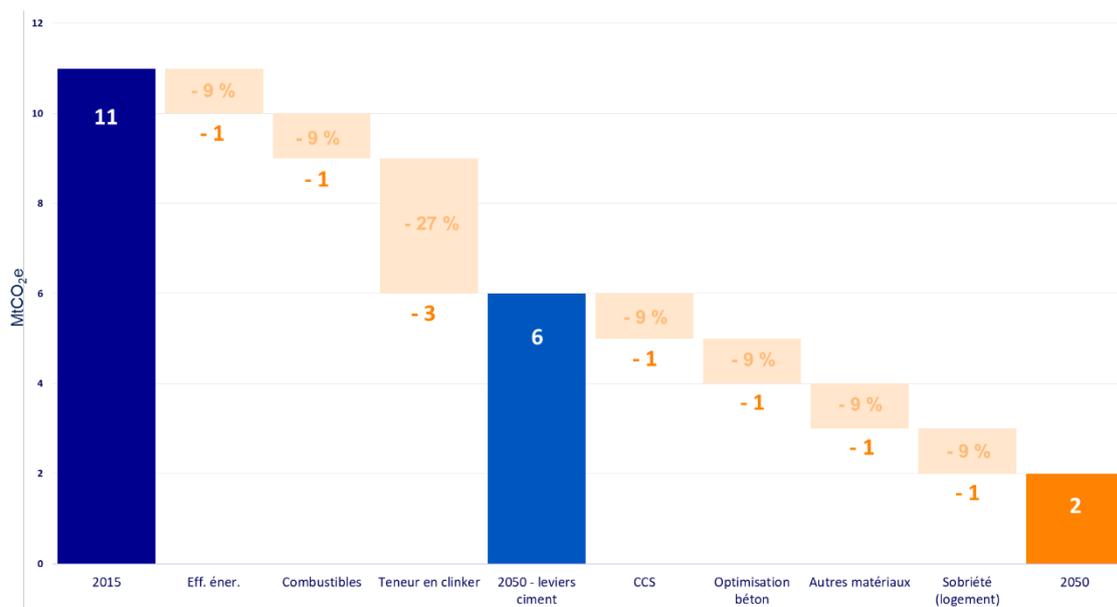
Les transformations préconisées par le PTEF peuvent être décrites selon deux angles possibles : celui de la filière « ciment » ou bien celui de la filière « béton ». Dans les deux cas, la conclusion est identique – **atteindre les objectifs de décarbonation nationaux** du secteur ne peut passer que par le **déploiement volontaire et la mise en concert des leviers à disposition** :

- **Mobiliser les investissements nécessaires** au déploiement d'une **véritable offre de ciment et béton au plus faible contenu carbone technologiquement accessible**,
- **Substituer une partie du béton** dans la construction par des alternatives **biosourcées et géosourcées**<sup>5</sup>,
- **Réduire le rythme de construction neuve.**

Deux périmètres peuvent être adoptés pour présenter les dynamiques de décarbonation de la filière :

- La vision « ciment », qui correspond au périmètre retenu par le CNI-SFIC dans sa feuille de route [11] ;
- La vision « béton », qui intègre toute la chaîne de valeur du matériau de production.

<sup>5</sup> Le contenu carbone de ces matériaux est considéré dans nos projections comme étant neutre, et non négatif.



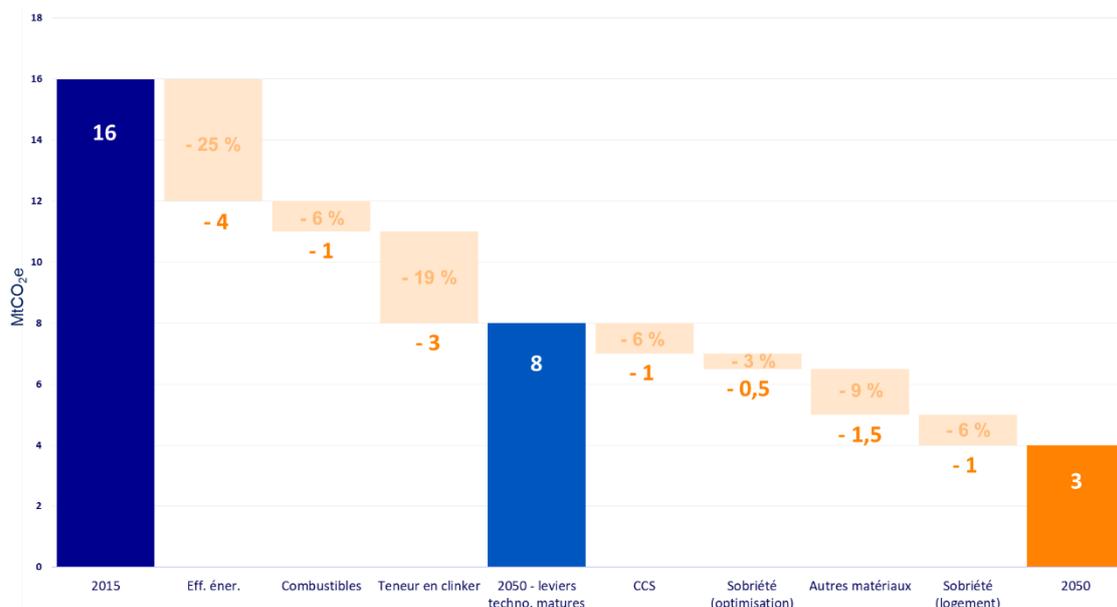
**Figure 13: Réductions des émissions de GES du secteur permises par les leviers du PTEF, entre 2015 et 2050**

**Vision « filière ciment »**

**Source : calculs de The Shift Project**

C'est bien la combinaison des leviers technologiques et de sobriété qui permet d'atteindre l'objectif fixé par la SNBC pour l'industrie :

- « Eff. éner. » : améliorer de l'efficacité énergétique des installations ;
- « Combustibles » : augmenter la part de combustibles alternatifs (biomasse, CSR) dans les fours ;
- « Teneur en clinker » : développer et recourir aux ciments bas carbone, à faible teneur en clinker ;
- « CCS » : captage et stockage du carbone issu des cimenteries ;
- « Sobriété (optimisation) » : optimisation des normes et méthodes de construction pour réaliser des économies sur le béton utilisé, à service rendu équivalent ;
- « Autres matériaux » : augmenter la part des matériaux biosourcés et géosourcés dans la construction ;
- « Sobriété (logement) » : réduction des volumes de logements neufs construits annuellement, imposée par les impératifs de décarbonation du secteur logement.



**Figure 14: Réductions des émissions de GES du secteur permises par les leviers du PTEF, entre 2015 et 2050**

**Vision « filière béton »**

**Source : calculs de The Shift Project**

La neutralité ne sera possible que si le CCS se développe sur toutes les cimenteries françaises, ce qui ne sera possible que si un mécanisme d'inclusion carbone aux frontières de l'Europe rend la solution financièrement acceptable. La mise en place du projet de Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)<sup>6</sup> proposé par l'Union Européenne pourrait permettre de créer cette situation favorable.

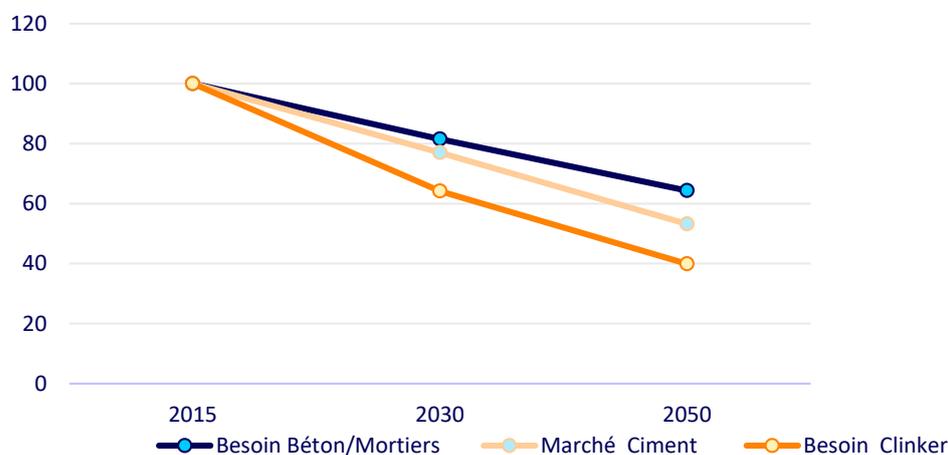
## C. La filière ciment-béton après transformation

L'adaptation de toute la filière sera un défi complexe, répondant à des dynamiques aux effets concurrents :

- Elle implique une **baisse des volumes de ciment**, une **réduction des volumes de béton** (Figure 15) ;
- La sophistication nécessaire des produits et procédés pourrait entraîner, selon les conditions économiques, une **valeur ajoutée supplémentaire** et donc des prix plus élevés qui pourraient **stabiliser la filière en valeur** ;
- **Des pertes d'emplois sont probables en cimenteries et dans le béton. Le transfert d'emploi vers les autres matériaux, dont les biosourcés, nécessitera**

<sup>6</sup> [https://ec.europa.eu/taxation\\_customs/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism\\_fr](https://ec.europa.eu/taxation_customs/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_fr)

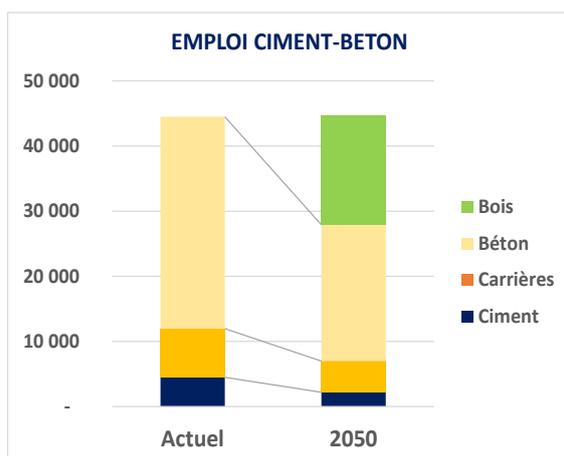
une adaptation qui semble gérable sur le long terme tant pour la fabrication (industrie) que pour la mise en œuvre (les entreprises de BTP) (Figure 16).



**Figure 15: Evolution des besoins en béton, ciment et clinker dans l'économie transformée entre 2015 et 2050 (en base 100, année 2015 en référence)**

**Source : calculs de The Shift Project**

Si le déploiement de la RE2020 maintient fermement ses objectifs et s'inscrit dans la durée, la France deviendra en quelques années le laboratoire de la décarbonation de la construction pour le monde. Si la filière ciment-béton française se mobilise et se rend capable de mettre en œuvre ce plan, elle en deviendra la référence mondiale.



**Figure 16 : Exemple de potentiel de création d'emplois par le développement de la filière bois**  
**Source : calculs de The Shift Project (les résultats concernant la filière bois ne sont ici présentés qu'à titre indicatif, afin d'illustrer un scénario dans lequel ils permettent de compenser les pertes)<sup>7</sup>.**

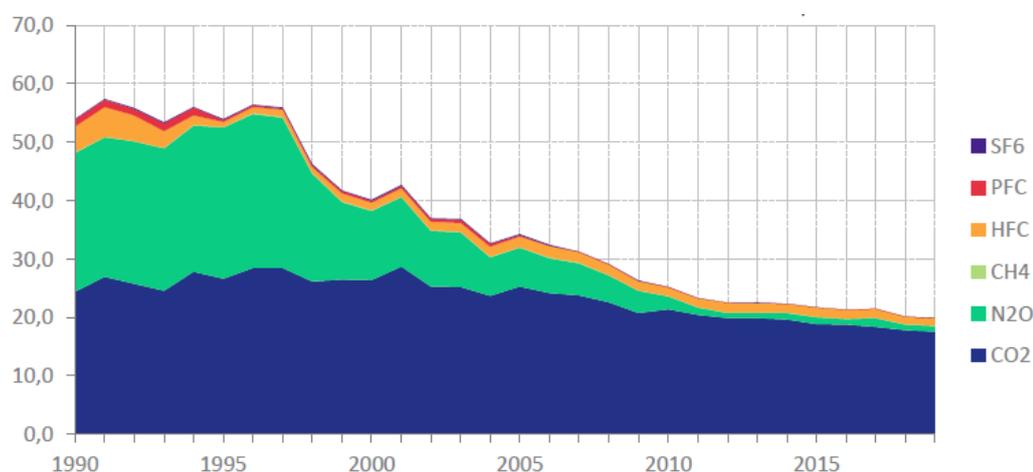
<sup>7</sup> Les hypothèses et méthodologie d'obtention de ces chiffres (par proportionnalité avec le CA) ne sont pas consolidées dans le cadre du chantier « Emploi » du PTEF.

# III. Décarboner l'industrie de la chimie

## A. La filière aujourd'hui et sa feuille de route

Les chimies française et européenne sont parmi les plus haut de gamme du secteur dans le monde. Mais elles reposent avant tout sur la disponibilité d'énergie fossile, le pétrole et le gaz en étant les intrants principaux. La chimie fait à la fois partie des secteurs les plus polluants et de ceux restant aujourd'hui les plus surveillés et régulés.

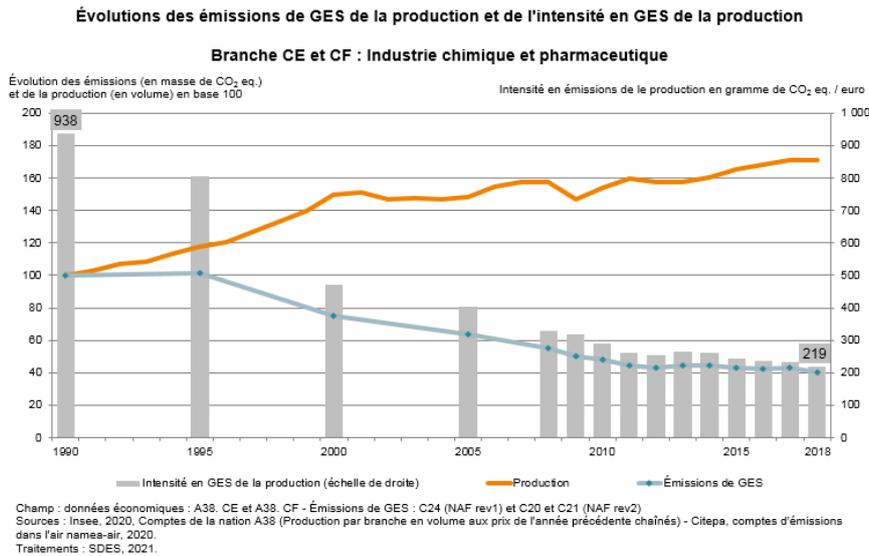
Les progrès en matière de GES ont été réels depuis 1990 (Figure 17), tant par la réduction du N<sub>2</sub>O grâce à la mise en place des technologies disponibles que par celle du CO<sub>2</sub> grâce à des gains d'efficacité énergétique supérieurs à 3 %/an – rythme bien supérieurs à l'économie dans son ensemble.



**Figure 17: Evolution des émissions GES de l'industrie de la chimie en France, 1990-2019 (en MtCO<sub>2</sub>e/an)**

Source : (CNI, 2021) [26]

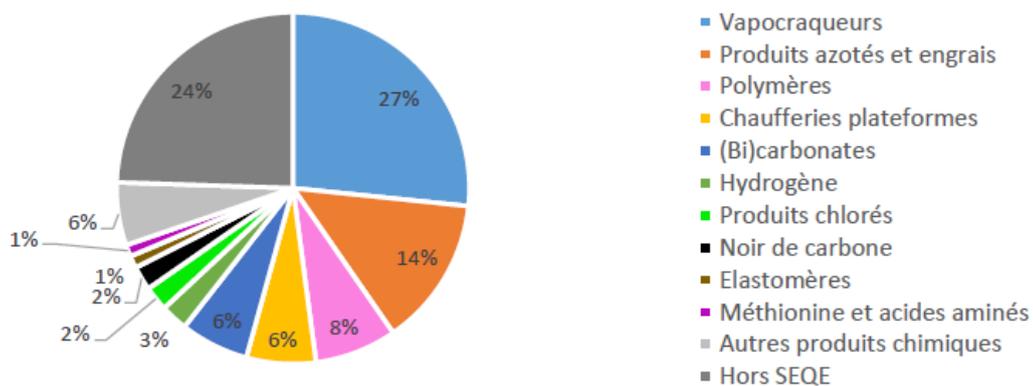
Sous la pression de réglementations drastiques, la chimie a aussi su résoudre en parallèle deux problèmes environnementaux majeurs : l'élimination des HFC qui détruisait la couche d'ozone et la réduction drastique des émissions de soufre qui cause les pluies acides.



**Figure 18 – Evolutions des émissions de GES de la production et de l'intensité en GES de la production, industrie chimique et pharmaceutique**  
**Source : (MTE, 2021) [27]**

La chimie française a continué à croître tout en se décarbonant [27]. Elle est totalement ouverte sur le marché mondial et s'est positionnée davantage sur la chimie de spécialité que sur la chimie de base.

Les 2/3 des émissions de GES de la chimie sont dues à la chimie amont « lourde », dont les 12 plus gros sites en France sont responsables de 50 % des émissions totales de la chimie nationale [26].



Source : EUTL<sup>2</sup>.

**Figure 19 : Répartition des émissions de la filière chimie en France en 2018, selon les sites**  
**Source : (CNI, 2021) [26]**

La feuille de route conclue entre France Chimie et l'Etat propose une base crédible avec l'utilisation de leviers existants matures pour réduire d'un quart les émissions de la filière d'ici 2030 [26] :

- La baisse de 20 % du CO<sub>2</sub> par l'amélioration continue des procédés, l'utilisation de sources d'énergie alternatives (biomasse et résidus solides) à la place du gaz et une meilleure récupération des chaleurs fatales ;
- Une division par deux des volumes de HFC émis grâce à la pression réglementaire de l'UE sur les gaz frigorigènes qui génère la création de gaz à PRG beaucoup plus faible.
- Une nouvelle baisse de 20 % des N<sub>2</sub>O par l'usage de technologies connues et abordables.

## B. Comment aller plus loin dans la décarbonation ?

La mobilisation supplémentaire de certains leviers aujourd'hui non matures comme l'électrolyse de l'eau pour l'hydrogène, un démarrage du CCS (la production d'ammoniac pour les engrais se prêtant bien à cette solution de par la concentration très forte de ses fumées en CO<sub>2</sub>) et l'électrification de certains procédés (comme la recompression des vapeurs ou le recours à des pompes à chaleur) permettrait d'atteindre une réduction des émissions de la filière d'un tiers à horizon 2030.

Le projet de mise en place d'un CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), qui éliminerait progressivement les quotas d'émissions gratuits et taxerait les importations, peut créer des conditions économiques permettant la mise en place de ces technologies jusqu'ici impossibles à déployer de par les obstacles économiques.

Faire aboutir ce projet au niveau européen pourrait ainsi créer des conditions indispensables à la mobilisation des technologies nécessaires. Il devra être complété par des normes d'usage sur les leviers les plus importants :

- Pour décarboner les engrais azotés : sur le modèle de la nouvelle norme du secteur de la construction – la norme RE2020 –, **construire et mettre en œuvre une trajectoire normative de réduction des contenus carbone des engrais**. Cela créerait les conditions nécessaires à rendre possible la fabrication d'ammoniac pour les engrais avec soit du CCS soit de l'hydrogène décarboné. Cet hydrogène, générateur d'un besoin électrique important, doit aller en priorité à la fabrication d'engrais et d'acier.
- Baisser la demande de résine vierge pour les plastiques, en fixant deux objectifs critiques :

- Rattraper les pays d'Europe les plus performants en matière de recyclage du plastique et élargir la directive européenne sur le recyclage des emballages plastiques à d'autres emballages à usage non unique.
- Réduire la demande en plastique en s'adaptant à la réduction des volumes de production automobile et surtout grâce à l'élimination progressive des emballages plastiques (plan 3R de l'Etat)
- **L'ammoniac est, avec la réduction directe en sidérurgie, l'usage le plus efficient de l'hydrogène décarboné.** La décarbonation de l'ammoniac dépend donc directement de la disponibilité de capacités supplémentaires en électricité et constitue notre priorité d'allocation de l'hydrogène, devant celle de la production de méthanol et de HVC.
- Le chantier agriculture du PTEF imposant une réduction de 80 % des intrants azotés annuels à l'issue de la transformation du secteur. Les volumes de production d'engrais sont stables puis augmentent avec la relocalisation progressive de la production, soit pour les besoins nationaux –soit pour l'export si la baisse des apports azotés en France se confirme en 2050<sup>8</sup>.

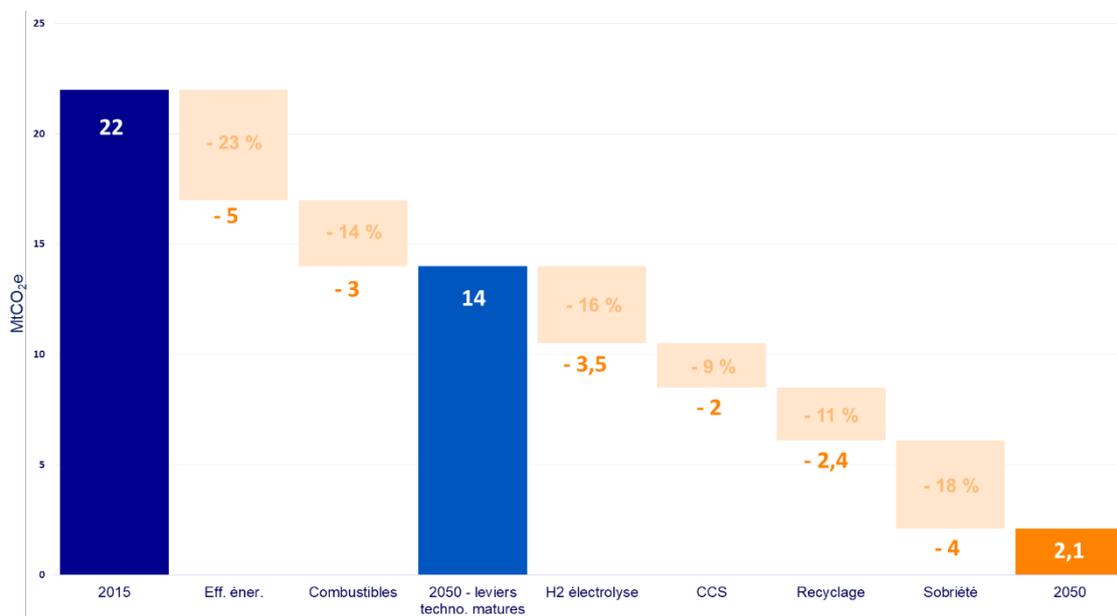
**La production d'hydrogène par électrolyse associée appelle une consommation d'électricité supplémentaire de l'ordre de 5 TWh**, si la production d'engrais est indexée sur les besoins du territoire. Une stratégie alternative pourrait être choisie, en visant une réindustrialisation volontaire par relocalisation de la production d'engrais actuelle. Cela donnerait naissance à une filière de production d'engrais décarbonés qui pourrait alimenter les voisins européens. Cependant, cette stratégie réclamerait une disponibilité d'énergie électrique bien supérieure (jusqu'à 20 TWh), ce qui rend sa faisabilité conditionnée à de nouveaux arbitrages macroscopiques : certains secteurs consommateurs d'électricité en 2050 (la mobilité, le logement etc.) devraient pousser davantage leurs leviers de sobriété pour libérer des capacités de génération électrique.

**Cette conclusion sera nuancée suivant le degré de déploiement du CCS**, qui pourrait être plus rapide que celui de l'hydrogène suivant l'évolution des projets déjà lancés aujourd'hui sur le territoire, pourrait permettre de décarboner la production de cette réindustrialisation tout en limitant l'augmentation de la consommation électrique. **Une production sous CCS reste cependant toujours aussi dépendante des intrants en gaz naturel.**

---

<sup>8</sup> Les détails de ces analyses sont disponibles dans le rapport dédié à la transformation du secteur de la chimie.

La baisse des emplois dans la chimie de base liée à la baisse de la production de résine vierge et de plastique de base pourrait être compensée quantitativement et d'un point de vue macroscopique par le développement du recyclage et la structuration de la filière hydrogène pour la chimie.



**Figure 20 : Evolution des émissions GES du secteur de la chimie en France dans le PTEF entre 2015 et 2050 (en MtCO<sub>2</sub>e)**  
*Source : calculs de The Shift Project*

**Au global, notre plan place la filière de la chimie sur une trajectoire compatible avec une baisse de 80 % de ses émissions territoriales, conformément à l’objectif formulé par la SNBC pour l’industrie.**

## C. La filière chimique après transformation

**Les transformations préconisées par le PTEF pour la filière chimie sont en grande partie réalisables par l’activation de leviers technologiques, qui modifient les mécanismes de production et engendrent certaines réductions des volumes finaux produits par la filière :**

- Les volumes de plastiques finaux baissent d’un tiers de leur niveau actuel d’ici 2050 ;
- Les volumes de production d’engrais sont stables puis augmentent avec la relocalisation de la production entre 2030 et 2050, soit pour les besoins nationaux soit pour l’export si la baisse des apports azotés de 80% du PTEF Agriculture en France se confirme bien ;

- Les volumes de production de HVC diminuent, de par la réduction de la part de plastiques issus des résines vierges.

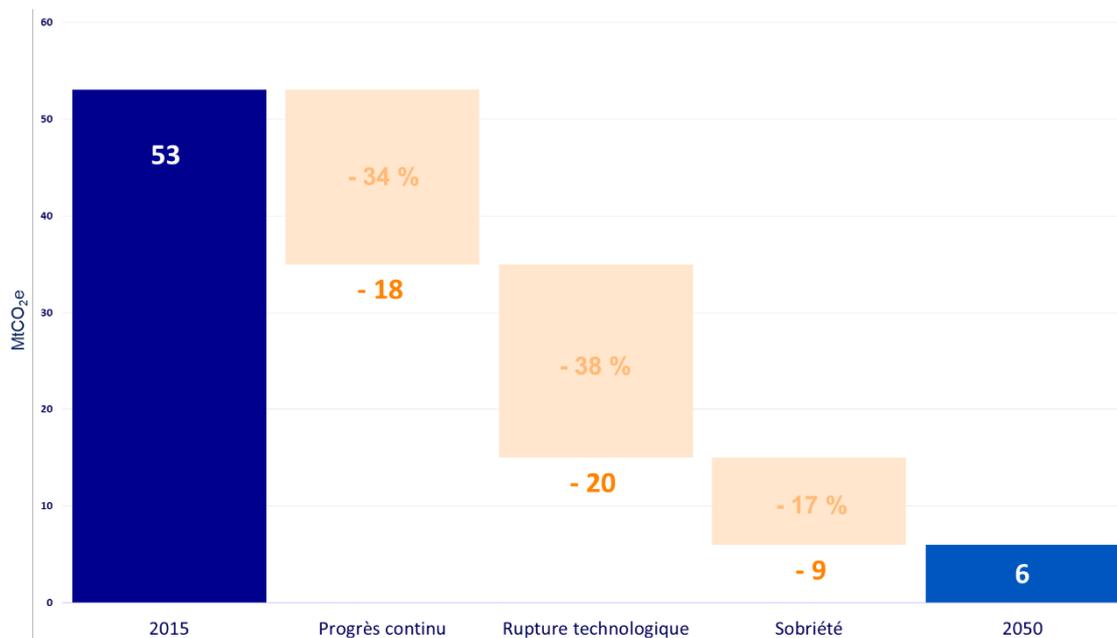
En termes d'emplois, ces transformations peuvent avoir différents effets, concurrents :

- Les réductions de certains volumes de production engendrent des réductions du nombre d'emplois associés tant dans la production de résine vierge que dans la production de plastique brut.
- Le report des volumes de résines vierges sur le recyclage des plastiques engendre une augmentation de l'activité de ces acteurs ;
- La relocalisation potentielle de la production d'engrais est une dynamique créatrice d'emplois, dans le scénario alternatif de réindustrialisation volontaire ;
- Le recours important à l'hydrogène et à l'électricité bas carbone associée, produits localement, se substitue à l'utilisation de gaz naturel importé.

## IV. La décarbonation de l'industrie lourde dans le PTEF

### A. Vision globale

**Notre plan, parfois plus ambitieux que les feuilles de route des professions concernées, notamment grâce à la sobriété, permet de décarboner l'ensemble Acier-Ciment-Chimie, qui représente 70 % de l'industrie lourde, de plus de 80 % à 2050 avec un point de passage à 2030 d'environ - 30 %.**



**Figure 21 : Evolution des émissions GES du secteur de l'industrie lourde en France dans le PTEF entre 2015 et 2050 (en MtCO<sub>2</sub>e)**

**Source : calculs de The Shift Project**

La décarbonation des secteurs de l'industrie lourde dans le PTEF repose en effet sur un équilibre très ambitieux, puisqu'il pousse les innovations de rupture plus loin que les feuilles de route sectorielles, afin d'évaluer le potentiel maximal des solutions technologiques. Cette ambition s'accompagne cependant d'une préparation à la sobriété, qui est inévitable pour atteindre les objectifs et qui permettra d'amortir les retards potentiels dans le déploiement des solutions de rupture.

**C'est ainsi bien la combinaison des trois grandes familles de leviers qui permet à l'industrie d'atteindre son objectif de - 80 % d'émissions carbonées à 2050 :**

- **Les leviers de progrès continu** (efficacité énergétique, changement des combustibles des fours, recyclage mécanique etc.),
- **La mobilisation des leviers de rupture technologique** (recours à l'hydrogène produit par électrolyse, recours au CCS, recyclage chimique etc.),
- **Les leviers de sobriété** (sobriété sur les emballages plastiques, sobriété imposée par la construction neuve etc.).

Répartition de l'effort à 2050 entre les trois types de leviers de l'industrie lourde	Progrès continu	Techno. de rupture	Sobriété
<b>Ciment</b>	55%	35%	10%
<b>Chimie</b>	45%	35%	20%
<b>Acier</b>	35%	45%	20%

<b>Total Industrie Lourde</b>	40%	40%	20%
-------------------------------	-----	-----	-----

**Tableau 10 : Part des trois familles de leviers de décarbonation de l'industrie lourde dans l'effort total de réduction à 2050<sup>9</sup>**

**Source : calculs de The Shift Project**

## B. Rendre possibles les innovations de ruptures

Les ruptures technologiques identifiées ne se produiront qu'à condition que certaines initiatives politiques soient prises. Il est en effet nécessaire de construire le cadre réglementaire et stratégique dans lequel ces innovations peuvent advenir à grande échelle. Pour ce faire, quatre grands leviers sont à mobiliser de manière prioritaire :

- Prioriser la production d'hydrogène pour l'industrie lourde sidérurgique et des engrais, et dimensionner un système électrique capable d'absorber la nouvelle demande qui en découle ;
- Déployer des normes performantielles ambitieuses et ciblées ;
- Mettre en place des outils de gouvernance au niveau national et européen qui permettent de ne pas saborder l'industrie française devenue décarbonée, face à des industries extérieures fortement émissives mais bon marché.

Dans les projections des filières énergétiques nationales, les ressources en hydrogène produit par électrolyse doivent être priorisées pour la production d'engrais et d'acier. Les émissions évitées par ce biais sont en effet inévitables autrement. Cela réclame un pilotage sur le long terme de la croissance de la demande de l'industrie en électricité décarbonée, non intermittente et non effaçable.

**Pour la décarbonation de notre production d'engrais azotés, cette demande supplémentaire s'élèverait à 5 TWh environ.**

Pour la sidérurgie et sa réduction directe, elle atteint plus de 10 TWh. L'avantage comparatif donné par cette nouvelle électricité disponible pourrait permettre à l'industrie française de relocaliser certaines productions et de retrouver une compétitivité, si les arbitrages et le pilotage de la demande électrique le rendent possible.

Définir quelques nouvelles normes bien ciblées (en étendant la RE2020 au secteur tertiaire, en incluant des critères d'empreinte carbone dans les appels d'offres en

<sup>9</sup> Ces leviers permettent d'atteindre une réduction des émissions d'environ 80 % à 2050. Exemple de lecture : « le progrès continu permet de parcourir 45 % du chemin de décarbonation que la chimie doit parcourir d'ici 2050. »

travaux publics et génie civil, en intégrant une comptabilité carbone sur les intrants agricoles dès 2030 etc.) permet d'orienter et forcer dans la bonne direction les efforts de l'industrie de manière synchronisée.

Les coupler à des mécaniques de gouvernance internationale permet ensuite de rendre stratégiquement viables les initiatives industrielles. Les outils d'échelle européenne comme le « *Carbon Border Adjustment Mechanism* » et l'élimination progressive des quotas carbone gratuits pourraient permettre d'assurer une décarbonation ne rimant pas avec sabotage pour les acteurs, en évitant leur éviction par des produits plus carbonés mais moins chers venus de l'extérieur de l'Europe. La France doit soutenir ce type de projets pour qu'ils aboutissent.

Piloter le développement de filières comme celle du bois en la structurant activement pourrait se faire par la régulation des exports de bois bruts afin de permettre la structuration d'une filière aval de transformation du bois. Sans cela la filière bois sera incapable de monter en régime et la révolution de la RE2020 dans le bâtiment risque d'échouer.

### **Les technologies de rupture : un pari à pousser, la sobriété pour compenser**

**Les risques d'échec étant bien plus forts sur les leviers technologiques de rupture que sur les leviers de progrès continu, il est essentiel de comprendre qu'il doit être envisagé de recourir à une sobriété plus intense si leur déploiement échoue dans les années à venir.**

**Pousser leur développement devra donc s'accompagner d'outils de suivi, permettant de détecter un écart trop grand à la trajectoire qui permet de les mobiliser à temps, et n'affranchira en rien de préparer l'adaptation à la sobriété.**

03

**DÉCARBONER  
L'INDUSTRIE  
MANUFACTURIÈRE**

# I. A l'interface entre usages et matières premières

L'industrie manufacturière est plurielle et interconnectée non seulement avec les systèmes extérieurs (elle permet de produire les biens utilisés dans tous les secteurs de l'économie) mais aussi en son propre sein (les biens produits dans une première filière manufacturière interviennent dans la production et chaînes de valeur des autres filières). Dimensionner une industrie manufacturière qui soit résiliente, donc, c'est :

- D'une part comprendre comment elle répond aux nouvelles exigences des secteurs après transformation,
- D'autre part être capable de replacer ses activités dans le cadre des contraintes appliquées à l'appareil industriel, notamment lourd.

L'industrie manufacturière décrite par notre Plan est l'interface entre l'industrie lourde et les autres secteurs économiques. C'est-à-dire qu'elle permet de produire les voitures, les vélos, les batteries, les infrastructures, les smartphones etc. qui seront ensuite utilisés pour par exemple construire la mobilité du futur résilient, des usages sobres ou encore des systèmes énergétiques compatibles avec les impératifs de transition.

- La partie « Focus batterie » disponible en annexe de la présente fiche met en œuvre, afin de l'illustrer et à titre d'exemple, la méthodologie que nous avons construite pour traduire les demandes des secteurs de l'économie en besoins de production, afin à terme d'établir une cartographie des flux de matières concernés, de leurs évolutions au cours de la transformation et des points de vigilance à avoir pour parvenir à réaliser la transformation complète de l'économie.

Pour respecter les impératifs de limites sur les flux physiques, il sera nécessaire de limiter les volumes de production de certains biens. C'est ce qu'appelleront certains leviers de sobriété. Diminuer les volumes de biens produits tout en continuant d'assurer les services nécessaires passe par des réflexions sur les usages prioritaires et sur les biens nécessaires dans les autres secteurs économiques (voitures plus sobres, écoconception des biens, durabilité des biens de grande consommation etc.). A usage constant, diminuer les volumes de biens produits passe par l'allongement de la durée de vie des biens et des matériaux. Deux solutions pour cela : le recyclage et

le réemploi. Il s'agit donc de maximiser la durée de vie des biens produits et de développer les filières permettant d'exploiter les gisements de matières que représentent les biens en fin de vie.

## II. Un nouveau segment-clé : la production de batteries

Développer une filière de production de batteries est indispensable au développement de la mobilité électrique, au centre de la transformation de nos modes de déplacement dans le PTEF. La question se pose de savoir quels volumes de batteries sont nécessaires, où les produire et comment.

### Les unités de capacité

Dans cette partie, les unités « kWhc » et « GWhc » seront utilisées pour comptabiliser les capacités de stockage des batteries.

Bien qu'elles comptabilisent une quantité d'énergie et qu'elles soient donc équivalentes d'un point de physique aux « kWh » et « GWh », elles permettent ici de distinguer les capacités de stockage des consommations d'énergie.

### Les impacts de production d'une batterie

Les impacts de la production de batteries découlent des différentes étapes de la chaîne de valeur, qui peuvent être rassemblées en deux phases principales [28] :

- La phase d'extraction des matières minérales, de premières transformations et de production des matériaux actifs et composants ;
- La phase de production, d'assemblage et de finition des cellules.

L'extraction et la première transformation entretiennent une dépendance forte aux énergies fossiles qu'il est aujourd'hui complexe de réduire (excavation des minerais, véhicules logistiques et de transport de l'industrie minière, chimie d'isolation des

éléments etc.)<sup>10</sup>. La production des matériaux actifs et composants entretient, elle, une dépendance plus importante à l'intensité carbone de l'électricité utilisée.

Les impacts de la seconde phase découlent presque intégralement de la consommation électrique des usines de production des batteries qui peuvent, elles, être plus facilement relocalisées.

Emissions GES de production des batteries en 2022 (en kgCO <sub>2</sub> e/kWhc)	Empreinte totale	Dont phase amont	Part de la phase amont dans l'empreinte
<b>Union Européenne</b>	89	62	<b>70%</b>
<b>Pologne</b>	132		<b>47%</b>
<b>France</b>	67		<b>92%</b>
<b>Chine</b>	119		<b>52%</b>
<b>Corée du Sud</b>	109		<b>57%</b>
<b>Moyenne ACV</b>	114		
<b>Minimum ACV</b>	39		
<b>Maximum ACV</b>	212		

**Tableau 11 – Empreinte carbone de la production de batteries selon la zone géographique et contribution de la phase amont (extraction, première transformation, production des matériaux actifs)**

Source : calculs de The Shift Project [29] à partir de [28], [30]–[48]

### Une filière à l'évolution technologique très dynamique

Les données présentées dans ce rapport sont issues d'une revue bibliographique à date. Le rythme d'évolution des choix et évolutions technologiques dans le stockage d'électricité sont rapides et influenceront sur les conclusions ici présentées.

Le poids de la phase aval, par exemple, décroît en tendance au fil de l'optimisation et de l'augmentation du taux de charge des usines, et celui de la production des électrodes pourrait être drastiquement réduit en cas de déploiement massif de nouvelles technologies pour la phase de séchage (le « *dry coating* »).

<sup>10</sup> Cette dépendance et les impacts associés varient selon les normes environnementales du pays de production et les formes sous lesquelles les éléments minéraux y sont accessibles.

Dans les modélisations qui sous-tendent le PTEF, la phase amont et ses impacts ont été considérés incompressibles, traduits par des émissions de GES fixes de 62 kgCO<sub>2</sub>e/kWhc (Tableau 11). Cette valeur varie bien entendu selon de nombreux paramètres (type de technologie considérée, modalités retenues pour la modélisation, sites d'extraction des matériaux – l'extraction du lithium en Europe par exemple, pourrait changer ces impacts [49] – etc.), mais permet de fixer l'ordre de grandeur nécessaire à l'analyse. **Cet impact n'est pas intégré dans les évaluations en vision territoriale, puisqu'il est associé à des activités en dehors des frontières. Il permet malgré tout de comprendre comment se répartit l'empreinte des batteries et la marge de manœuvre que permettent les leviers nationaux tels que la relocalisation de la phase d'assemblage.**

La relocalisation de certaines étapes, dont notamment la production des matériaux actifs, n'est pas traitée dans le PTEF (leurs impacts étant intégrés dans cette phase amont incompressible). Son potentiel de réduction des émissions de production reste cependant véritable et sera à instruire de manière plus fine dans le cadre du dimensionnement stratégique de la filière européenne, afin par exemple d'anticiper les défis logistiques qui y sont liés.

La relocalisation des usines d'assemblage de batteries, si elle est moins complexe que celle des phases plus amont, reste un défi stratégique majeur. Les moyens de productions (machines, technologies) et savoir-faire proviennent en effet aujourd'hui de l'extérieur des frontières françaises et européennes (Asie notamment). Construire une filière sur le vieux continent impliquera ainsi de déployer des programmes et solutions de formations initiales et continues importantes.

## Structurer la filière batterie de la mobilité électrifiée

### Dimensionner la filière

Le Plan propose de correctement intégrer dans les projections de l'industrie l'apparition et le développement de ce nouveau maillon indispensable, dimensionné par le marché de la voiture et du VUL<sup>11</sup> **électrifiés (hybrides, hybrides rechargeables et 100 % électriques).**

---

<sup>11</sup> Véhicule utilitaire léger, utile à la logistique et fret du « dernier kilomètre » et aux déplacements de certains artisans, par exemple.

Capacité moyenne des batteries (en kWhc/véhicule)	2022	2030	2050
Voiture particulière	15	35	50
Véhicule utilitaire léger	50	45	55

**Tableau 12 : Evolutions des capacités des batteries dans les véhicules électrifiés dans le PTEF<sup>12</sup>**  
**Source : (The Shift Project, 2021) [21]**

L'industrie automobile du PTEF prévoit, dans le cadre de sa transformation, la production de 1,73 millions de véhicules électrifiés en 2030 et de 1,67 millions de véhicules en 2050. Avec une capacité moyenne de batteries par véhicule d'environ 40 kWhc en 2030 et 50 kWhc en 2050, **l'évolution de la mobilité engendre une demande en batteries de :**

- **8 GWhc par an en 2022 ;**
- **63 GWhc par an en 2030 ;**
- **85 GWhc par an en 2050.**

**Ces besoins marquent une rupture véritable** dans les cadences de productions nécessaires : **le Joint Research Center évalue en 2019 la capacité totale de batteries vendues dans le monde** pour alimenter la mobilité électrifiée globale à un peu plus de **75 GWhc [50]<sup>13</sup>**.

**Construire une chaîne d'approvisionnement qui soit à la hauteur de ce nouveau besoin français n'est donc pas une question marginale, et ne peut s'affranchir d'une politique industrielle qui choisisse l'origine géographique et les conditions de production pour ces batteries.**

## Structurer la filière

Lors de l'amorce du Plan de transformation, au début des années 2020, la France approvisionne la totalité de sa filière de mobilité électrique grâce à des batteries importées (de Chine, de Corée, de Pologne etc.), dont la production s'appuie en grande partie sur des mix électriques fortement carbonés.

Au vu de l'explosion de la demande en batteries dimensionnée par la mobilité, **le PTEF préconise le développement d'une filière de production de batteries française** qui permettra :

<sup>12</sup> Les capacités ici présentées sont les moyennes calculées sur tout le parc de véhicules électrifiés, y compris les véhicules hybrides. Cela explique l'apparente faible capacité moyenne pour les années 2022 et 2030.

<sup>13</sup> Ces évaluations varient fortement en quelques années et dépendent fortement de la méthode d'évaluation : capacité de production, ventes de batteries, uniquement pour la mobilité ou tout secteur aval confondu, etc.

- De fortement décarboner la phase d'assemblage des cellules (dont l'impact carbone est dimensionné par la consommation d'électricité et le mix électrique sollicité),
- D'améliorer la résilience de la filière en raccourcissant une partie des chaînes de valeurs, tout en assurant une plus grande autonomie stratégique du pays sur l'usage clé qu'est la mobilité,
- D'assurer une création d'emplois sur le territoire pour répondre à une demande émergente, plutôt que de s'appuyer sur des chaînes logistiques plus complexes et plus longues.

D'autres leviers sont à mobiliser pour structurer une filière résiliente, bien qu'ils ne soient pas documentés à ce stade dans le PTEF :

- Décarboner la phase amont autant que possible (notamment la phase de production des matériaux actifs, qui peut elle aussi s'appuyer sur une électricité décarbonée et une relocalisation partielle),
- Augmenter le recyclage des batteries (à commencer par une conception les rendant facilement recyclables et le développement d'un circuit de traitement des rebus de production des usines) afin de conserver les matériaux stratégiques sur le sol national<sup>14</sup>,
- Intégrer les impacts des phases amont (criticité des ressources minérales, impacts de leur extraction et de la chimie associée etc.) dans les choix de technologies (LFP, NMC etc.) plutôt que d'uniquement les indexer sur des critères économiques et d'autonomie,
- Favoriser le développement de batteries (et des véhicules adaptés) priorisant la durée de vie (c'est-à-dire le nombre de cycles de charge-décharge admissibles) plutôt qu'une capacité très importante (c'est-à-dire des véhicules à autonomie très importante),
- Connecter ces réflexions avec l'évolution des feuilles de route des autres secteurs qui y sont liés, notamment celles de la mobilité et les choix stratégiques quant aux infrastructures de recharge.

Au vu des annonces récentes des acteurs, les besoins de la mobilité française pourront être couverts par les usines de batteries du territoire : les trois grands projets Verkor, ACC et Envision prévoient en effet une capacité de production de l'ordre de 70

---

<sup>14</sup> Plusieurs éléments rendent prometteur le choix d'un développement de ces dynamiques : la présence d'acteurs du recyclage de grande envergure sur le territoire français, le taux important de prise en charge des véhicules en fin de vie (comparé à l'électronique, par exemple) et le degré d'implication des constructeurs dans la responsabilité légale de la fin de vie des batteries.

GWhc/an au minimum en 2030 [51]–[55], ce qui permet de répondre aux besoins du PTEF à la même date et de rendre plausible le développement d'une filière nationale adaptée sur les 20 années suivantes, jusqu'en 2050.

### **La localisation de la production de batteries en France dans le PTEF**

**Dans le PTEF, la demande est couverte à 100 % par la filière française à partir de 2030.**

Piloter les évolutions des usages de mobilité tout en mobilisant très fortement son électrification permet en effet de profiter des opportunités technologiques des batteries tout en évitant les phénomènes d'effet rebond. C'est ce couplage des leviers qui est permis par la vision transsectorielle du PTEF, et qui donne la possibilité à la France de se servir des impératifs de décarbonation pour devenir plus résiliente, plus autonome et forte d'une économie à la cohérence robuste.

Développer une telle filière à la bonne échelle relève d'une politique industrielle rigoureuse : il ne s'agit pas simplement de monter des sites de production efficaces et économes, mais bien de construire de nouvelles chaînes de valeurs qui ne répètent pas les erreurs des dernières décennies. Elle doit être adaptée à la demande à laquelle elle souhaite répondre tout en intégrant des critères de priorité à la résilience et à l'emploi territorial :

- Limiter la dépendance aux chaînes de valeurs longues et aux transports multipliés de marchandises et produits intermédiaires,
- Prévoir des stratégies de résilience face aux risques d'approvisionnement en matières premières ou composants essentiels,
- Incrire l'évolution et le développement de la filière dans une trajectoire de réduction sectorielle et globale des émissions carbonées,
- Piloter les implantations et créations d'emplois pouvant découler de ces nouvelles activités de manière à dynamiser en priorité les territoires fragilisés par les transformations de l'économie, tout en assurant le développement en parallèle des formations (initiales et continues) et transferts de compétences indispensables.



## Les créations d'emplois par la filière batteries, dans le PTEF

Avec une intensité d'environ 140 ETP/GWhc [29], [56], les cadences de production de 63 GWhc/an en 2030 et 85 GWhc/an en 2050 pourraient engendrer des **créations d'emplois directs sur le territoire** :

- **Entre 8000 et 9000 emplois en 2030,**
- **Plus de 10 000 emplois en 2050.**

Bien que ces quantifications permettent de dessiner certaines dynamiques, elles doivent cependant être considérées avec prudence : les intensités en emplois de la production de batteries manquent encore à ce jour de consolidation, de par le jeune âge de la filière et la palette de trajectoires possibles pour les années à venir (degrés d'automatisation des usines, développement des emplois dans la recherche et développement, rapatriement ou non de la production des matériaux actifs, etc.).

**Ces évolutions sont engendrées par la volonté du PTEF d'appuyer la mobilité électrique sur 100 % de batteries assemblées en France**, et d'ainsi coupler la réduction de l'empreinte de production avec la priorité à la création d'activités sur le territoire, inscrite dans la dynamique générale de l'emploi dans le PTEF [57].

## Les impacts territoriaux de ce nouveau maillon de l'industrie manufacturière

La production de batteries implique, **pour alimenter les usines d'assemblage sur le territoire français dans le PTEF**, une mise à disposition d'électricité s'élevant à [29]:

- **3 TWh d'électricité en 2030 ;**
- **4 TWh d'électricité en 2050 ;**

L'impact carbone **territorial** de la filière batteries dans le PTEF proviendra de cette consommation d'électricité et sera donc intégralement dépendant du mix électrique déployé<sup>15</sup> :

---

<sup>15</sup> Les éléments de projection du PTEF sur le mix électrique seront publiés au sein du rapport dédié, prévu pour début 2022.

- En 2030, la France transformée répond déjà à ses besoins en batteries grâce à ses usines territoriales, mais la décarbonation massive du mix électrique n'a pas encore eu lieu ;
- En 2050, la production territoriale continue de subvenir à la demande nationale grandissante, mais s'appuie désormais sur un mix presque intégralement décarboné.

C'est la combinaison de ces deux dynamiques qui produit l'évolution en pic de l'impact carbone territorial de notre nouveau segment industriel (Tableau 13).

Emissions par la production de batteries (en ktCO <sub>2</sub> e/an)	2022	2030	2050
Emissions territoriales	0	100	0,3

**Tableau 13 – Evolution de l'impact carbone territorial de la filière batterie, dans l'économie du PTEF**

*Source : calculs de The Shift Project [29]*

Malgré cet effet d'augmentation sur la période 2020–2030, les émissions générées par la filière restent anecdotiques sur le total national : avec un maximum à 100 ktCO<sub>2</sub>e annuelles et une tendance ramenée à 0,3 ktCO<sub>2</sub>e/an à horizon 2050, la filière ne représente, en approche territoriale, qu'une part bien inférieure à 1 % des émissions du pays en 2050<sup>16</sup>. **Il est cependant essentiel de comprendre que ces résultats ne représentent qu'une partie de la chaîne de valeur, et que la prochaine étape de dimensionnement de la filière ne peut s'affranchir d'une réflexion en empreinte.**

## Une vulnérabilité déplacée vers l'amont de la chaîne de valeur

Electrifier la mobilité permet de s'affranchir des énergies fossiles dans leur usage final (à savoir brûler du pétrole pour produire de l'énergie mécanique). Si cela permet de fermer une brèche dans la résilience de l'économie, une nouvelle vulnérabilité est cependant créée : le stockage de l'énergie qui permet la mobilité dépend désormais de la fiabilité des flux alimentant la chaîne de valeur des batteries et en particulier des métaux indispensables à leur production, qui créent des concurrences entre la mobilité, les composants électroniques etc.). Nos déplacements deviennent ainsi dépendants de la disponibilité des minéraux comme le cobalt, le lithium ou

<sup>16</sup> L'évaluation complète des émissions territoriales après transformation sera déployée au sein du rapport dédié, prévu pour début 2022.

notamment le nickel, dont l'approvisionnement est exposé à d'autres vulnérabilités (concentration géographique de la production, risques géopolitiques etc.) et pour lesquels le pétrole reste indispensable aux phases d'extraction et de première transformation.

**L'impact hors frontière de la production des batteries**, notamment dû à la phase d'extraction et de première transformation, **représente au minimum la moitié des émissions totales de production. Bien qu'il ne soit pas pris en compte dans les estimations territoriales du PTEF, il est essentiel à pointer** : la complexe relocalisation des phases de production concernées n'étant pas effectuée dans le Plan, cette partie de l'impact reste incompressible de ce point de vue. **Produire les batteries dont nous avons besoin continuera de nécessiter l'entretien d'une dépendance envers des sites de production dont les dynamiques et impacts sont hors de portée de nos leviers d'action nationaux**<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> Les choix technologiques à venir peuvent influencer sur cette conclusion, avec des technologies comme celles basées sur le phosphate de fer et la possibilité de développer des projets miniers sur les sols européens.

04

**PORTER LA FILIÈRE DE  
L'APRÈS-PREMIÈRE  
VIE À LA BONNE  
ÉCHELLE**

# I. L'APV : définition

La filière d'Après-Première vie (APV) est le rouage essentiel de notre nouvelle gestion des flux de matières. Rassemblant les acteurs du recyclage, de la réparation et du réemploi, elle couvre l'ensemble des activités qui prennent en charge les biens après leur première utilisation : appareils électroniques en panne, emballages en verre après utilisation, chutes de différents métaux, déchets de chantier, mobilier en bois, plastiques ou fer forgé etc.

Sa particularité principale est d'englober une myriade d'acteurs dont les objectifs et intérêts peuvent entrer en concurrence suivant les matières et territoires concernés.

**Le périmètre retenu comprend les activités de recyclage (collecte, tri et réparation), et la réparation de biens de consommation hors automobile : équipement électriques et électroniques, chaussures, habillements et bijoux, etc.**

Ne sont pas inclus, dans les chiffres ici présentés sur les acteurs et emplois :

- Les activités de collecte et de tri menées par les collectivités, par manque de données ;
- La réparation des automobiles et des deux-roues motorisés, qui est intégrée à la note sectorielle dédiée à l'emploi dans l'industrie automobile [57] ;
- Les acteurs de la gestion traditionnelle des déchets et des industries lourdes ou manufacturières dont l'emploi pâtirait d'une meilleure gestion de l'après-première vie.

**Les filières du recyclage rassemblent des acteurs de taille suffisamment importante pour opérer des infrastructures d'échelle industrielle. Leurs activités représenteraient près de 50 000 emplois salariés<sup>18</sup>, principalement dans le recyclage des métaux, des granulats et des papiers et cartons. Il s'agit des emplois de collecte, tri et recyclage des entreprises spécialisées dans le recyclage, ne tenant donc pas compte des activités de collecte et de tri opérées par les collectivités et hors filière plastique<sup>19</sup>.**

**Le secteur de la réparation est quant à lui très atomisé**, à la fois par type de produits réparés, et par type d'acteurs, les réparateurs pouvant être :

---

<sup>18</sup> Détails et répartition de ces emplois entre les différentes filières de recyclage disponibles dans le rapport « Emploi » du PTEF [57].

<sup>19</sup> Bien qu'une évaluation en ait été initiée dans les travaux sur la filière de la chimie, l'emploi du recyclage (actuel et historique) reste difficile à estimer avec précision, n'étant pas suivi en tant que tel dans les statistiques nationales.

- Des artisans indépendants, agréés ou non ;
- Des réparateurs industriels agréés ;
- Des fabricants ou distributeurs, dont la réparation n'est pas l'activité principale ;
- Des acteurs de l'économie sociale et solidaire (ESS) [58],[59].

**L'ADEME propose une comptabilisation qui totalise 61 000 salariés et non-salariés dans les entreprises dont la réparation est l'objet principal**, hors automobile et véhicules légers [60]<sup>20</sup>. Il s'agit des emplois de la réparation hors distributeurs, fabricants et acteurs de l'ESS, étant donné qu'il est difficile pour ces derniers d'estimer le volume d'emploi dédié à la réparation. **Pour le secteur du réemploi**, l'ADEME comptabilise en 2017 6700 entreprises et 34 000 ETP, **dont 85 % relèvent de l'ESS** [61].

## II. Un rôle-clé dans la décarbonation de la production industrielle

L'intérêt stratégique de cette filière est de présenter un potentiel d'exploitation très fort des matières déjà présentes sur le territoire. Levier-clé dans la décarbonation de l'industrie métallurgique et plastique grâce au recyclage, elle permet aussi de réduire la dépendance de l'industrie manufacturière et de l'économie aux produits neufs, en allongeant les durées de vie grâce au réemploi et la réparation.

Aujourd'hui, **15 % des intrants français** en matières premières transformées **proviennent du recyclage** [18]. Or, comme évoqué pour les filières acier (développement de la filière électrique) et chimie (réduction de la production de résines vierges pour les plastiques), la mise en place d'infrastructures de recyclage performantes permettra de diminuer les impacts des matières auxquelles elles sont liées.

**Augmenter la durée de vie (réparation, réemploi)** est le levier le plus communément identifié par les acteurs de la production et distribution de biens (électronique, électroménager, textiles et habillement etc.) pour réduire les impacts carbone et environnementaux de nos usages.

Développer les capacités de nos filières de réparation et reconditionnement (pour 326 Mt de déchets en France en 2017 et 2,5 Mt de biens ménagers collectés, seuls 40 % de

---

<sup>20</sup> Données ACOSS, issues de l'étude ADEME publiée en 2018, « Panorama de l'offre de réparation en France » [60]. Détails et répartition de ces emplois entre les différentes filières disponibles dans le rapport « Emploi » du PTEF [57].

biens sont par exemple réemployés ou réutilisés [18] permet de diminuer notre dépendance aux intrants en matières premières (énergétiques et non-énergétiques), en limitant le nombre de biens produits et en favorisant la production de pièces détachées par exemple. Cela ne peut se faire qu'en rendant économiquement rentables et compétitives les activités de réparation, qui souffrent aujourd'hui du déséquilibre du prix de la main d'œuvre face au prix de l'énergie et des ressources consommées (qui permet de produire puis d'importer des biens sur de longues distances pour des coûts moins importants qu'une production locale).

Rendre compétitif la réparation, le recyclage et le réemploi permettra de développer des filières à forte valeur ajoutée en termes de main d'œuvre. L'impact sur l'emploi net requerrait d'évaluer les pertes d'emploi liées au développement de ces activités, notamment dans la gestion, le stockage et l'incinération des déchets, et dans la production de matières vierges. C'est ce qui a été ébauché dans les travaux portant sur la chimie des plastiques, présentés plus tôt dans ce rapport, exploitant notamment une étude de Deloitte de 2015<sup>21</sup> estimant que l'impact net sur l'emploi du recyclage de 1000 tonnes de plastiques supplémentaires est largement positif (8 emplois nets par kt de plastiques recyclés supplémentaire)<sup>22</sup>.

Avec le développement des filières, des économies d'échelle pourraient cependant avoir pour effet de diminuer l'intensité en emploi de ces activités, notamment dans les filières les moins matures. L'augmentation des flux de déchets traités allant de pair avec une moindre qualité des matériaux à trier et une plus grande difficulté à les recycler, on comprend que la formulation de résultats quantitatifs sur l'avenir de l'emploi dans l'APV réclame des travaux supplémentaires qui y seraient dédiés, de modélisation et d'audition des acteurs.

**Dans le PTEF, les évolutions dans les consommations de biens sont partiellement prises en compte :** le développement des filières de réparation et réemploi n'est pas traduit en tant que tel dans la modélisation quantitative, mais des hypothèses explicites sur les durées de vie sont implémentées dans le modèle de description de l'industrie<sup>23</sup>. Ce choix méthodologique permet d'intégrer ces dynamiques dans la modélisation générale de l'industrie, tout en permettant d'affiner ultérieurement les transformations des secteurs manufacturiers n'ayant pas fait l'objet d'une documentation dédiée à ce stade (comme l'industrie du textile, par exemple).

---

<sup>21</sup> Réalisée pour l'Association Alliance Chimie Recyclage (2ACR), l'ADEME et le Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique [62].

<sup>22</sup> Cette estimation s'appuie toutefois sur une étude anglaise de 2004 et pourrait ne plus être pertinente à l'heure actuelle.

<sup>23</sup> Les résultats macroscopiques et une description de ce modèle seront disponibles dans le livrable global du PTEF, prévu pour début 2022.

**Les travaux réalisés dans le cadre du Plan à ce stade permettent de soulever les grands axes de travail indispensables à faire de la filière de l'APV l'atout qu'elle doit devenir pour la décarbonation de notre production :**

- **Replacer les activités de l'APV dans l'évolution des flux de matières et de production industriels<sup>24</sup> ;**
- **Construire une politique industrielle qui permette d'orienter les acteurs vers des objectifs clairs, de manière coordonnée.**

### **III. Structurer la filière ne peut se passer d'une véritable politique industrielle**

Dans l'économie transformée, la réparation, le réemploi et le recyclage se développent et se structurent au sein d'une véritable filière de l'après-première vie. Sa structuration et son pilotage nous rendent capables de déployer une véritable stratégie de gestion de nos biens et de nos déchets.

**Les différentes chaînes de valeur qui composent le terreau de la filière APV sont aujourd'hui asymétriques et en concurrence.**

**La filière recyclage** est une filière structurée et forte d'infrastructures logistiques d'échelle industrielle, contrairement à **la filière de réemploi** qui repose sur des structures généralement moins importantes. C'est la politique industrielle appelée par le PTEF qui permettra de dimensionner **une filière s'appuyant sur les infrastructures logistiques et la puissance industrielle des filières de recyclage** aujourd'hui déjà déployée sur le territoire, tout **en y associant la galaxie déjà présente de gisements d'activités liés à la réparation et au réemploi** (implantations locales et territoriales, savoir-faire existant, apports sociaux et sociétaux indirects, emplois existants et à créer etc.).

Pour donner une véritable impulsion de filière à cette diversité d'activités, le PTEF propose de construire un espace de gouvernance initié par les pouvoirs publics et

---

<sup>24</sup> L'outil de modélisation mis au point dans le cadre du travail sur l'évaluation matière et la description de la transformation de l'industrie du PTEF permet d'explicitier les liens entre les flux de matières (acier, aluminium, verre, plastiques, papier-carton, granulats), les filières de production et les taux de recyclage en vigueur.

impliquant les acteurs du secteur. Cette construction à plusieurs parties permet en 2050 :

- De répartir l'effort de traitement de nos déchets entre les différentes alternatives (réemploi, réparation, recyclage) en résolvant les conflits d'usages possibles<sup>25</sup>.
- D'aligner ces choix avec les évolutions des autres filières en amont (la production de déchets et l'industrie lourde) comme en aval (l'industrie manufacturière et les évolutions des usages)<sup>26</sup>.

Le socle formé par cette stratégie industrielle nationale permettra ensuite aux **échelons territoriaux et locaux d'assurer le déploiement** des outils et activités opérationnelles les plus pertinents (collecte des déchets et des biens, infrastructures logistiques liées aux consignes, réseaux de réparation, circuits cohérents pour les chaînes de recyclage, formations professionnelles etc.). **Les emplois générés sont quant à eux de très nombreux types**, puisqu'ils balayent le spectre professionnel allant de la **réalisation opérationnelle** (réparation, reconditionnement, collecte, nettoyages et réemplois etc.) à la **structuration de filière** et **l'innovation technique** de ses procédés (structuration d'investissements, développement de modèles économiques, innovation de procédés, structurations logistiques, construction d'infrastructures, pilotages stratégiques etc.).

---

<sup>25</sup> Un emballage en verre ne peut par exemple plus être réutilisé s'il est déjà brisé pour être recyclé. Les deux filières s'appuient donc sur la même matière première, le déchet « bouteille en verre », ce qui les place en situation de concurrence sur la ressource.

<sup>26</sup> Par exemple, la nécessité de réduire les matières plastiques pour permettre aux filières lourdes pétrochimiques de se placer sur la bonne trajectoire de diminution des émissions ne peut se faire sans poser les questions liées au traitement des différents types de déchets plastiques, à la place des emballages dans les usages, ainsi qu'à celle du verre et des mécanismes de consigne.

05

**CAPTER LE  
CARBONE DE  
L'INDUSTRIE**

# I. Le CCS dans le PTEF : prioriser une technologie limitée

## Une technologie mûre mais limitée

Capter le carbone est l'une des ruptures technologiques régulièrement citées par les feuilles de route de décarbonation de cette dernière décennie. Son principe est simple en substance : il consiste à emprisonner les molécules de dioxyde de carbone présentes dans les effluents gazeux issus d'une installation industrielle (une centrale thermique au charbon, fuel ou gaz, une aciérie, une cimenterie, une raffinerie...), pour les faire ensuite migrer soit vers un site de stockage, soit vers un site de traitement pour être réutilisées dans d'autres usages.

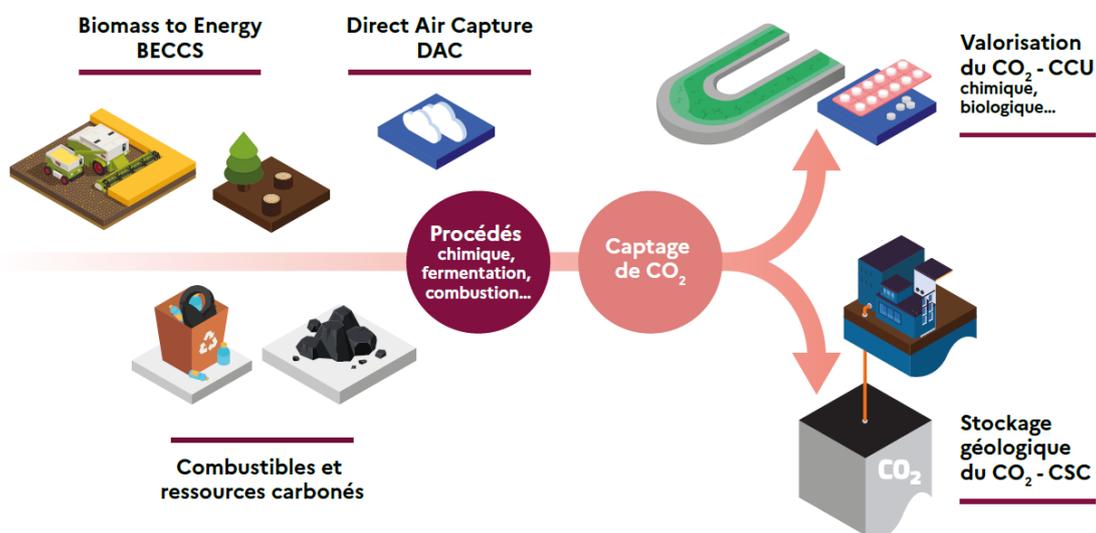
Les technologies aujourd'hui à l'étude se répartissent entre trois processus de captation du carbone, et deux types de traitement :

- **La captation et l'origine du dioxyde de carbone :**
  - **Le carbone peut être issu de la combustion d'énergie fossiles**, ou de procédés de production (chimie de l'ammoniac, production du clinker etc.), dont les fumées sont captées en sortie d'usine et traitées pour en extraire le CO<sub>2</sub><sup>27</sup>.
  - **Les procédés dits « Biomass to Energy with CCS (BECCS) »** permettent de capter (suivant les technologies décrites précédemment) le carbone dit « biogénique », issu des fumées de combustion de sites de production utilisant uniquement de la biomasse comme combustible. Cette méthode permet en fait d'utiliser la croissance végétale comme mécanisme de captation du carbone de l'air ambiant et d'ainsi servir de puits de carbone ;

---

<sup>27</sup> Dans les procédés de précombustion, la combustion est partielle et réalisée avec de l'eau, ce qui conduit notamment à la synthèse d'hydrogène et de CO<sub>2</sub>, qui doit ensuite être séparé pour être stocké : c'est l'hydrogène dit « bleu ». Les procédés de postcombustion consistent à capturer le CO<sub>2</sub> contenu dans les effluents gazeux d'installations industrielles. Enfin, les procédés d'oxycombustion utilisent comme comburant non pas l'air mais l'oxygène, lequel doit donc être préalablement extrait de l'air (par cryogénie, notamment), de manière à ce que les gaz de combustion contiennent uniquement du CO<sub>2</sub> et de l'eau. Il suffit donc de les déshydrater avant transport et stockage. Il existe enfin des technologies de capture spécifiques à des procédés de production (chimie de l'ammoniac, production du clinker, etc.).

- Le « **Direct Air Capture (DAC)** » ambitionne quant à lui de capter directement le dioxyde de carbone dans l'air ambiant à l'aide d'installations industrielles dédiées.
- **Les types de traitement :**
  - Le CO<sub>2</sub>, une fois capté, peut être transporté puis stocké de façon permanente dans des structures géologiques profondes, comme des aquifères ou des réservoirs de pétrole ou gaz déplétés : c'est le CCS.
  - Il peut sinon être réutilisé dans des processus industriels de valorisation du carbone, ou d'utilisation du carbone, directe ou par transformation chimique afin de produire de nouvelles matières ou des combustibles de synthèse : c'est le CCU (Carbon Capture and Utilisation).



**Figure 22 – Les différentes technologies associées au CCS : CCU, BECCS et DAC**  
 Source : (ADEME, 2020) [19]

**Dans le PTEF, les technologies mobilisées relèvent uniquement du captage du carbone issu des fumées d'usines** recourant à des combustibles fossiles et de son stockage géologique. Le captage du carbone n'y ambitionne pas de servir de puits de carbone à grande échelle, qui permettraient d'atteindre la neutralité en 2050 en retirant du CO<sub>2</sub> aujourd'hui présent dans l'atmosphère, mais bien de permettre d'alléger la part de contraction des émissions de l'industrie devant reposer sur la réduction des volumes de production.

Les procédés reposant sur la soustraction de carbone de l'atmosphère (BECCS et DAC) reposent sur des probabilités de viabilité différentes :

- **Le DAC reste aujourd’hui un pari technologique très incertain.** Certaines de ses technologies essentielles n’atteignent aujourd’hui pas le degré de maturité nécessaire à un déploiement à l’échelle industrielle dans les 5 à 30 prochaines années (l’efficacité des filtres nécessaires à capter suffisamment de carbone dans l’air par exemple, ou bien le manque de données actuelles sur l’énergie nécessaire à la production et l’opération de ces systèmes) [19];
- **Les technologies liées au BECCS sont majoritairement matures. Ce procédé s’appuie par contre sur une utilisation particulière de la biomasse,** dont les conditions de viabilité au sein d’une économie qui se transforme restent à instruire. La biomasse et les surfaces nécessaires à la produire font partie des ressources sur lesquelles il existe des tensions grandissantes dans le cadre d’un report vers les énergies et matériaux décarbonés (comme le bois pour la construction ou la biomasse pour la production d’énergie par exemple<sup>28</sup>).

**Les projets de CCS aujourd’hui en construction ou en développement avancé dans le monde représentent selon le Global CCS Institute une capacité de stockage totale de près de 40 MtCO<sub>2</sub>/an [63]. Selon l’ADEME, près d’une vingtaine de projets de ce type sont véritablement déployés à l’échelle industrielle, pour une capacité de stockage totale mondiale de 23 MtCO<sub>2</sub>/an.**

Le CCS est donc une technologie au degré de maturité suffisamment avancé pour faire partie de l’équation de décarbonation, mais qui ne peut aujourd’hui être retenue comme une solution généralisable de grande ampleur.

Techniquement mûr mais très intense en capitaux et avec des incertitudes sur ses capacités de passage à l’échelle<sup>29</sup>, de nombreuses questions préliminaires et stratégiques doivent être tranchées :

- Quels cadres et organisation des activités de CCS : sur le plan pratique (localisation des zones de stockages, déploiement des infrastructures) comme juridique (responsabilité du stockage, des fuites éventuelles etc.) ?

---

<sup>28</sup> Ces dynamiques de croissance du recours au bois dans la construction sont décrites dans les travaux portant sur la filière ciment-béton et au sein du rapport du Shift Project « Habiter dans une société bas carbone – Dans le cadre du Plan de transformation de l’économie française », publié en octobre 2021.

<sup>29</sup> Le déploiement d’infrastructures de captage et de stockage réclame des investissements financiers et matériels très conséquents : production et opération des dispositifs de captage en sortie des cheminées, déploiement d’une infrastructure de transport et de stockage d’envergure comparable à certaines installations pétrolières, nécessité d’assurer la surveillance des sites de séquestration et de limiter les risques de catastrophes naturelles liés. Les effets d’échelle sont de plus complexes à atteindre dans la phase de captage notamment, l’intégration des dispositifs de captage nécessitant une adaptation systématique aux spécificités du site industriel, à ses cheminées, à ses évacuations (ADEME, 2020) [19]. De là vient la pertinence d’utiliser à court terme les infrastructures existantes pour le stockage, notamment en Mer du Nord ou en Aquitaine.

- Quelles sont les secteurs de l'économie prioritaires dans l'allocation des possibilités de stockage, si les capacités en sont limitées ?

## Le recours au CCS dans le PTEF

Le potentiel de captation et de stockage des émissions carbonées en France est évalué par l'ADEME [19], en identifiant les sources de gaz à effet de serre répondant aux critères afférents :

- Les sources doivent être fixes : les sources mobiles (comme un véhicule, par exemple) ne peuvent pas être raccordées à l'infrastructure de traitement, transport et stockage nécessaire ;
- La concentration des fumées des sites doit être suffisante pour permettre le captage des molécules de CO<sub>2</sub> par les solvants<sup>30</sup>, et la quantité de carbone émis par l'installation doit être supérieure à 100 ktCO<sub>2</sub>/an pour assurer la viabilité technico-économique du déploiement ;
- La conformation et localisation des sources doivent être compatibles avec les contraintes de mise en place des dispositifs de captage et la faisabilité des infrastructures de transport au vu de l'emplacement des sites de stockage.

Dans une économie française suivant bien une stratégie visant à rendre sa production d'électricité indépendante des énergies fossiles, les seules installations correspondant à ces critères sont celles de l'industrie lourde. Le potentiel évalué par l'ADEME de captation des émissions de l'industrie en France s'élève à 24 MtCO<sub>2</sub>/an.

Parmi ces sites, **les installations des filières de production de ciment, d'acier et de production d'ammoniac sont particulièrement éligibles au déploiement du CCS**<sup>31</sup> :

- Leurs procédés sont très intenses en carbone et il s'agit d'installations présentes dans les grandes régions porteuses ou connectées à des sites de stockage géologiques viables (pourtour Nord du territoire avec notamment les structures géologiques des eaux voisines de la Mer du Nord – Norvège, Royaume-Uni, Pays-Bas –, et dans une moindre mesure Aquitaine et quart Sud-Est de la France avec les aquifères salins profonds de leurs sous-sols) ;
- Leurs émissions carbonées sont notamment des produits indésirables directs de leurs procédés de production, et resteront donc incompressibles même

---

<sup>30</sup> La technologie en post combustion par captage aux amines est aujourd'hui la plus mature et largement déployée.

<sup>31</sup> Les installations de production d'électricité au gaz, charbon ou pétrole ne sont pas listées ici, en ce qu'elles ne font pas partie d'un mix électrique français transformé vers une indépendance aux énergies fossiles en tant que telles.

dans une société transformée puisqu'elle continuera d'avoir recours au ciment, à l'acier et aux produits issus de la chimie.

**Le CCS est une technologie puissante mais complexe**, en ce qu'elle combine des innovations fortes dans chacune de ses phases (captage, transport, stockage), qu'elles soient d'ordre technique (chimie des amines, captage par le froid, gestion et sécurité des sites de stockage etc.), réglementaire (droit international pour le stockage offshore etc.) et sociétal (acceptabilité du stockage sur le territoire, implantations de lourdes infrastructures etc.).

L'enjeu est donc d'en faire l'atout qu'elle peut être : **en la rendant possible à la bonne échelle** (grâce à un pilotage du déploiement, de l'évolution des sites industriels, de la mutualisation des infrastructures) **et en la priorisant sur les industries aux émissions de procédés très importantes**.

**Le PTEF les déploie donc de manière réaliste bien qu'ambitieuse, en les priorisant sur les cimenteries, la production d'ammoniac et la sidérurgie :**

- **1 MtCO<sub>2</sub>/an captées sur les sites de production de l'industrie cimentière ;**
- **2 MtCO<sub>2</sub>/an captées sur les sites de production de l'industrie chimique ;**
- **4 MtCO<sub>2</sub>/an captées sur les sites de production de l'industrie sidérurgique.**

Cette capacité totale de 7 MtCO<sub>2</sub>/an, construite sur la base des potentiels identifiés par l'ADEME et des considérations de faisabilité développées dans nos analyses sectorielle, correspond à l'ordre de grandeur du potentiel sur lequel compte la SNBC (environ 5 MtCO<sub>2</sub>/an [12]).

## **II. Le captage du carbone à grande échelle : la mobilisation des puits**

Pour l'industrie, le PTEF parie sur un déploiement soutenu de la technologie CCS au vu de ses capacités de déploiement aujourd'hui identifiées.

Il est essentiel de comprendre que, **malgré la priorisation que propose le PTEF, l'incertitude technique et économique (dont une partie provient du manque de compréhension des enjeux par les parties prenantes) demeure forte sur ce levier pour le faire passer à la bonne échelle**.

Les autres leviers technologiques ayant par ailleurs également été mobilisés au maximum de leur potentiel, **tout manquement d'objectif pour le CCS impliquera de**

**mobiliser davantage le levier de sobriété afin d'atteindre malgré tout l'objectif de 80 % de réduction des émissions à 2050. Œuvrer pour le déploiement du CCS n'affranchit donc en rien du travail à mener pour préparer la sobriété.**

Dans le PTEF, le CCS n'est donc pas un moyen de neutralité carbone global mais bien un levier sectoriel, puisqu'il est réservé aux émissions fatales des industries lourdes. La véritable neutralité, elle, ne peut s'obtenir qu'au niveau du territoire grâce à une politique forestière robuste et une stratégie de mobilisation des puits de carbone du territoire par la gestion des sols. Ces questions font partie des axes n'ayant pas été documentés à ce stade par le PTEF, bien qu'ayant été identifiés et détournés.

06

**PRODUIRE DANS  
UNE SOCIÉTÉ  
TRANSFORMÉE,  
POUR DES USAGES  
DÉCARBONÉS**

**L'industrie après transformation reste une industrie**, qui continue de produire les infrastructures et biens essentiels de la société mais de manière adaptée aux nouvelles manières plus sobres de se déplacer, de produire, transporter et consommer la nourriture, de communiquer, d'habiter ou bien de se divertir.

**Les leviers du progrès technique et l'innovation technologique et organisationnelle profonde ont été poussés au maximum et l'adaptation à un minimum de sobriété, est restée inévitable.** La combinaison des deux a permis à l'industrie de relever son double défi et elle profite aujourd'hui de moyens et procédés de production **aux meilleurs standards mondiaux, tout en ayant permis au pays de se transformer en profondeur.**

**Certaines productions ont vu leur volume se réduire de manière importante** (ciment, béton, plastiques, engrais notamment) **mais la valeur de leurs produits désormais décarbonés augmenter fortement.** Leur transformation rapide grâce à la mise à disposition d'électricité supplémentaire non carbonée leur a même permis de réduire les importations, de relocaliser certaines productions (chimie ou acier) et de retrouver un solde commercial positif.

L'industrie manufacturière a, elle, retrouvé sa compétitivité grâce à la décarbonation de ses intrants et au développement piloté d'une industrie de batteries nationale, véritable facteur de souveraineté.

**Les développements de nouvelles filières comme celles de l'APV, qui maille l'intégralité du territoire avec des emplois non-délocalisables,** ont permis de compenser une partie des pertes d'emploi des secteurs qui verront leurs volumes baisser, comme le ciment. Au total, l'effet sur l'emploi aura pu être géré mais un effort d'adaptation, d'accompagnement et de formation massif aura été nécessaire.

S'étant lancées rapidement dans la transformation vers une économie décarbonée, les filières industrielles françaises seront devenues des filières d'excellence et des références mondiales en termes de décarbonation.

# ANNEXES

# Annexe 1 : La question du coût – la production d’hydrogène et le CCS pour la sidérurgie

Le coût de production de l’hydrogène décarboné sera lié à celui de l’électricité.

Sur la base d’un coût de l’électricité de 50 €/kWh, le coût variable de cet hydrogène serait autour de 150€ par tonne d’acier, avec 55 kg d’hydrogène (et donc plus de 3000 kWh) nécessaires par tonne d’acier produite.

Ce surcoût est à comparer à celui que nous avons vu du CCS. Dans les deux cas, des études économiques complètes et complexes devront être faites.

Dans tous les cas, la question de savoir comment rendre économiquement viable ces surcoûts est incontournable. Dans le cas de l’acier, son prix peut varier entre 500 et 1000€/t, voire plus de 2000€/t pour l’inox, ce qui réduit sa sensibilité au surcoût.

Nous avons appliqué les coûts du CCS estimés par l’ADEME en les rapportant à la tonne d’acier produite via la filière haut-fourneau :

Evaluation de sensibilité – coût du CCS	Onshore	Offshore	
	Moyenne	200 km	1500 km
<b>Capture (en €/tCO<sub>2</sub>)</b>	55	55	5
<b>Liquéfaction (en €/tCO<sub>2</sub>)</b>	9	9	9
<b>Transport (en €/tCO<sub>2</sub>)</b>	4	6	23
<b>Stockage (en €/tCO<sub>2</sub>)</b>	9	9	20
<b>Total (en €/tCO<sub>2</sub>)</b>	77	79	107
<b>Carbone émis par l’acier (tCO<sub>2</sub>/t)</b>	2	2	2
<b>Coût pour l’acier (en €/t)</b>	154	158	214

**Tableau 14 – Evaluation de sensibilité du prix de la production d’acier suivant le coût de déploiement du CCS**

**Source : calculs de The Shift Project à partir de (ADEME, 2021) [19]**

# Bibliographie

- [1] INSEE, « Tableaux de l'économie française Édition 2020 ». <https://insee.fr/fr/statistiques/4277882?sommaire=4318291&q=emplois+%C3%A9nergie#consulter> (consulté le sept. 09, 2020).
- [2] INSEE, « Activité, emploi et chômage en 2020 et en séries longues », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5359500?sommaire=5359511&q=emploi+s%C3%A9rie#titre-bloc-2>
- [3] INSEE, « Principaux indices et séries chronologiques », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3532174?sommaire=3530678&q=emplois+industrie>
- [4] CITEPA, « Données d'émissions et rapports d'inventaire », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.citepa.org/fr/telechargements/>
- [5] Insee, « ESANE. Fiches sectorielles - 2016. », 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4497713>
- [6] INSEE, « Comptes nationaux annuels - base 2014; emploi intérieur total par branche en nombre de personnes; valeur ajoutée brute par branche à prix courants », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/serie/s1030?debut=0>
- [7] I4CE, « Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2020 », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-climat-0>
- [8] CITEPA, « Rapport CCNUCC », 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.citepa.org/fr/ccnucc/>
- [9] EUROSTAT, « Bilans énergétiques ». <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/energy/data/energy-balances> (consulté le sept. 09, 2020).
- [10] Worldsteel, « World steel in figures », Worldsteel, 2019.
- [11] CNI et SFIC, « Décarbonation de l'industrie - Feuille de Route de la Filière Ciment », Conseil National de l'Industrie, 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/files\\_cni/files/csf/construction/decarbonation\\_feuille\\_de\\_route\\_ciment.pdf](https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/files_cni/files/csf/construction/decarbonation_feuille_de_route_ciment.pdf)
- [12] MTES, « Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) ». 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

- [13] HCC, « Maîtriser l’empreinte carbone de la France », Haut Conseil pour le Climat, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hautconseilclimat.fr/publications/maitriser-lempreinte-carbone-de-la-france/>
- [14] CNI, « Décarbonation de l’industrie - Feuille de route de la filière mines et métallurgie », 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/files\\_cni/files/csf/construction/decarbonation\\_feuille\\_de\\_route\\_mines\\_et\\_metallurgie.pdf](https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/files_cni/files/csf/construction/decarbonation_feuille_de_route_mines_et_metallurgie.pdf)
- [15] Létard, V., « Rapport d’information au nom de la mission d’information sur les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du XXI<sup>e</sup> siècle: opportunité de croissance et de développement - Tome I: Rapport », Sénat. n° 649, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.senat.fr/rap/r18-649-1/r18-649-11.pdf>
- [16] Global Efficiency Intelligence, « How clean is the U.S. steel industry? An International Benchmarking of Energy and CO2 Intensities », 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/60c136b38eeef914f9cf4b95/1623275195911/How+Clean+is+the+U.S.+Steel+Industry.pdf>
- [17] A3M, « Données économiques - chiffres-clés », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.a3ms.fr/donnees-economiques/chiffres-cles/>
- [18] ADEME, « Bilan National du Recyclage 2008-2017 - Evolutions du recyclage en France de différents matériaux: métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois », 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/3860-bilan-national-du-recyclage-bnr-2008-2017-et-acv-des-flux-de-dechets-recycles.html#/44-type\\_de\\_produit-format\\_electronique](https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/3860-bilan-national-du-recyclage-bnr-2008-2017-et-acv-des-flux-de-dechets-recycles.html#/44-type_de_produit-format_electronique)
- [19] ADEME, « AVIS de l’ADEME - Captage et stockage géologique de CO2 (CSC) en France », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/69-avis-de-l-ademe-captage-et-stockage-geologique-de-co2-csc-en-france.html>
- [20] The Shift Project, « Habiter dans une société bas carbone - Dans le cadre du Plan de transformation de l’économie française », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://theshiftproject.org/article/rapport-final-habiter-dans-une-societe-bas-carbone-7-octobre-2021/>
- [21] The Shift Project, « La transition bas carbone, une opportunité pour l’industrie automobile française? Dans le cadre du Plan de transformation de l’économie française », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://theshiftproject.org/article/la-transition-bas-carbone-une-opportunite-pour-lindustrie-automobile-francaise-rapport-final-18-novembre/>
- [22] GCCA, « GNR database. Global Cement and Concrete Association. », 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>
- [23] MTE, « RE2020 - éco-construire pour le confort de tous - Mise à jour au 18 février 2021 », Ministère de la transition écologique, 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2021.02.18\\_DP\\_RE2020\\_EcoConstuire\\_0.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2021.02.18_DP_RE2020_EcoConstuire_0.pdf)

- [24] IFPEB et Carbone 4, « Le Hub des prescripteurs bas carbone - Brief filière béton & book innovation », Webinaire du 08/12/2020, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ifpeb.fr/wp-content/uploads/2021/02/Barome%CC%80tre-du-Hub-des-prescripteurs-bas-carbone-n%C2%B01-2302.pdf>
- [25] ADEME, « Prospectives 2035 et 2050 de consommation de matériaux pour la construction neuve et la rénovation énergétique BBC », Déc. 2019, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://bibliothèque.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/439-prospectives-2035-et-2050-de-consommation-de-matériaux-pour-la-construction-neuve-et-la-renovation-energetique-bbc.html>
- [26] CNI et France Chimie, « Décarbonation de l'industrie - Feuille de route de la filière chimie », 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions\\_services/plan-de-relance/DP-07052021-Feuille-route-decarbonation-chimie.pdf](https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/plan-de-relance/DP-07052021-Feuille-route-decarbonation-chimie.pdf)
- [27] MTE, « Evolutions des émissions de CO2 de la valeur ajoutée et de l'intensité en CO2 de la production - Industrie chimique et pharmaceutique », Ministère de la transition écologique, 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/defis-environnementaux/changement-climatique/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-de-l-industrie-manufacturiere#label\\_onglet951](https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/defis-environnementaux/changement-climatique/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-de-l-industrie-manufacturiere#label_onglet951)
- [28] A. Regette *et al.*, « Carbon footprint of electric vehicles - a plea for more objectivity », Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e.V. (Research Center for Energy Economics), 2018.
- [29] The Shift Project, « [Modèle] Modélisation de la filière batteries dans le PTEF », 2021.
- [30] JRC, « Lithium-ion Battery Value Chain and Related Opportunities for Europe », Joint Research Center, 2018. [En ligne]. Disponible sur: [https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/jrc105010\\_161214\\_li-ion\\_battery\\_value\\_chain\\_jrc105010.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/jrc105010_161214_li-ion_battery_value_chain_jrc105010.pdf)
- [31] ADEME, « Elaboration selon les principes ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2021 et 2020. », 2011. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/90511\\_acv-comparative-ve-vt-rapport.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/90511_acv-comparative-ve-vt-rapport.pdf)
- [32] J. Peters et M. Weil, « Providing a common base for life cycle assessments of Li-Ion batteries », *Journal of Cleaner Production*, 2017. [En ligne]. Disponible sur: doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.016
- [33] Q. Dai et J. C. Kelly, « Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications », *Argonne National Laboratory. Batteries* 2019, 5, 48, 2019. [En ligne]. Disponible sur: doi:10.3390/batteries5020048
- [34] M. Raugei et P. Winfield, « Prospective LCA of the production and EoL recycling of a novel type of Li-ion battery for electric vehicles », *Journal of Cleaner Production*

- 213 (2019) 926e932, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.237>
- [35] M. Messagie, « Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles, Vrije Universiteit Brussel, Transport & Environment », 2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.transportenvironment.org/publications/electric-vehicle-life-cycle-analysis-and-raw-material-availability>
- [36] H. Hao *et al.*, « GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China. Tsinghua University ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.mdpi.com/2071-1050/9/4/504>
- [37] M. Romare et L. Dahllöf, « The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries », IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede9559/1496046218976/C243+The+life+cycle+energy+consumption+and+CO2+emissions+from+lithium+ion+batteries+.pdf>
- [38] P. Wolfram et T. Wiedmann, « Electrifying Australian transport: Hybrid life cycle analysis of a transition to electric light-duty vehicles and renewable electricity », *Applied Energy*, 2017, 206, 531-540, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917312539>
- [39] H. Ambrose et A. Kendall, « Effects of battery chemistry and performance on the life cycle greenhouse gas intensity of electric mobility », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016, 47, 182-194, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920915300390>
- [40] J. Dunn *et al.*, « Life Cycle Analysis Summary for Automotive Lithium-Ion Battery Production and Recycling », Argonne National Laboratory, 2016, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.anl.gov/energy-systems/publication/life-cycle-analysis-summary-automotivelithium-ion-battery-production-and>
- [41] L. Ellingsen A. W. et al., « The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles », *Environmental Research Letters*, 2016, 11 (5), 2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/5/054010>
- [42] H. Kim C. et al., « Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis », *Environmental Science & Technology*, 2016, 50 (14), 7715-7722, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.6b00830>
- [43] J. Peters *et al.*, « The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67, 491-506, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211630471>
- [44] Circular Energy Storage, « Analysis of the climate impact of lithium-ion batteries and how to measure it », Commandé par « Transport & Environment ». Par Hans Eric Melin. Juillet 2019, 2019.
- [45] E. Emilsson et L. Dahllöf, « Lithium-Ion Vehicle Battery Production. IVL ».

- [46] K. Davidsson, « Energy use for GWh-scale lithium-ion battery production », *Environ. Res. Commun.* 2 012001, 2020.
- [47] L. Ellingsen A. W. et al., « Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack », *Journal of Industrial Ecology* 18 113–24, 2014.
- [48] C. Yuan *et al.*, « Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles », *CIRP Annals* 66 53–6, 2017.
- [49] Kelly, J.C. et al., « Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921003712?via%3Dihub>
- [50] Commission européenne, « Rapport de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économie et social européen, au Comité des régions et à la Banque Européenne d'investissement, sur la mise en oeuvre du plan d'action stratégique sur les batteries : créer une chaîne de valeur stratégique des batteries en Europe », Joint Research Center, 2019. [En ligne]. Disponible sur: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:72b1e42b-5ab2-11e9-9151-01aa75ed71a1.0003.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:72b1e42b-5ab2-11e9-9151-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF)
- [51] Verkor, « Verkor - ambition », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://verkor.com/ambition/>
- [52] ACC, « Projet d'usine de batteries à Douvrin / Billy-Berclau - Concertation du 25 février au 23 avril 2021 - Le projet en bref », Automotive Cells Company, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.concertation-acc-batteries.fr/le-projet-en-bref>
- [53] Figaro, « Usine de batteries Envision dans le Nord : 1000 emplois à la clé d'ici 2024 », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lefigaro.fr/flash-eco/usine-de-batteries-envision-dans-le-nord-1000-emplois-a-la-cle-d-ici-2024-20210625>
- [54] La Tribune, « Batteries électriques : la gigafactory d'Envision à Douai prévue pour fin 2024 », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.latribune.fr/regions/hauts-de-france/batteries-electriques-la-gigafactory-d-envision-a-douai-prevue-pour-fin-2024-895727.html>
- [55] Le Monde, « A Douai, dans le Nord, le chinois Envision construira des batteries pour Renault », 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/06/27/a-douai-dans-le-nord-le-chinois-envision-construira-des-batteries-pour-renault\\_6085954\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/06/27/a-douai-dans-le-nord-le-chinois-envision-construira-des-batteries-pour-renault_6085954_3234.html)
- [56] Syndex et FNH, « Electrification de l'automobile et emploi en France - Etude pour la Fondation pour la Nature et l'Homme », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fnh.org/automobile-notre-scenario-pour-transition-juste/>
- [57] The Shift Project, « L'emploi : moteur de la transformation bas carbone. Dans le cadre du plan de transformation de l'économie française », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://theshiftproject.org/article/emploi-moteur-transformation-bas-carbone-rapport-final-9-decembre/>
- [58] « Benchmark international du secteur de la réparation », ADEME, mai 2018.

- [59] « Panorama de l'offre de réparation en France », ADEME, nov. 2018.
- [60] ADEME, « Panorama de l'offre de réparation en France - Actualisation 2018 », 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/1014-panorama-de-l-offre-de-reparation-en-france-actualisation-2018.html>
- [61] ADEME, « Déchets, chiffres clés, l'essentiel 2018 », mars 2019. [En ligne]. Disponible sur:  
[https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/dechets\\_chiffres\\_clés\\_essentiel2018\\_010690.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/dechets_chiffres_clés_essentiel2018_010690.pdf)
- [62] Deloitte, « La chaîne de valeur du recyclage des plastiques en France: trois grands axes d'actions pour développer la filière », Association Alliance Chimie Recyclage (2ACR), ADEME, Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique, mars 2015.
- [63] Global CCS Institute, « Global status of CCS 2021 - CCS accelerating to net zero », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>

*The Shift Project* est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, notre mission est d'éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique en Europe. Nos membres sont de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité.

[www.theshiftproject.org](http://www.theshiftproject.org)

**Contacts :**

**Éric Bergé**

Chef de projet Industrie  
[eric.berge@outlook.com](mailto:eric.berge@outlook.com)

**Maxime Efoui-Hess**

Coordinateur du projet Industrie  
[maxime.efoui@theshiftproject.org](mailto:maxime.efoui@theshiftproject.org)

**Ilana Toledano**

Responsable presse et communication  
[ilana.toledano@theshiftproject.org](mailto:ilana.toledano@theshiftproject.org)

