



**DÉCARBONATION,
RÉINDUSTRIALISATION
&
ENTREPRISES DE TAILLE INTERMÉDIAIRE**

ANNEXES

20 DECEMBRE 2023

Liste des annexes

<i>Annexe 0 - Données utilisées et résultats complémentaires</i>	<i>2</i>
<i>Annexe 1 - Les émissions industrielles dans le monde et en Europe</i>	<i>6</i>
<i>Annexe 2 - Mix électrique</i>	<i>12</i>
<i>Annexe 3 - Empreinte, émissions et scopes</i>	<i>16</i>
<i>Annexe 4 - Importations et exportations françaises</i>	<i>22</i>
<i>Annexe 5 - EU ETS et MACF</i>	<i>32</i>
<i>Annexe 6 - Panorama des solutions de décarbonation pour l'industrie</i>	<i>47</i>
<i>Annexe 7 - Compétences et Emploi</i>	<i>55</i>

Annexe 0 - Données utilisées et résultats complémentaires

Données EU ETS

1. Les données mobilisées dans le cadre de l'analyse du Système Européen des Quotas d'Échange de l'Union Européenne (EU ETS dans son acronyme anglophone) proviennent de l'EUTL (EU Transaction Log). Il s'agit d'un registre qui consigne et quantifie l'intégralité des échanges liés au système EU ETS. Cette base de données existe depuis 2005, année de lancement du dispositif.
2. L'EUTL consigne annuellement les émissions vérifiées de chaque établissement du système, et les met en regard avec les quotas restitués par ces sites. Il est également possible d'y trouver la quantité de quotas alloués à titre gratuit à chacun des 11 000 établissements pris en compte par l'EU ETS.
3. Grâce aux SIRET relevés par l'EUTL, cette base a été jointe aux bases de données de l'INSEE pour identifier la catégorie d'entreprise à laquelle chaque établissement appartient (GE, ETI, PME, ou MIC).
4. Ces bases ont également permis de rattacher chaque établissement à son secteur NAF, et de ne pas se limiter à l'activité polluante déclarée aux autorités européennes compétentes. Cette distinction entre secteurs NAF et activité polluante déclarée est approfondie dans l'annexe 5, entièrement dévolue au dispositif EU ETS.

Base FARE

5. Le fichier Fare est le fichier des données individuelles comptables. Il est constitué chaque année par l'Insee, avec un délai de deux ans, donne au niveau de l'entreprise toutes les informations comptables.
6. Elle renseigne en particulier les chiffres d'affaires, charges, exportations, effectifs, mais également la catégorie de l'entreprise, son appartenance à un groupe ainsi que le secteur d'activité de l'entreprise.

Base DADS

7. La Déclaration Annuelle de Données Sociales (DADS)¹ est une formalité déclarative que doit accomplir toute entreprise employant des salariés.
8. Dans ce document commun aux administrations fiscales et sociales, les employeurs fournissent annuellement et pour chaque établissement, un certain nombre d'informations relatives à l'établissement et aux salariés.
9. Pour chaque salarié les informations suivantes sont déclarées : la nature de l'emploi et la qualification, les dates de début et de fin de période de paie, le nombre d'heures salariées, la condition d'emploi (temps complet, temps partiel), le montant des rémunérations versées, etc.
10. Pour l'Insee, les DADS permettent de produire des statistiques sur les salaires et l'emploi.

Données de douanes

11. Pour l'analyse des importation et exportation françaises, le rapport utilise les données de dédouanement ainsi que les informations relatives aux introductions et expéditions produites par la Direction Générale des Douanes et Droits indirects (DGDDI).

EACEI

12. Les émissions de gaz à effet de serre de l'industrie se composent de 2 parties : les émissions de procédés et les émissions de combustion. Pour quantifier les émissions de combustion, nous utilisons l'Enquête Annuelle sur les Consommations d'Énergie (EACEI) produite par l'Insee.
13. Cette enquête sonde chaque année 8 500 établissements, soit 39 % des établissements de plus de 20 employés de l'industrie manufacturière, hors extraction de produit énergétique et artisanat commercial.
14. Pour réaliser le sondage, l'INSEE utilise une allocation de Neyman visant à représenter au mieux les consommations nettes d'énergie des établissements avec une stratification par activité, par tranche d'effectifs et par région. L'enquête porte sur la consommation nette totale d'énergie, les achats et consommations de produits énergétiques, les usages de ces produits, l'autoproduction et l'autoconsommation d'électricité et enfin la facture énergétique des établissements et les prix moyens d'achat.
15. Les établissements employant plus de 250 salariés, ceux ayant une consommation d'énergie atypique ainsi que ceux appartenant à une strate comptant moins de 10 établissements sont tous interrogés.

¹ Définition issue de <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/serie/s1163/>

16. Nous avons choisi d'utiliser l'édition 2018 de cette enquête pour deux raisons principales. Premièrement, nous craignons que les éditions 2020 et 2021 de cette enquête soient trop marquées par la crise liée au Covid 19. Deuxièmement, l'enquête de 2019 manque à considérer l'usage des combustibles, ce qui ne permettrait pas d'estimer au mieux les émissions de combustions : si le pétrole sert à produire du plastique en tant que matière première, il peut aussi être brûlé pour fournir de la chaleur. Sans information sur l'usage, notre estimation des émissions de combustions serait sur ou sous-estimée.
17. À partir de ces données de consommation, nous construisons les émissions en nous appuyant sur la base empreinte de l'ADEME. Cette base a l'avantage de permettre la distinction entre les émissions dites « sur site » et les émissions amont. Pour certains combustibles comme les combustibles solides de récupération (CSR), ces données ont été complétées par des chiffres du Citepa. Les facteurs d'émissions retenus sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau 1: Facteurs d'émissions

Énergie	Émissions	Unité
Électricité	58,7	kgCO2eq/MWh
Gaz naturel	185	kgCO2eq/MWh
Houille	3080	kgCO2eq/tonne
Lignite-Charbon	1720	kgCO2eq/tonne
Coke de houille	3030	kgCO2eq/tonne
Coke de pétrole	3100	kgCO2eq/tonne
Butane-Propane	2497	kgCO2eq/tep en PCS
Fioul lourd	3140	kgCO2eq/tonne
Fioul domestique	2,68	kgCO2eq/litre
Autres produits pétroliers	3102	kgCO2eq/tep PCI
Bois	72	kgCO2eq/tonne
Combustibles spéciaux non renouvelables	3500	kgCO2eq/tonne
Boues d'épuration	550	kgCO2eq/tonne
Farines animales	1782	kgCO2eq/tonne
Biomasse	1800	kgCO2eq/tonne
Biogaz	4180	kgCO2eq/tonne
Bagasse	769	kgCO2eq/tonne

Source : Base empreinte Ademe, Citepa

18. Ces volumes d'émissions ainsi estimés ont été confrontés aux données du Rapport CCNUCC produite par le Citepa qui présente les émissions sous deux formats : la convention climat et le protocole de Kyoto. Chaque année, le Citepa révisé ses anciennes données dans le but de les affiner. Les résultats de nos calculs ont été comparés avec la révision de 2023 des émissions de 2018. Afin de construire ses estimations, le Citepa se fonde sur EACEI mais pas uniquement, cette base ne fournissant aucune information sur les émissions de procédés chimiques.
19. Ces données nous ont permis de corriger nos estimations. En définitive, pour les industries agroalimentaires et du papier nos résultats ne diffèrent que de 2 et 6 %

(respectivement) de ceux du Citepa. Pour la métallurgie des métaux non ferreux, la chimie et les matériaux non métalliques la différence est de l'ordre de 15 %.

20. En ce qui concerne la métallurgie des métaux non métalliques, il est difficile de différencier les émissions de combustions des émissions de procédés. Cela apparaît très clairement en analysant l'historique des révisions du Citepa : dans les données de 2018 révisées en 2020, le Citepa comptait pour la combustion 13 922 ktonnes de CO₂eq, lors de la révision de 2023 ce montant a été diminué à 6 057 ktonnes de CO₂eq.
21. Comme précédemment évoqué, l'EACEI ne porte pas sur les établissements de moins de 20 employés tandis que le Citepa, lui, les prend en compte dans ses chiffres. Nous attribuons donc la différence d'émissions entre nos calculs et ceux du Citepa aux établissements de moins de 20 employés. Cela représente 6 762 ktonnes de CO₂ eq (hors électricité). Malheureusement, les émissions des différentes catégories d'entreprise sont méconnues pour ces petits établissements (soit 14 % des émissions de combustion). Ainsi, les émissions sont distribuées au prorata du nombre d'employés dans ces établissements, soit 2,9 % pour les GE, 8,5 % pour les ETI et 88,6 % pour les PME et MIC.

Annexe 1 - Les émissions industrielles dans le monde et en Europe

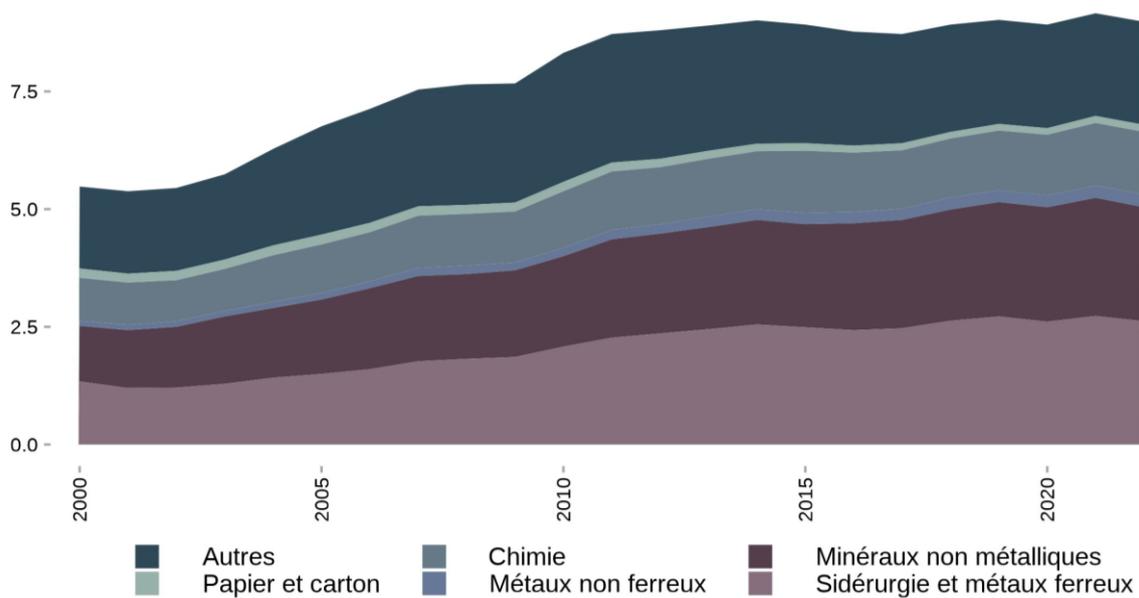
1. Les émissions françaises diminuent de 25 % sur la période 1990 – 2022. De plus, la France se caractérise par un mix énergétique relativement vertueux, où le gaz et le nucléaire se sont déjà très largement substitués aux énergies fossiles les plus émissives (charbon et pétrole).
2. Comme le détaille le rapport, 50 % de cet effort de réduction des émissions est imputable à l'industrie manufacturière, dont 25 % au seul sous-secteur industriel de la chimie.
3. L'objet de cette annexe est de compléter les Figures 4 et 5 du rapport en considérant deux dimensions supplémentaires :
 - Une approche multiscalaire qui s'attache à présenter les émissions industrielles de GES et les consommations énergétiques à la fois européenne et mondiale,
 - Une mise en perspective des ordres de grandeur, qui permet de mieux appréhender la place de la France dans les émissions mondiale et européenne.

Les émissions industrielles dans le monde

A. Répartition des émissions par sous-secteur industriel

4. La **Figure 1** présentée ci-dessous donne la répartition des émissions de l'industrie mondiale par sous-secteur industriel. Les émissions sont données en valeur absolue, et l'unité utilisée est le Gt CO₂, et non en Mt CO₂ (qui est l'unité utilisée dans l'intégralité du rapport et des annexes). En effet, en 2020, les émissions de CO₂ réalisées sur le sol français ne représentent que 0,9 % des émissions mondiales. Un facteur 100 est donc de mise pour passer à l'échelle mondiale, rendant les gigatonnes plus pertinentes pour cette analyse.

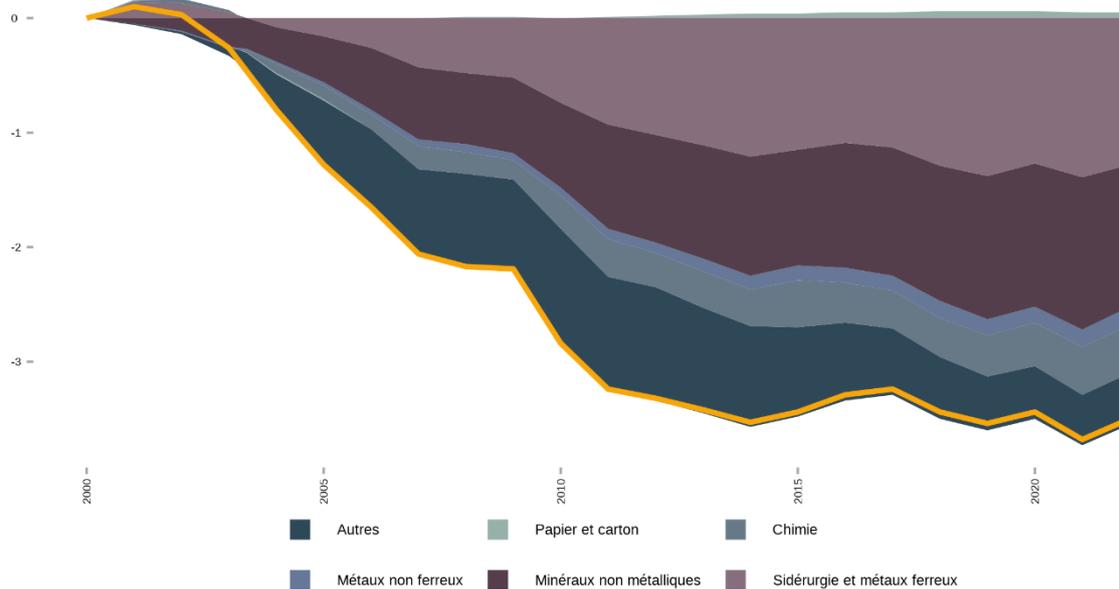
Figure 1 : Émissions de GES de l'industrie mondiale (en Gt CO₂)



Source : IEA, etilab

5. Le graphe ci-dessus met en évidence une forte augmentation des émissions de l'industrie mondiale entre 2000 et 2022, d'un peu plus de 5 Gt CO₂ à près de 9 Gt CO₂, soit une croissance de 80%. Si le rythme de cette augmentation tend à décroître, il n'en résulte pas moins que le monde n'a pas encore dépassé son pic d'émissions.
6. La **Figure 2** est une autre représentation de ce phénomène : le seul sous-secteur ayant entamé une réduction de ses émissions à l'échelle mondiale est l'industrie du papier et du carton.
7. Il est également intéressant de constater qu'après une très légère réduction dans la première moitié de la décennie 2000, les émissions liées à la sidérurgie et à la chimie reprennent leur hausse entre 2005 et 2014 (date à laquelle elles se stabilisent voire décroissent légèrement, selon les années). On peut imputer ce retournement de l'année 2005 à un effet ciseau lié d'une part à la fin du cycle d'élimination du protoxyde d'azote dans la chimie française et européenne, et d'autre part à l'entrée dans une phase d'industrialisation spectaculaire d'une grande partie du monde en développement (BRICS en tête, suivis par d'autres pays en voie d'émergence à la fin de la décennie 2000).

Figure 2 : Abattement par sous-secteur industriel (monde, en Gt CO2)

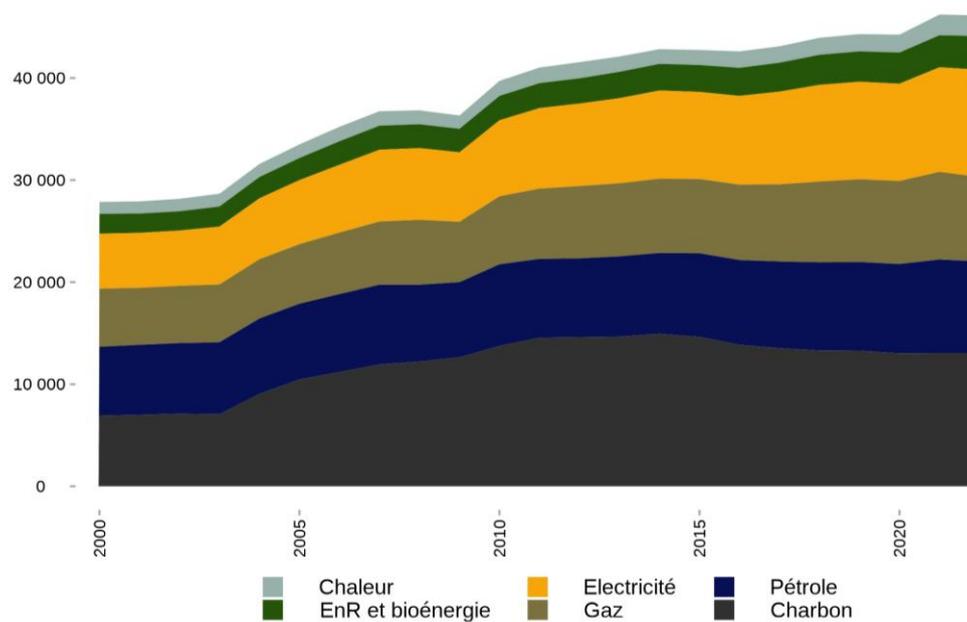


Source : IEA, etilab

B. Mix énergétique de l'industrie mondiale

8. Les émissions totales dépendent des quantités produites et, également, des technologies utilisées ainsi que des énergies mobilisées. La **Figure 3** ci-dessous présente l'évolution de la consommation énergétique de l'industrie mondiale.

Figure 3 : Consommation énergétique de l'industrie mondiale (en TWh)



Source : IEA, etilab

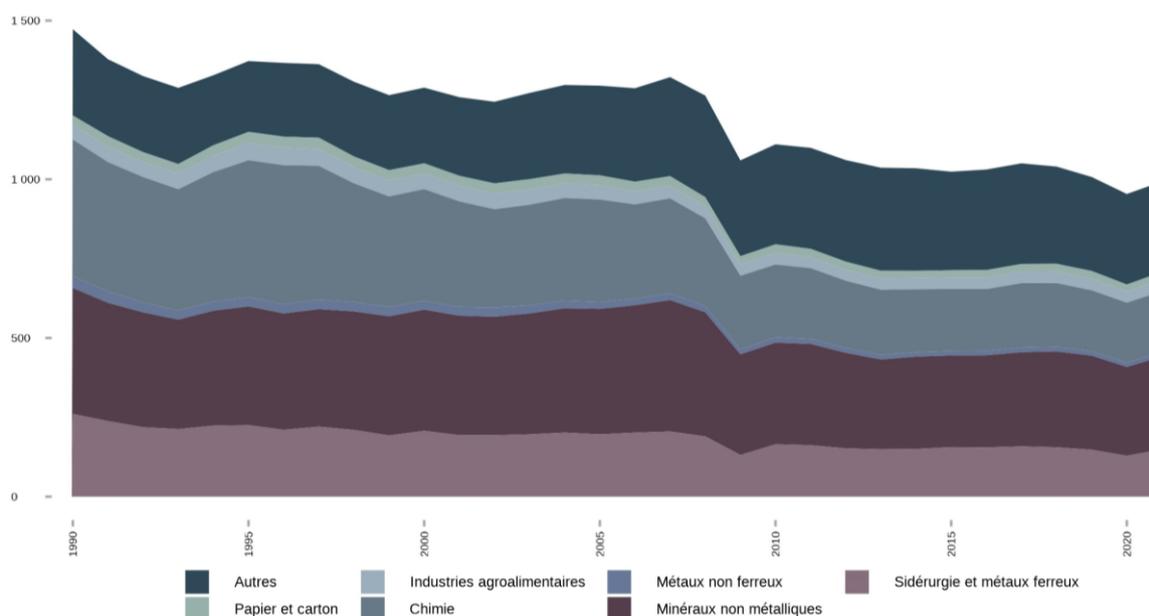
9. La tendance observée sur le graphique ci-dessus est tout à fait analogue à celle mesurée précédemment pour les émissions de GES de l'industrie mondiale. La demande énergétique industrielle est en croissance extrêmement forte sur les 20 années écoulées, de près de 28 000 TWh en 2000 à presque 43 000 TWh en 2022.
10. Par ailleurs, les énergies moins carbonées ne se substituent pas encore aux énergies les plus émissives : de 49% en début de période, le pétrole et le charbon représentent toujours 48% de l'approvisionnement énergétique en 2022, avec un maximum à 55% en 2009. À voir si la tendance baissière de cette proportion, amorcée depuis 2010, parvient à s'accélérer significativement dans la décennie à venir.
11. Outre des ordres de grandeur incomparables, la différence de mix énergétique avec la France est tout à fait saisissante. Alors que cette dernière repose, grossièrement, à 40 % sur l'électricité et 40 % sur le gaz, les énergies fossiles les plus émissives (charbon et pétrole) couvrent presque 50 % de la demande énergétique mondiale.

Les émissions industrielles en Europe

A. Répartition des émissions par sous-secteur industriel

12. Les émissions de l'industrie européenne se caractérisent, à l'instar des émissions industrielles françaises, par une plus forte prévalence de l'industrie chimique (par rapport aux émissions mondiales). C'est du moins ce que l'on pouvait dire jusqu'aux années 2010.
13. La place importante de la chimie en Europe, et en particulier en France, s'explique par une avance historique dans ce secteur-clef de la deuxième révolution industrielle, avance aujourd'hui difficilement répliquable par ses concurrents.
14. Du point de vue purement comptable, l'Europe a diminué ses émissions industrielles de près d'un tiers depuis 1990, comme le montre la **Figure 4**, et compte aujourd'hui pour 11 % à 12 % des émissions industrielles mondiales.

Figure 4 : Émissions de GES de l'industrie européenne (en Mt CO₂eq)

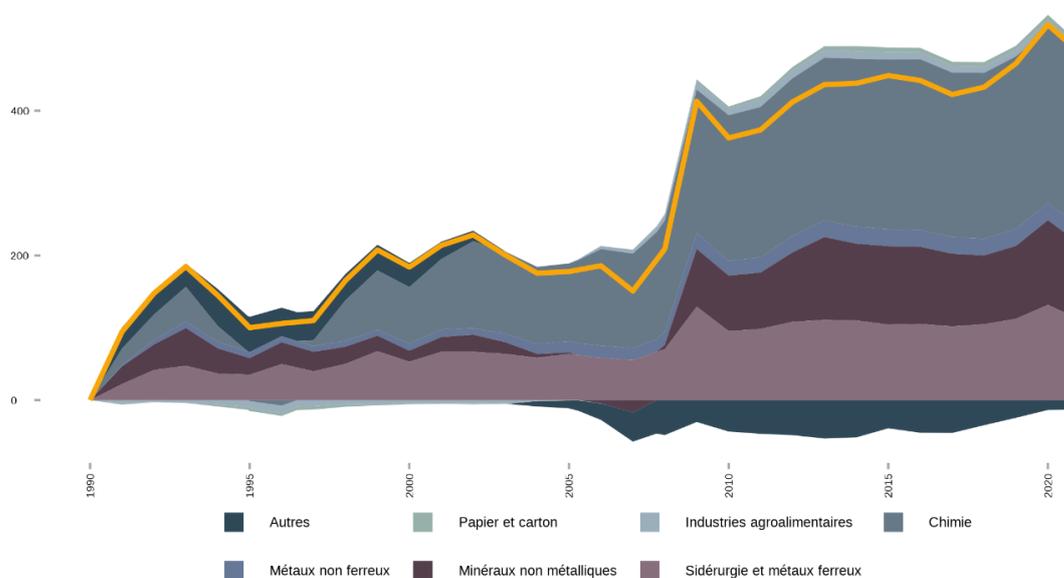


Source : EEA, etilab

15. La **Figure 5** ci-après permet de répartir plus spécifiquement cette baisse entre les 7 sous-secteurs industriels retenus dans le champ de cette étude. Phénomène déjà identifié au sein de l'industrie française, l'effort de réduction consenti par l'industrie chimique en éliminant progressivement le protoxyde d'azote est également responsable de 50 % de la baisse des émissions européennes.
16. De manière importante, la catégorie « autres »² semble ne pas s'être engagée dans la décarbonation de ses activités. En fin de période, les 6 secteurs que nous avons isolés participent, à des degrés divers, à la baisse des émissions industrielles en Europe. Ce n'est pas le cas des autres secteurs (en tous cas, regroupés de cette manière), qui ont séparément un poids moindre dans l'économie et sont probablement encadrés de façon moins étroite.

² La catégorie « Autres » regroupe essentiellement la construction, l'industrie électronique, l'utilisation de produits de substitution aux ODS (*ozone depleting substances*) ainsi que tous les biens manufacturiers produits n'entrant pas dans les catégories énumérées précédemment (cf. section C de la nomenclature d'activités française NAF rév. 2).

Figure 5 : Abatement par sous-secteur industriel (Europe, en Mt CO2eq)

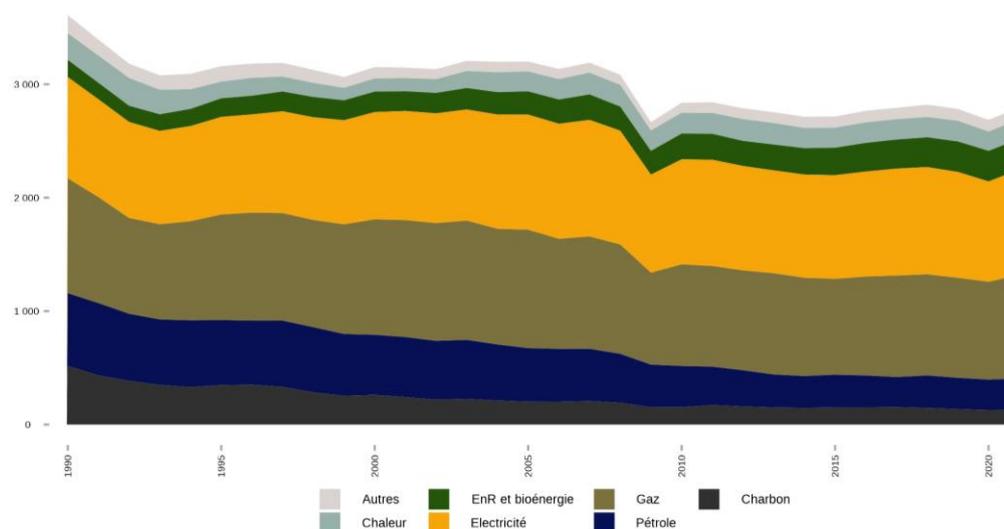


Source : EEA, etilab

B. Mix énergétique de l'industrie européenne

17. La **Figure 6** met en évidence un « effet mix » énergétique de la diminution des émissions européennes. Comme en France, la demande énergétique en Europe s'appuie essentiellement sur le gaz et l'électricité (environ 1 000 TWh chacun, sur une consommation totale de 3 000 TWh). Le pétrole et le charbon ne sont donc plus utilisés qu'à la marge (environ 15 % de la consommation industrielle), ce qui explique une intensité des émissions par unité de production plus faible en Europe (et en France) qu'ailleurs dans le monde.

Figure 6 : Consommation énergétique de l'industrie européenne (en TWh)



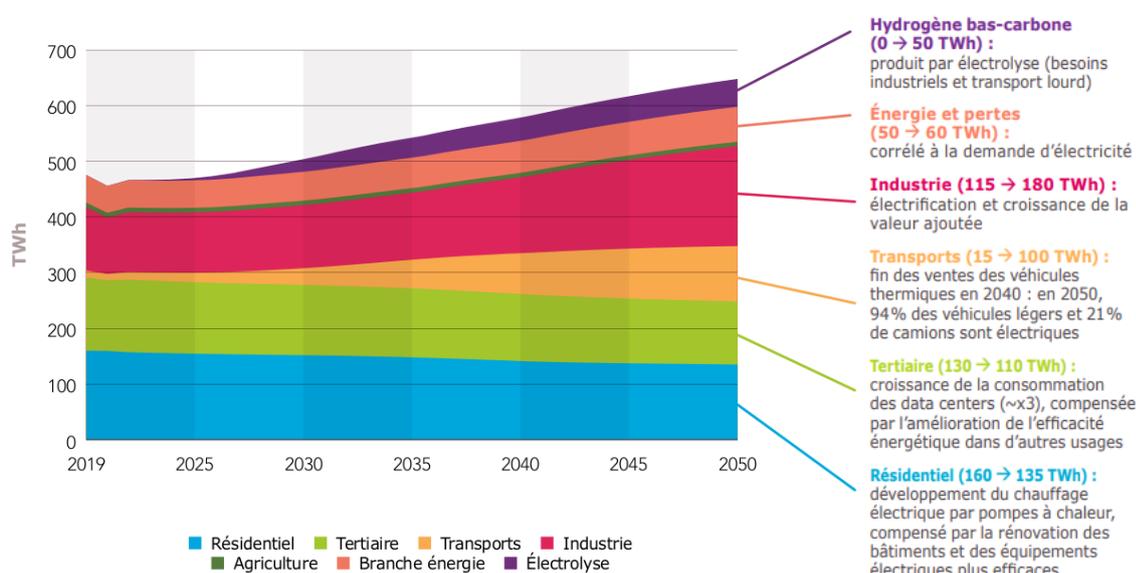
Source : Eurostat, etilab

Annexe 2 - Mix électrique

Une consommation tirée par l'électrification des usages et la réindustrialisation

1. En 2019, la France a consommé 473 TWh d'électricité dont 45 % pour les entreprises et professionnels et 15 % pour la grande industrie (entreprises fournies directement par le gestionnaire de Réseau et Transport d'Électricité - RTE). Les projections de RTE et du gouvernement (rapport Futurs Énergétiques 2050 et scénario AMS de la Stratégie Nationale Bas Carbone 2) prévoient une augmentation de la consommation d'électricité de 475 TWh à 685 TWh en 2050 (+35 %), tirée par l'électrification des transports et de l'industrie au premier ordre et par la réindustrialisation et la production d'hydrogène au second.

Figure 1 : Évolution et prévisions de la consommation d'électricité en France



Source : Futurs Énergétiques 2050, RTE (2021)

Une confirmation de l'importance du nucléaire dans le mix électrique et une montée en puissance des renouvelables

2. En 2019, la France a produit 537 TWh d'électricité dont 70 % d'origine nucléaire, 10 % d'origine hydraulique et 8 % d'origine renouvelable (solaire et éolien terrestre).

3. La stratégie du pays doit être actualisée : les principaux textes de programmation, Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE), Loi de Programmation Énergie Climat (LPEC) et Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) datent de 2019 - 2020 et sont antérieurs aux récentes crises qui obligent la France à repenser sa stratégie (Covid - 19, tension sur l'approvisionnement énergétique en Europe suite au conflit en Ukraine et aux déboires industriels d'EDF).

A. Nouvelles constructions et allongement de la durée de vie des anciennes centrales nucléaires

4. Le parc nucléaire français assure 70 % de la production électrique. Composé de 56 réacteurs mis en service majoritairement entre 1975 et 1990, il cumule 60 GWe de puissance. Ce parc fait actuellement face à deux enjeux : d'une part la résolution des récents problèmes industriels d'EDF et d'autre part l'anticipation de l'arrêt des réacteurs existants et de la transition vers les moyens de production futurs, quels qu'ils soient. En effet, les mises en service rapprochées des réacteurs dans les années 1980 entraînent une série de mise à l'arrêt appelée « effet falaise » qui doit être anticipée pour ne pas mettre en difficulté l'approvisionnement électrique français.
5. Les annonces politiques suivant le discours de Belfort en 2022 laissent penser que la stratégie suivie par le gouvernement est proche du scénario N03 du rapport Futurs Énergétiques 2050 de RTE. L'objectif de réduction à 50 % de la production d'origine nucléaire a été abandonné et un programme de construction de nouveaux réacteurs EPR2 engagé (six entre 2035 et 2045 plus huit probables entre 2045 et 2065 et éventuellement davantage). À l'horizon 2030, le parc nucléaire devrait peu évoluer. En 2050 dans le scénario N03, le parc nucléaire est composé de 24 GWe d'ancien nucléaire et de 28 GWe d'EPR2, les petits réacteurs restant confinés à des usages marginaux.
6. Outre la construction de nouveaux réacteurs, la stratégie pour maintenir la production nucléaire à niveau repose également sur la prolongation de la durée de vie des réacteurs existants à 50 voire 60 ans. La France n'est pas la seule à étudier cette prolongation, actuellement en discussion entre EDF et l'autorité de sûreté : les États-Unis ont récemment étendu la durée de vie d'une de leurs centrales à 80 ans. Le nucléaire devra de plus s'adapter au climat futur : la baisse de la ressource hydrique dans un climat plus chaud peut entraîner une baisse de production des centrales en bord de rivière pour garantir leur refroidissement.

B. Montée en puissance du renouvelable

7. Le gouvernement ambitionne une forte montée en puissance de la production d'électricité d'origine solaire et éolienne. En 2022, il est toutefois en retard sur ses objectifs d'installation de capacité.

Tableau 1 : Objectifs et réalisation, puissance renouvelable

EnR (GWc)	Réalisé 2023	Objectif 2023	Objectif 2030	Objectif 2050	Scénario RTE N03 - 2050
Solaire	18.1 (1)	19 (2)	35 à 48 (2)	>100 (2)	70
Éolien terrestre	23.4 (1)	24.6 (3)	34.1 à 35.6 (3)	43 à 72 (4)	43
Éolien en mer	0 (1)	2.4 (5)	5 (5)	40 à 59 (6)	22

Sources : (1) www.data.gouv.fr; Nombre d'installations EnR sur un territoire, (2) www.gouvernement.fr; Multiplier la puissance photovoltaïque par dix d'ici 2050, (3) Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2019 – 2023, (4) Discours de Barbara Pompili du 26/10/2021, (5) www.ecologie.gouv.fr; Éolien en mer, (6) www.eoliennesenmer.fr. Ces chiffres sont à prendre avec précaution, car ne sont pas issus des textes de programmation qui sont en attente d'actualisation.

- Ces objectifs semblent ambitieux et des prévisions plus prudentes se limiteraient au scénario N03. Le déploiement massif des énergies renouvelables pose en outre plusieurs défis.

Les défis industriels

- Le déploiement des renouvelables est une opportunité pour l'industrie française (la durée de vie d'une éolienne ou d'un panneau photovoltaïque, de l'ordre du quart de siècle, assure une demande conséquente sur le long terme, tirée par le renouvellement des capacités). Les ETI auront leur rôle à jouer dans la création de champions du solaire et de l'éolien ou dans l'indispensable tissu de fournisseurs de ces filières. L'avance et la domination chinoise semblent toutefois difficiles à remettre en cause dans le photovoltaïque sans rupture technologique majeure.

Le défi de la gestion de l'intermittence

- La production d'électricité issue des sources d'énergies renouvelables varie à l'échelle de la saison, de la semaine ou du jour : on parle d'intermittence des énergies renouvelables. Cela pose de nouveaux défis au système électrique. En l'absence de vent et de soleil (p. ex. la nuit, l'hiver), les renouvelables produisent peu malgré le volume de capacité installé. A contrario, en conditions météorologiques optimales, ces importantes capacités vont entraîner la production d'un surplus d'électricité. Ce surplus devra être stocké pour répondre à la consommation ultérieure et la demande devra s'adapter pour compenser ces variations de production. Les capacités de stockage hydrauliques (STEP, réduction potentielle avec la baisse de la ressource hydrique) sont limitées à une dizaine de TWh. Le stockage par batterie ou hydrogène n'est pas encore assez mature et reste limité (quelques dizaines de TWh). Les habitudes des consommateurs, entreprises comme ménages, devront donc s'adapter et être plus flexibles dans un mix fortement renouvelable. Le déploiement de capacités de pointe pour couvrir la demande (centrales à gaz ou à charbon) permet aussi de pallier l'intermittence, mais cette solution est davantage émettrice de gaz à effet de serre.
- Les interconnexions devront être renforcées avec les pays européens. La France est historiquement un important exportateur d'électricité (une cinquantaine de TWh par an)

à destination de l'Italie, de l'Espagne, de la Suisse, du Royaume-Uni, de la Belgique et de l'Allemagne. Cette situation doit être nuancée avec des importations en hiver, notamment d'Allemagne, pour combler une augmentation de la consommation liée à la baisse des températures.

Tarification de l'électricité

12. Le marché de l'électricité en Europe repose sur la tarification au coût marginal : les capacités de production sont appelées par mérite de coût et le prix spot de production (hors transport) est fixé par le coût marginal de la dernière centrale appelée (souvent une centrale à gaz, mais pas systématiquement). Cet équilibre assure le coût de production le plus bas possible, une utilisation optimale du parc de production européen ainsi qu'un niveau de revenus suffisant pour le maintenir.
13. Un mécanisme de capacité permet de compléter la tarification au coût marginal. En effet, cette dernière ne garantit pas l'équilibre offre et demande. Un second mécanisme est donc nécessaire pour assurer la rentabilité des moyens de pointe ou rémunérer les consommateurs qui participent à la flexibilité, c'est-à-dire de gros consommateurs, souvent dans l'industrie lourde, qui acceptent d'effacer leur consommation pendant la pointe contre rémunération.
14. La stratégie de financement du renouvellement et de la modernisation des outils de production est actuellement en discussion entre l'Union Européenne et le gouvernement. La tarification marginale ne permet en effet actuellement pas de faire face aux investissements colossaux nécessaires à l'émergence d'une filière éolienne, renouvelable ou des programmes de grand carénage ou de nouveau nucléaire d'EDF. Les CFD³ semblent actuellement la solution privilégiée pour financer ces nouveaux programmes. En outre, les industriels électro intensifs sont incités à conclure des contrats bilatéraux avec les producteurs.
15. La France maintient un tarif réglementé de l'électricité (TRVE), dont le coût de production représente 48 %, le coût de transport et de distribution 31 % et les taxes 21 %⁴. L'ARENH (Accès Régulé à l'Électricité Nucléaire Historique) disparaîtra en 2025 et sera remplacé par un prix cible d'environ 70 €/MWh avec un plafond de 78 €/MWh au-delà duquel l'État capte progressivement les bénéfices d'EDF et les reverse aux consommateurs. Cette mesure permettra à EDF de financer les nécessaires nouvelles constructions sur fonds propres.

³ Contract for Difference : le producteur vend son électricité sur le marché, le gouvernement capte les recettes et redistribue un prix fixe convenu à l'avance permettant au producteur d'assurer sa rentabilité.

⁴ Chiffres de 2022.

Annexe 3 - Empreinte, émissions et scopes

Définitions

A. BEGES

1. Un Bilan des Émissions des Gaz à Effets de Serre (BEGES)⁵, souvent appelé Bilan Carbone, a pour objectif de mesurer la quantité de gaz à effet de serre émise ou captée dans l'atmosphère sur une année. Les émissions de l'entreprise/collectivité sont réparties entre plusieurs « postes ». Cette classification permet de déterminer les postes d'émissions où la contrainte carbone⁶ est la plus forte et de mettre en place un plan d'action énergétique et environnemental ciblé sur ces postes afin de réduire les émissions de l'entreprise/collectivité.
2. Six gaz à effet de serre sont suivis : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrofluorocarbures (HFC), l'hexafluorure de soufre (SF₆) et les perfluorocarbones (PFC). Les gaz émis dépendent de l'activité économique. Par convention, toutes les émissions sont traduites en « tonnes équivalent CO₂ », ce qui donne son sens à l'expression « bilan carbone ».
3. La production d'un bien ou d'un service génère des émissions directes et indirectes réparties en trois « scopes »⁷. Ces scopes désignent le périmètre au sein duquel sont examinés les GES :
 - Scope 1 – Émissions directes. Il s'agit des émissions directes engendrées par les activités contrôlées par l'entreprise/collectivité comme par exemple la combustion des énergies fossiles (le charbon brûlé pour chauffer un four...), les procédés de fabrication (le dioxyde de carbone dégagé lors de la réaction chimique...), émissions des ruminants, fuites de fluides frigorigènes, biomasses, biogaz des centres d'enfouissement techniques...
 - Scope 2 – Émissions indirectes. Il s'agit des émissions indirectes liées aux consommations énergétiques nécessaires à la fabrication d'un produit. La création d'un produit nécessite souvent l'emploi d'électricité, de chaleur et de froid. La production de ces énergies engendre des émissions qui sont comptabilisées dans le scope 2.

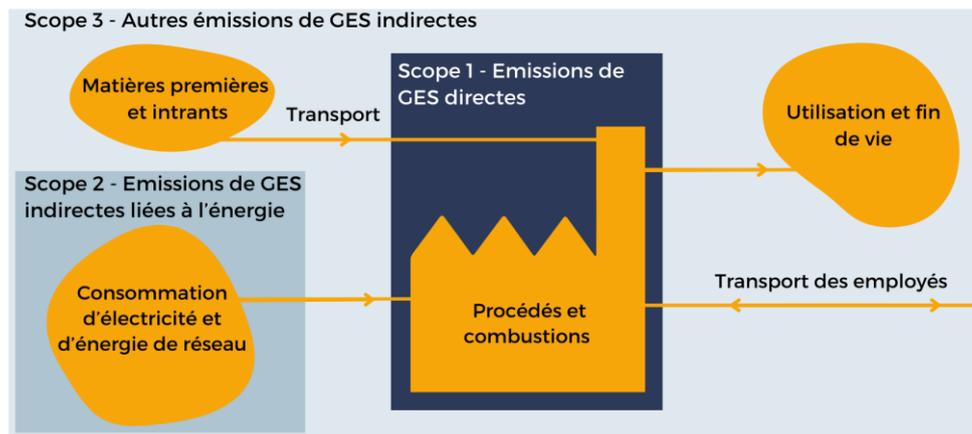
⁵ <https://www.territoires-climat.ademe.fr/ressource/118-40>

⁶ La contrainte carbone est un concept qui découle du Protocole de Kyoto où les parties contractantes des pays développés se sont engagées à réduire leurs émissions totales de gaz à effet de serre d'au moins 5 % par rapport au niveau 1990, au cours de la période 2008-2012. <https://www.un.org/french/millenaire/law/23.htm#:~:text=Le Protocole de Kyoto a,anthropogéniquesdangereuses pour le système>

⁷ Il convient de noter qu'un quatrième scope dédié aux émissions évitées peut également être considéré. Ce scope comptabilise l'ensemble des économies d'émissions permises par les actions d'une entreprise qui propose, par exemple, à ses clients, un substitut moins émetteur.

- Scope 3 – Autres émissions indirectes. Il s’agit des émissions indirectes qui ne sont pas directement liées à la fabrication du produit comme l’approvisionnement, le transport (dont le transport des employés), utilisation et fin de vie des produits et services vendus...

Figure 1 : Les scopes d’émissions



Source : etilab

B. Exemple du transport des employés

4. Face à la difficulté de mesurer les émissions de scope 3 décrites dans le corps du rapport, les entreprises concentrent leurs efforts sur les émissions de transports qui sont les moins complexes à mesurer et à contrôler.
5. Nous proposons ici une estimation des émissions dues aux transports des employés de l’industrie manufacturière. Les distances qui séparent les travailleurs de leur établissement à vol d’oiseau sont multipliées par un facteur d’allongement de 1,2⁸.
6. Suivant la méthodologie de l’Insee,⁹ nous ne prenons pas en compte les trajets de plus de 150 km.
7. Les distances moyennes ainsi calculées sont présentées dans le tableau suivant. Nous constatons que ces moyennes ne diffèrent pas significativement selon la catégorie d’entreprise.

⁸ Ce facteur est celui traditionnellement utilisé dans la littérature spécialisée. (<https://www.cairn.info/revue-flux1-2009-2-page-110.htm>).

⁹ Méthodologie décrite ici : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/7622203>

Tableau 1 : Distance moyenne des employés selon la catégorie d'entreprise

Catégorie d'entreprise	Distance moyenne en km
GE	15,6
ETI	14,8
PME	14
MICRO	14,4

Source : Fare, DADS

8. Pour connaître les émissions induites par ces trajets, nous multiplions ces distances par un facteur d'émission. En 2021, une voiture française (moyenne du parc existant) émet 158 gCO₂ par km)¹⁰. Or, comme le montre l'Insee¹¹, tous les employés n'utilisent pas une voiture pour se rendre sur leurs lieux de travail. Un facteur d'émission de 138 gCO₂ par km parcouru a donc été retenu.
9. En restreignant l'analyse aux seuls établissements de 20 employés,¹² nous couvrons 80 % des trajets qui correspondent à un niveau d'émissions de 1,71 Mt CO₂.

C. Qu'est-ce que l'empreinte carbone ?

10. Le concept d'empreinte carbone, selon l'INSEE¹³, comptabilise les gaz à effet de serre (GES) associés à la consommation (demande finale intérieure) d'un pays, que ces biens ou services soient produits sur le territoire national ou importés. Soit :
11. Les gaz à effet de serre émis par les ménages, principalement la combustion de carburants pour le transport et d'énergies fossiles pour le chauffage des logements ;
12. Les gaz à effet de serre issus de la production intérieure de biens et de services destinée à la demande intérieure (hors exportations) ;
13. Les gaz à effet de serre émis par les produits et services importés, pour usage final des ménages ou pour les consommations intermédiaires des entreprises.

¹⁰ Voir, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/quels-freins-la-baisse-des-emissions-de-gaz-effet-de-serre-du-parc-automobile?rubrique=58&dossier=1348>

¹¹ Voir, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5013868>

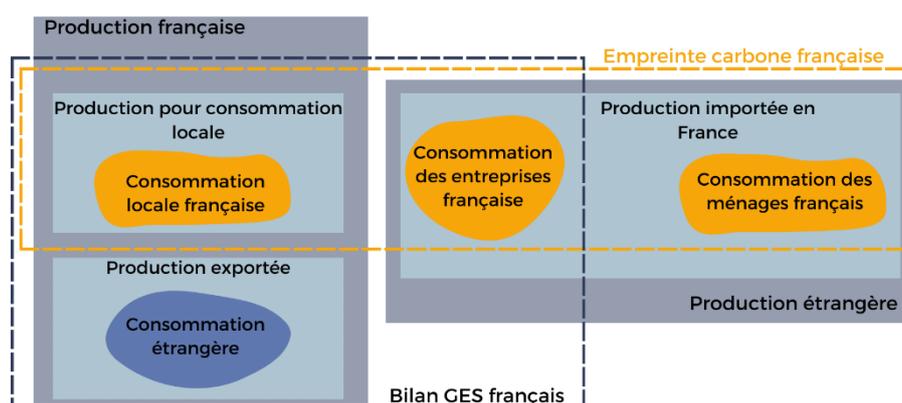
¹² Périmètre de l'EACEI.

¹³ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2132>

BEGES vs Empreinte : Quelles différences ?

14. L'empreinte carbone se distingue de la méthode utilisée pour le Bilan des Émissions de Gaz à Effet de Serre (BEGES). Alors que le BEGES se concentre sur les émissions nationales (approche de production), l'empreinte carbone tient compte de toutes les émissions associées à la consommation en France, qu'elles proviennent de produits fabriqués en France ou à l'étranger. Par conséquent, l'empreinte carbone englobe à la fois les émissions nationales, provenant des produits fabriqués et consommés en France (à l'exclusion de la production destinée à l'exportation), et les émissions étrangères, issues des produits fabriqués à l'étranger et importés en France.
15. En 2018, les émissions totales de gaz à effet de serre en France, selon la méthode du BEGES, étaient de 445 Mt CO_{2e}, couvrant la Métropole et les territoires d'Outre-mer inclus dans l'UE, à l'exception des gaz fluorés. En contraste, l'empreinte carbone des citoyens français pour la même année s'élevait à 749 Mt CO_{2eq}¹⁴. Cette importante différence est en grande partie due au fait que les émissions importées sont nettement supérieures aux émissions exportées (émissions issues de la production exportée comptabilisées dans l'approche inventaire). Les émissions importées représentent 57 % de l'empreinte carbone en 2018¹⁵.
16. Les approches du BEGES et de l'empreinte se complètent. La totalité des BEGES nationaux correspond à l'empreinte mondiale, à laquelle sont ajoutées les émissions de gaz à effet de serre des secteurs du transport maritime et aérien international, qui ne sont pas incluses dans les inventaires nationaux.

Figure 2 : Bilan carbone et empreinte carbone



Source : etilab

¹⁴ https://www.citepa.org/fr/2020_01_a09/

¹⁵ https://www.citepa.org/fr/2020_01_a09/

Quelle méthode est utilisée pour l’empreinte carbone ?

A. Général

17. Deux approches principales sont utilisées pour calculer l'empreinte carbone de la consommation d'une population¹⁶ :
18. L’approche microéconomique basée sur des données détaillées sur la consommation des ménages et des facteurs d’émissions,
19. L’approche macroéconomique (calcul input/output) qui repose sur des données macroéconomiques, notamment les tableaux entrées-sorties de la comptabilité nationale, couplés à des comptes physiques environnementaux.
20. Le SDES (Service des données et études statistiques) a opté pour une approche macroéconomique pour calculer l'empreinte carbone de la demande finale intérieure en France. Cette méthode cherche à estimer la quantité de gaz à effet de serre associée à chaque euro dépensé dans différentes catégories de produits (biens et services) identifiées par la comptabilité nationale. Les émissions de gaz à effet de serre par produit sont ensuite multipliées par la valeur (en euros) des produits demandés en France.

B. France

21. Le SDES utilise deux approches distinctes pour évaluer l'empreinte carbone de la France :
22. Une méthode détaillée couvrant les années de 1995 jusqu'à l'année A+4, principalement basée sur l'analyse des Tableaux Entrées Sorties (TES) de la France et de l'Union européenne.
23. Une approche qualifiée d'"estimations provisoires" en raison de l'indisponibilité des TES pour les années plus récentes.

C. Révisions méthodologiques

24. En octobre 2020, le Haut Conseil pour le Climat (HCC) a examiné les méthodologies de calcul de l'empreinte carbone en France¹⁷. Les résultats agrégés de ces empreintes étaient relativement similaires entre les différents producteurs d'estimations, mais des divergences plus significatives sont observées lorsqu'on s'intéresse aux détails des résultats, notamment en ce qui concerne les émissions de méthane (CH₄). Pour améliorer le calcul de l'empreinte carbone, l'idée d'utiliser un tableau entrées-sorties multi-régional (MRIO) a été étudiée.
25. De plus, une révision de la méthode d'estimation des émissions importées provenant des industries extractives a été entreprise. Ces industries émettent du CO₂ et du CH₄

¹⁶ https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-10/m%C3%A9thodologie_empreinte_carbone_octobre2021_0.pdf

¹⁷ https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-10/notice_methodologique_revision_empreinte.pdf

principalement en raison de la consommation d'énergie, du torchage et des émissions fugitives. La méthode précédente n'était pas efficace pour corriger la forte volatilité des prix de ces produits, en particulier du CH₄. La nouvelle méthode repose sur des analyses du cycle de vie (y compris la base carbone de l'Ademe) et tient compte des effets des variations des prix liés à la volatilité des cours du brut.

26. Cette révision de méthode a entraîné une réduction significative des émissions importées des activités extractives, rendant la série chronologique de l'empreinte carbone plus cohérente avec les importations physiques de ces produits. Cela a abouti à une baisse notable de l'empreinte carbone pour la période 1995-2019, principalement en ce qui concerne les émissions de CH₄. En 2017, l'empreinte carbone a diminué de 6,2%, passant de 675 à 633 millions de tonnes d'équivalent CO₂. Les différences entre les estimations de 2020 et 2021 sont principalement attribuables à la révision des émissions liées aux importations de produits des activités extractives, ainsi qu'à la mise à jour annuelle des sources de données utilisées dans le calcul.

D. Méthode d'estimation des émissions importées

27. Pour déterminer les émissions importées, le SDES répartit les importations en fonction de leur valeur et par branches dans différentes zones géographiques. Cette répartition est basée sur les données fournies par le service des Douanes. Cependant, cette approche unilatérale ne tient pas compte des spécificités des importations des pays exportateurs. Pour chaque pays exportateur, le calcul est effectué en supposant que ses propres importations seraient produites dans des conditions similaires (en termes de structure productive et d'intensité des émissions par branche) à celles de son propre territoire.

Annexe 4 - Importations et exportations françaises

1. Cette annexe détaille les questions relatives au commerce extérieur.
2. Le rapport, par les Figures 9 et 30, examine les importations françaises sous divers aspects. Cette annexe examine également les exportations, fournissant ainsi une vue d'ensemble plus complète de la balance commerciale française. Nous proposons ici une analyse géographique et sectorielle détaillée, intégrant en outre l'intensité carbone des importations.

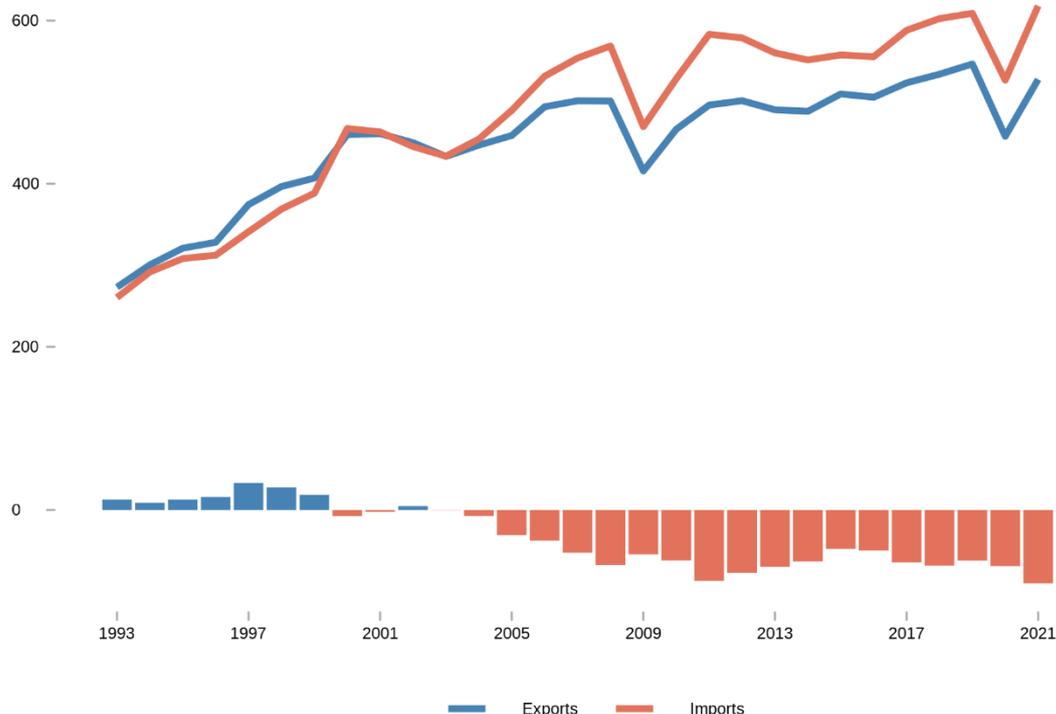
Méthodologie et Données

3. Les données proviennent majoritairement des statistiques douanières de commerce extérieur et concernent principalement les échanges de biens. Pour les agrégats par catégories de biens, pays et zones, les balances commerciales sont calculées CAB-FAB (Coût, Assurance, Fret - Franco A Bord) et FAB-FAB (Franco A Bord - Franco A Bord).
4. La méthode CAB-FAB inclut les coûts d'assurance et de fret dans le prix des importations, tandis que FAB-FAB compare les valeurs des exportations et importations sans ces coûts supplémentaires.
5. Dans le cadre de cette annexe et du rapport, la définition de l'espace économique européen est dynamique et inclut les entrées et les sorties de la zone sur la période 1993-2021.
6. Les valeurs monétaires sont exprimées en euros constants (base 2021), ajustant ainsi les valeurs antérieures à la hausse pour tenir compte de l'inflation.

Échanges commerciaux français

A. La balance commerciale française

Figure 1 : Balance commerciale française, 1993-2021, milliards d'euros, FAB-FAB



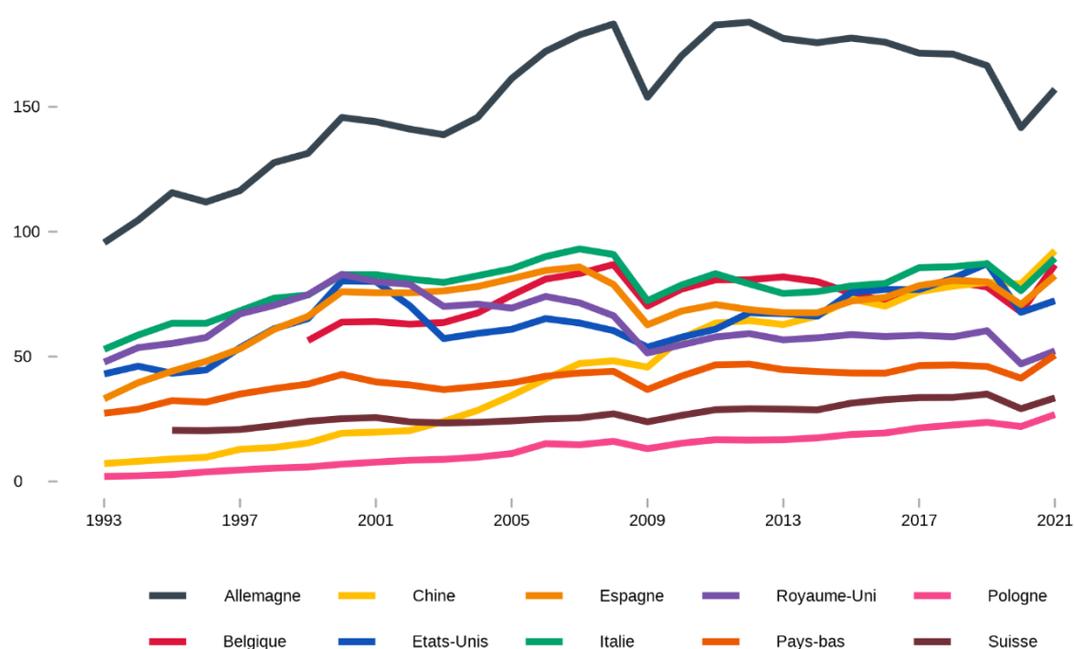
Source : INSEE

7. L'évolution du commerce extérieur français montre une tendance haussière des importations. Cette augmentation n'est pas accompagnée d'une hausse des exportations, résultant en un déficit commercial subi depuis le début des années 2000.
8. Pour appréhender pleinement les implications de cette balance commerciale déficitaire sur l'empreinte carbone de la France, il convient d'analyser la provenance des biens importés et l'intensité carbone de ces territoires. En outre, une étude plus détaillée des spécificités de la balance commerciale française peut offrir un éclairage plus précis sur les défis auxquels est confronté le commerce extérieur du pays.

B. Partenaires commerciaux

9. Sur la **Figure 2**, les 10 premiers partenaires commerciaux¹⁸ de la France sont représentés. En 2021, ce top 10 compte pour environ 66 % du commerce extérieur français. Certaines séries sont interrompues en raison de modifications des codes pays, par exemple, les données pour la Belgique ne sont disponibles qu'à partir de 1999, les échanges antérieurs avec la Belgique étant regroupés avec ceux du Luxembourg en raison de l'Union économique belgo-luxembourgeoise.

Figure 2 : Total des échanges, 10 premiers partenaires français, 1993-2021, milliards d'euros, CAF-FAB

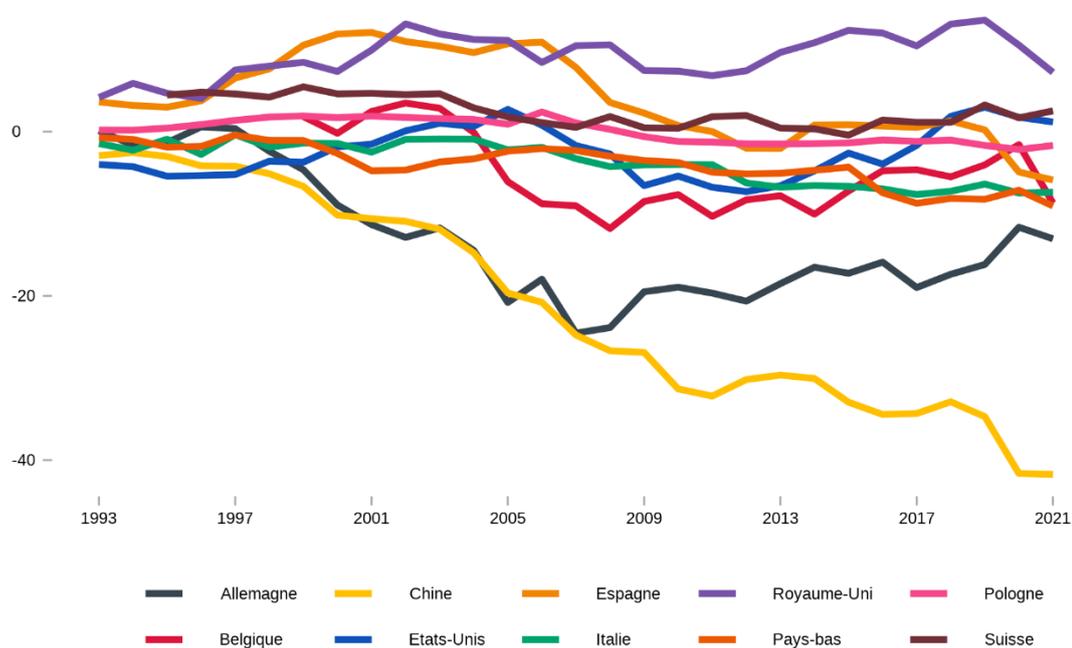


Source : etilab

10. L'Allemagne se maintient comme le premier partenaire commercial de la France, bien que le volume des échanges ait tendance à stagner, voire à diminuer depuis la crise de la dette souveraine en Europe. La **Figure 2** montre également une croissance rapide des échanges avec la République Populaire de Chine, celle-ci est devenue la deuxième plus grande partenaire commerciale de la France en 2020, avec 87 milliards d'euros d'échanges, ce qui est presque 13 fois plus qu'en 1993 et 1,9 fois plus qu'en 2008. Les échanges avec la Pologne ont également connu une très forte croissance, multipliée par 13,2 depuis 1993 et par 1,7 depuis 2008, bien que moins perceptible sur le graphique en raison d'un volume total plus faible.

¹⁸ Classés par le total des volumes échangés en euros.

Figure 3 : Balance commerciale française par partenaire, 1993-2021, milliards d'euros, CAF-FAB



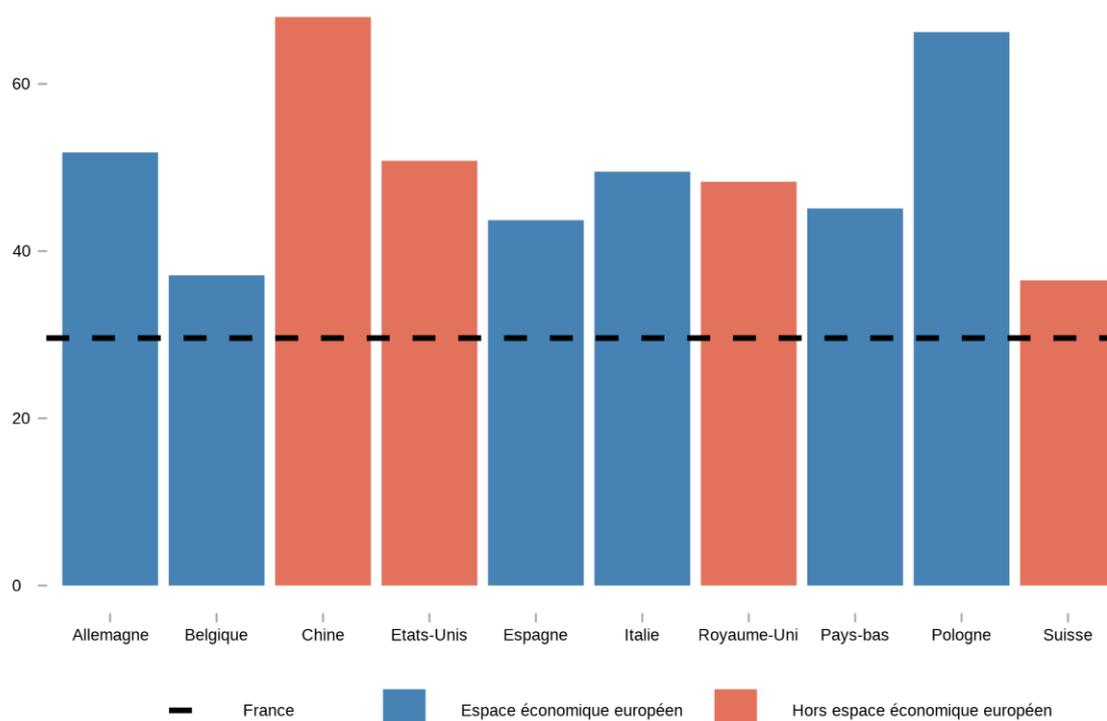
Source : etilab

11. La **Figure 3** montre l'évolution de la balance commerciale française par pays. L'augmentation des échanges avec la Chine a contribué à une détérioration significative de la balance commerciale française, la hausse des importations n'a pas été compensée par suffisamment d'exportations. Une situation similaire est observée avec l'Allemagne.

Commerce, empreinte carbone et désindustrialisation

A. Intensité carbone

Figure 4 : Intensité CO2 équivalent de l'énergie, combustion, 2021, tCO2/TJ



Source : AIE

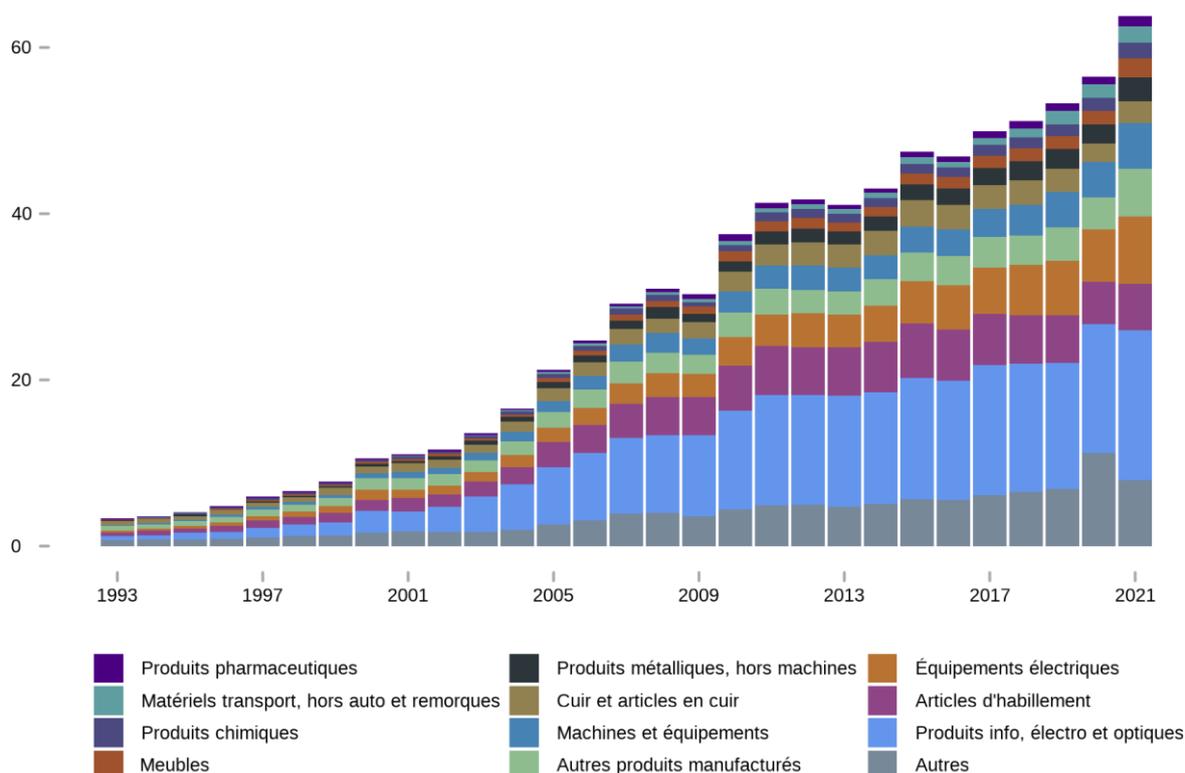
- La **Figure 4** expose l'intensité carbone du mix énergétique des dix principaux partenaires commerciaux de la France. Cette mesure de l'intensité carbone est calculée en évaluant le rapport entre la quantité totale d'émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O, et émissions fugitives de l'industrie) et l'énergie produite. En d'autres termes, elle indique le coût en émissions de gaz à effet de serre par unité d'énergie générée. Comme évoqué dans le rapport, le mix énergétique français se caractérise par une faible intensité carbone, avec une part importante de gaz et d'électricité, nucléaire pour une bonne partie. Tous les principaux partenaires commerciaux de la France affichent une intensité carbone supérieure à celle du mix énergétique français. L'énergie utilisée en Chine et en Pologne est presque 130 % plus émettrice en gaz à effet de serre que celle de la France, tandis que l'Allemagne, le principal partenaire commercial de la France, présente un mix énergétique avec une intensité carbone supérieure de 70 % à celle de la France.
- Ces données suggèrent que les évolutions récentes du commerce extérieur français pourraient contribuer à une augmentation de l'empreinte carbone nationale, étant donné que les importations proviennent de pays avec des mix énergétiques plus carbonés. Cependant, il convient de nuancer cette affirmation en considérant que certaines

importations peuvent appartenir à des secteurs à faible intensité énergétique, ce qui atténuerait potentiellement l'impact carbone global de ces échanges commerciaux.

B. Analyse sectorielle des importations

14. L'ensemble des **Figures 5, 6 et 7** présente la composition des importations venant d'Allemagne, de Chine et de Pologne.

Figure 5 : Importations depuis la Chine, 1993-2021, milliards d'euros

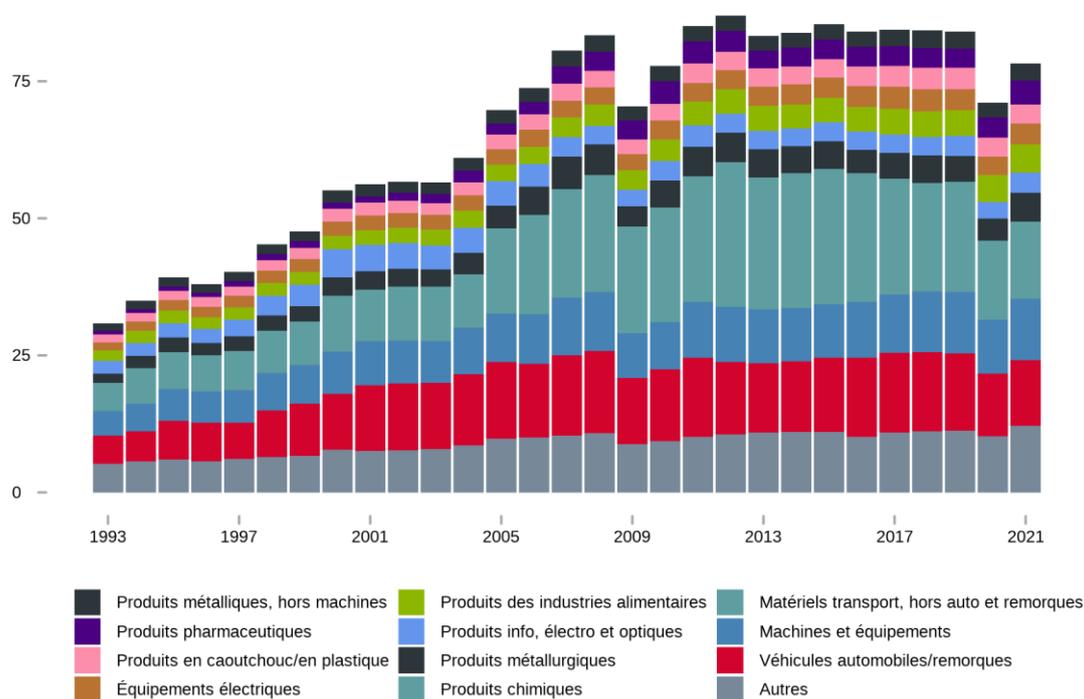


Source : etilab

15. La composition sectorielle des importations françaises depuis la République Populaire de Chine, détaillée dans la **Figure 5**, révèle l'importance de secteurs associés à l'industrie 'légère', moins intensive énergétiquement. En effet, pour l'année 2021, les secteurs des produits informatiques, électroniques et optiques, des équipements électriques, et des articles d'habillement représentent plus de 50 % du total des exportations chinoises vers la France.
16. Cependant, cette analyse sectorielle ne doit pas omettre de considérer les consommations intermédiaires nécessaires à la fabrication de ces produits. Lesdites industries 'légères' s'appuient sur une chaîne d'approvisionnement de composants souvent issus d'industries 'lourdes', caractérisées par une plus haute intensité carbone. De surcroît, l'économie chinoise est relativement autosuffisante sur ces consommations intermédiaires, les importations françaises de produits finis chinois impliquent indirectement l'intégration de biens issus de processus industriels à forte intensité énergétique. Par ailleurs, même si l'impact du transport est limité sur l'intensité carbone

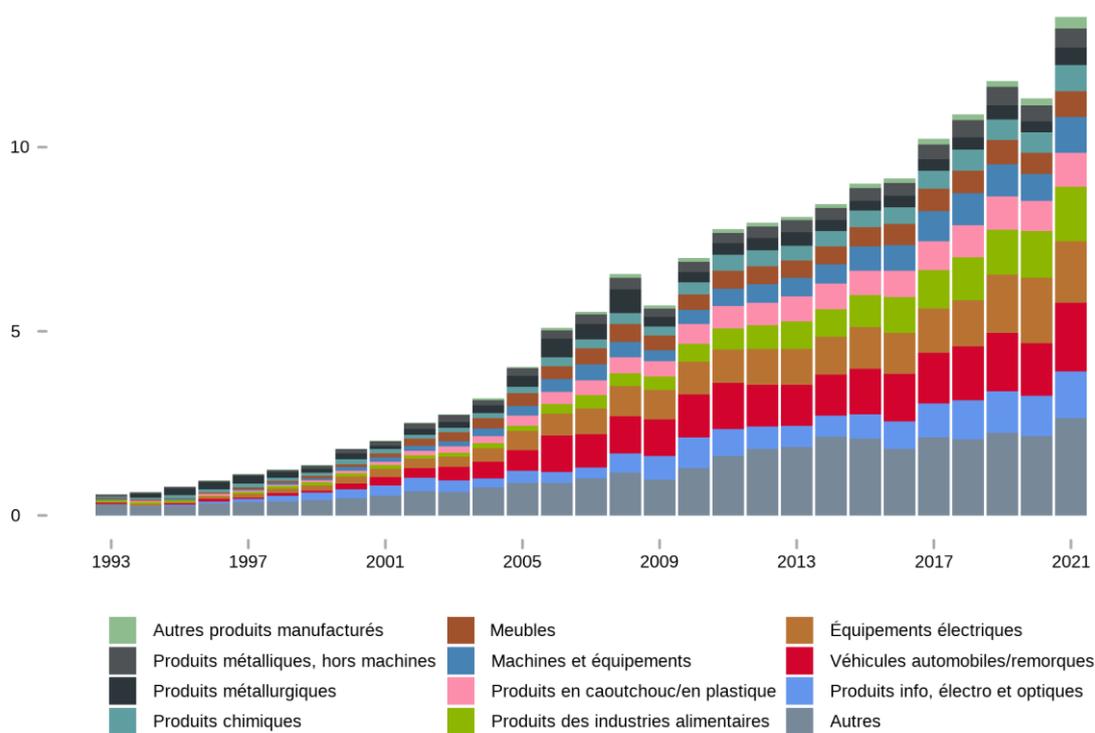
d'un produit, la distance entre la France et la Chine n'est pas de nature à améliorer le bilan carbone de ces échanges.

Figure 6 : Importations depuis l'Allemagne, 1993-2021, milliards d'euros



Source : etilab

Figure 7 : Importations depuis la Pologne, 1993-2021, milliards d'euros

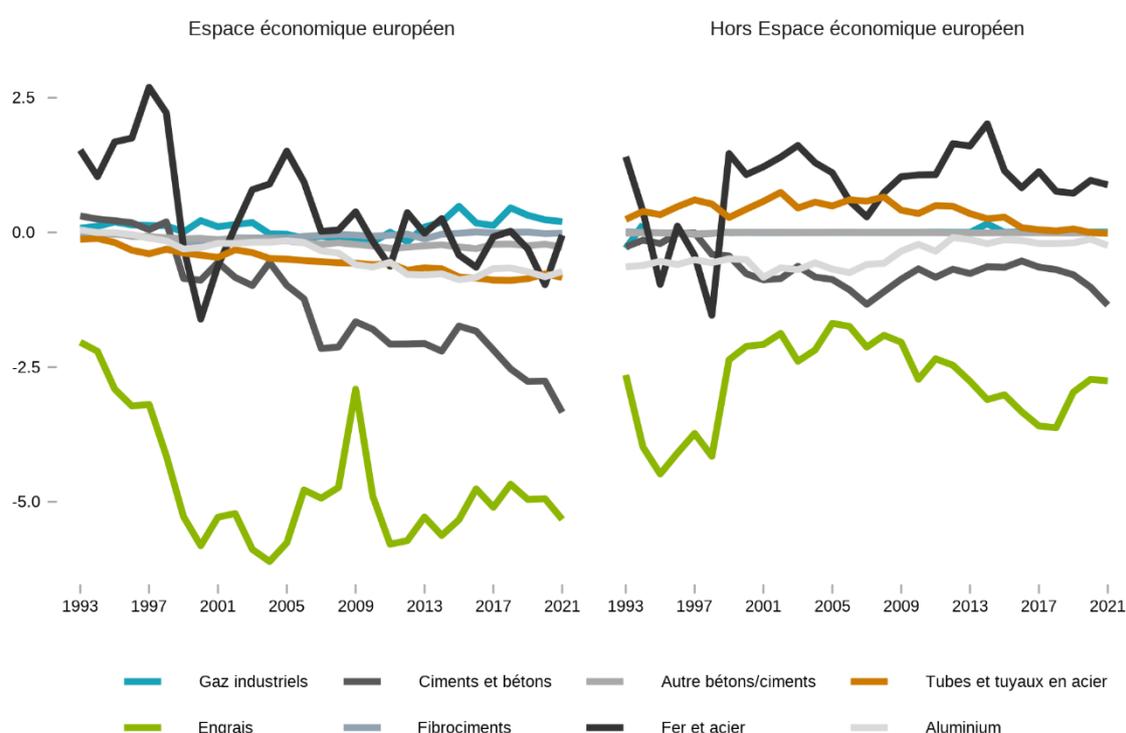


Source : etilab

17. Les importations françaises depuis l'Allemagne et la Pologne, plus diversifiées que depuis la Chine, reflètent une externalisation des industries à la fois lourdes et légères. L'Allemagne exporte principalement vers la France des machines et du matériel de transport, tandis que les importations depuis la Pologne sont très diversifiées, majoritairement constituées de biens manufacturés finis. Cette diversité des importations met en évidence une tendance française à délocaliser non seulement des industries à forte intensité énergétique, mais aussi des segments de production plus légers comme pour le cas de la Chine.

C. Les biens simples

Figure 8 : Balance commerciale des biens MACF, 1993-2021, millions de tonnes



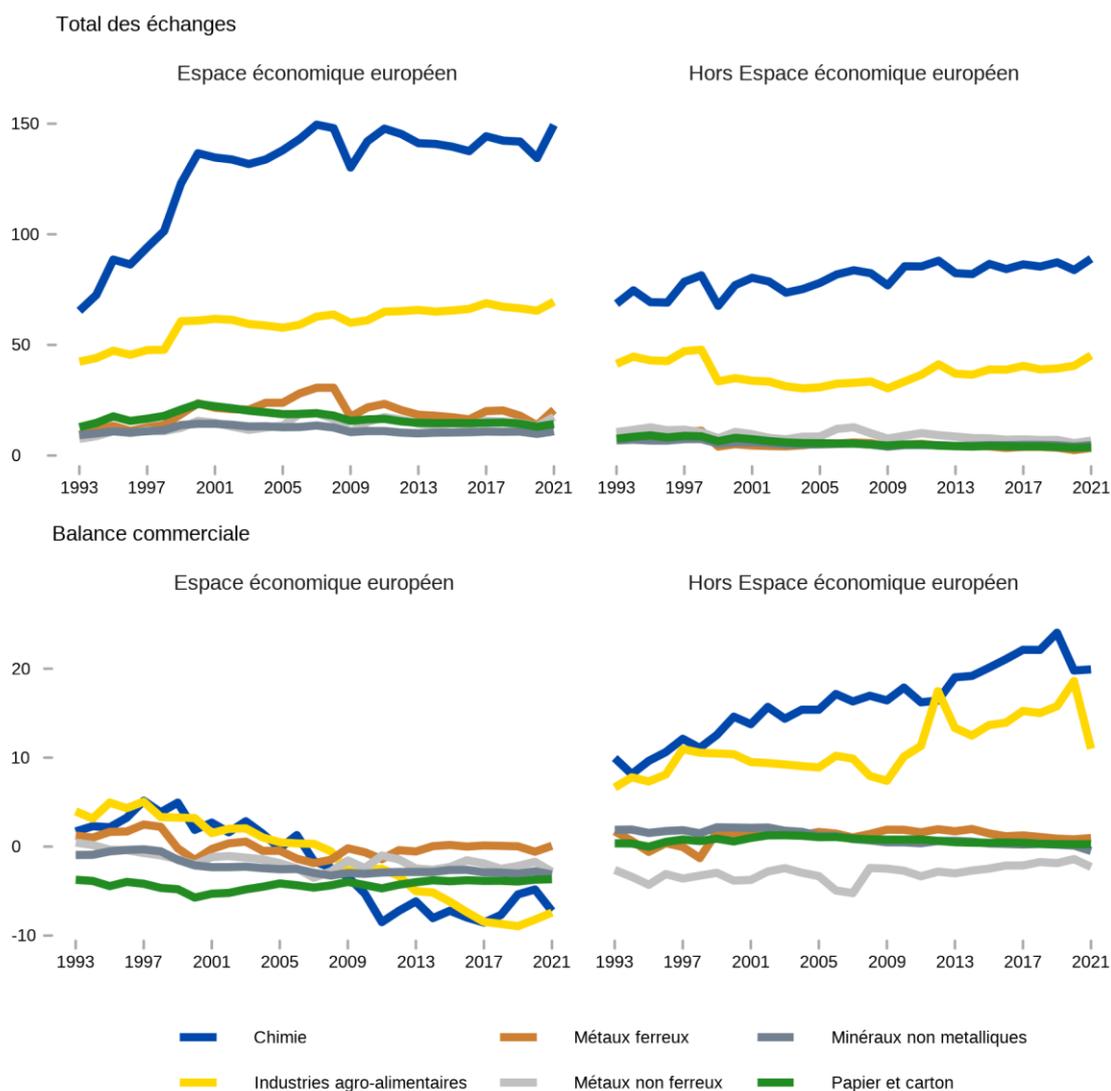
Source : etilab

18. La **Figure 8** montre que la balance commerciale des biens simples tels que définis dans le rapport demeure relativement stable sur la période. Néanmoins, on observe une détérioration de la balance sur les échanges d'engrais, de ciments et de bétons. Ces biens représentent des consommations intermédiaires pour des secteurs ne pouvant pas être délocalisés (ex. la construction) ou des secteurs historiquement importants soutenus par la puissance publique non délocalisée (ex. l'agriculture). Les délocalisations de la production de ces biens provoquent donc mécaniquement une dégradation de la balance commerciale, car le besoin de consommations intermédiaires reste constant ou augmente.
19. Finalement, sur ces biens provenant d'une industrie « lourde », le risque compétitif est plus fort en provenance de la zone économique européenne, ces biens étant

généralement à faible valeur ajoutée, les coûts de transports depuis des pays géographiquement éloignés peuvent être trois importants pour leur permettre d'être concurrentiels.

Secteurs d'intérêts

Figure 9 : Total des échanges et balance commerciale des secteurs d'intérêts, milliards d'euros CAF-FAB



Source : etilab

20. Le rapport a identifié plusieurs secteurs industriels prioritaires pour la décarbonation. La **Figure 9** montre que ces secteurs ne présentent pas de vulnérabilités particulières en ce qui concerne les échanges internationaux en dehors de l'espace économique européen (EEE). Cependant, à l'intérieur de l'EEE, une pression concurrentielle plus marquée se fait sentir. Par exemple, les secteurs agroalimentaires et chimiques ont enregistré une amélioration de leur balance commerciale vis-à-vis des pays extérieurs à l'EEE, mais celle-ci s'est légèrement détériorée vis-à-vis des partenaires européens.

21. Pour les autres secteurs, la balance commerciale est restée relativement stable au fil de la période. Cependant, cette stabilité ne signifie pas nécessairement que ces secteurs n'ont pas été soumis à des délocalisations. Dans tous les secteurs à l'exception de la chimie et de l'agroalimentaire, les volumes d'échanges ont diminué.

Conclusion

22. Cette annexe, en se concentrant sur les aspects du commerce extérieur dans le contexte de la désindustrialisation et de la décarbonation en France, souligne des points cruciaux.
23. Premièrement, l'augmentation des importations, en particulier en provenance de pays à forte intensité carbone, a des implications significatives pour l'empreinte carbone de la France. Cette tendance révèle la complexité des échanges commerciaux et leur impact environnemental, notamment en raison de la délocalisation des activités industrielles.
24. Deuxièmement, l'analyse sectorielle détaillée de cette annexe révèle que même si certains secteurs des importations semblent être de faible intensité énergétique, ils sont souvent liés à des industries plus émettrices. Par conséquent, l'empreinte carbone indirecte associée à ces importations est probablement plus importante qu'elle ne paraît initialement.
25. Troisièmement, la stabilité relative de la balance commerciale des biens simples et l'évolution des échanges dans les secteurs-clés pour la décarbonation mettent en évidence les défis concurrentiels spécifiques au sein de l'Union Européenne. Cela souligne la nécessité d'une stratégie industrielle bien ciblée pour la France, qui tienne compte à la fois des impératifs de compétitivité et de décarbonation.

Annexe 5 - EU ETS et MACF

1. Le système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne (SEQE ou SEQE-UE, EU ETS dans son acronyme anglophone) a été mis en place par la directive 2003/87/CE afin de donner suite au protocole de Kyoto signé sous l'égide des Nations Unies en 1997.
2. Il fut dernièrement révisé en 2021 pour s'aligner sur l'objectif européen de réduction des émissions de CO₂ d'au moins 62 % en 2030 par rapport à l'année de référence 2005. L'EU ETS doit, à terme, permettre à l'UE d'atteindre la neutralité carbone en 2050 de manière économiquement efficace. En 2021, 45 % des émissions totales de gaz à effet de serre de l'Union européenne sont couvertes par ce système, soit environ 1 600 Mt CO₂ eq.

Présentation générale du dispositif

A. Périmètre et évolutions

3. L'EU ETS concerne, en 2023, 11 000 établissements industriels et de production d'électricité – dont environ 1100 en France – répartis entre les 27 États membres auxquels sont adjoints l'Islande, la Norvège et le Liechtenstein. La Suisse est également couplée au système EU ETS depuis le 1er janvier 2020.
4. Historiquement, le périmètre retenu ne s'appuie pas sur le secteur industriel de l'établissement fiché, mais davantage sur les activités polluantes qui ont lieu au sein de cet établissement. Si un même établissement réalise plusieurs activités soumises à déclaration, alors c'est uniquement l'activité la plus émettrice qui est indiquée dans le relevé statistique.
5. Ces activités polluantes sont listées dans l'annexe I de la directive 2003/87/CE, complétée par l'annexe I de la directive 2009/29/CE. Elles sont regroupées en cinq catégories principales : activités dans le secteur de l'énergie, production et transformation de minéraux métalliques, industrie minérale, industrie chimique, et papier et carton¹⁹.
6. Le périmètre de l'EU ETS a graduellement évolué au fil du temps, pour englober davantage d'activités polluantes et davantage d'établissements. En 2012, l'EU ETS inclut également 500 opérateurs aériens²⁰ (potentiellement extraeuropéens) desservant les aéroports européens.
7. L'entrée dans la phase III au début de l'année 2013 est une date clef, car elle s'accompagne de la plus forte variation de périmètre jamais enregistrée par l'EU ETS.

¹⁹ D'après la directive 2003/87/CE de mise en place du SEQE.

²⁰ D'après la directive 2008/101/CE intégrant le transport aérien au SEQE.

Sont adjoints au système les activités liées à la production de verre et de céramique ; et le périmètre pour les industries déjà prises en compte est étendu, en particulier pour l'industrie chimique.

B. Scope

8. Dans son calcul des émissions, la base associée à l'EU ETS prend en compte les émissions vérifiées dans le scope 1 traditionnellement retenu par l'analyse scientifique. Elle englobe donc uniquement les émissions directes de GES provenant de sources contrôlées par l'établissement.

Mécanisme d'allocation

A. La création d'un marché européen du carbone

9. L'EU ETS considère chaque année une enveloppe globale d'émissions autorisées, ainsi qu'un total de quotas gratuits au sein de cette enveloppe : c'est le principe du « *cap and trade* ».
10. Les quotas gratuits sont répartis entre les États membres qui les allouent par secteur et par entreprise. L'allocation se fait suivant des critères définis à l'avance prenant en compte des paramètres objectifs et quantifiés tels que les émissions historiques du secteur, la performance des 10 % des installations les plus performantes dans le secteur (appelée le « benchmark ») et l'existence ou non d'un risque sectoriel de fuite carbone vers d'autres pays à la législation moins contraignante. L'allocation qui en résulte est multipliée par un facteur de correction transsectoriel, le CSCF, permettant de faire en sorte que les allocations gratuites ne dépassent pas une part fixée du total de quotas alloués (43 % en phase III).
11. Toute entreprise souhaitant émettre au-delà de ses quotas gratuits dispose de deux leviers d'action :
 - Acheter des émissions supplémentaires aux enchères (marché primaire) : les sessions d'enchères sont convoquées tous les jours ouvrés (du lundi au vendredi) hors jours fériés spécifiés en début d'année civile. Elles peuvent être annulées si le volume total des offres est inférieur au volume total des quotas mis aux enchères (1 occurrence en 2022, 0 en 2021).
 - Racheter les émissions accordées à une autre entreprise plus vertueuse au prix du marché (marché secondaire).
12. Si, en fin de période, l'entreprise ne parvient pas à restituer un nombre de quotas équivalent à ses émissions vérifiées, elle devra payer une pénalité à la tonne fixée par la Commission européenne (éventuellement majorée d'une pénalité additionnelle suivant l'État membre de rattachement de l'établissement).

13. De cette rencontre entre « bons » et « mauvais élèves » (comprendre : entre ceux qui émettent moins que leurs quotas autorisés et ceux qui n’y parviennent pas) résulte un prix du quota carbone (voir Figure 37 du rapport).

B. Chronologie du dispositif

14. L’EU ETS fut conçu comme un outil graduel au service du respect des engagements pris par l’Union européenne en matière d’environnement et de climat. Chaque phase se veut donc plus exigeante que la précédente, en diminuant les quotas autorisés, en réduisant la part des quotas gratuits dans le total, et en incluant un nombre croissant de secteurs et donc d’entreprises. On détaille sommairement la progression du système au fil des quatre phases :

- La phase I, appelée « phase pilote », se déroule du 1er janvier 2005 au 31 décembre 2007 conformément à la directive 2003/87/CE. Elle prévoit pour l’année 2008 une enveloppe globale d’environ 2,1 milliards de quotas d’émission gratuits (soit 2100 Mt de CO₂eq).
- La phase II, appelée « phase d’apprentissage », a lieu du 1er janvier 2008 au 31 décembre 2012. Durant cette phase, les quotas sont alloués gratuitement aux installations. En cas de dépassement, elles peuvent racheter les quotas non utilisés par d’autres établissements ou se moderniser pour émettre des quantités plus faibles. L’aviation civile est introduite dans l’EU ETS au début de l’année 2012.
- La phase III constitue un renforcement significatif du système et s’étend du 1er janvier 2013 au 31 décembre 2020. Les plafonds d’émission nationaux sont remplacés par un plafond d’émission européen, et les quotas alloués sont réduits linéairement à un rythme de -1,74 % par an. De plus, la part des quotas payants dans les quotas totaux augmente d’année en année, avec une mise en place différenciée suivant les secteurs et les risques de fuite carbone associés. Cette phase est marquée par la mise en place d’un mécanisme correctif de l’EU ETS : la réserve de stabilité du marché.
- La phase IV concerne la période du 1er janvier 2021 au 31 décembre 2030. Le coefficient annuel de réduction linéaire est plus ambitieux et atteint désormais les - 2,20 % par an (augmenté à - 4,30 % à partir de 2024 et - 4,40 % à partir de 2028). La disparition des quotas gratuits est définitivement actée et sera progressive entre 2024 et 2034, conjointement avec la mise en œuvre du MACF (que nous détaillons ci-dessous).

15. Mécanisme correctif central de la phase III du marché carbone européen, la réserve de stabilité du marché est évoquée dès le début de l’année 2013 pour réduire l’excédent de quotas d’émission. Conséquence de la crise des dettes souveraines en zone euro, le marché carbone de l’Union européenne se caractérisait alors par un excédent structurel de 2,1 milliards de quotas (ce qui équivalait donc à une année complète d’émissions en début de phase II), entraînant ainsi une baisse durable du prix de la tonne de CO₂eq émise. Le compromis finalement adopté prévoit donc de pouvoir retirer

automatiquement certains quotas du marché²¹, de les placer en réserve et de pouvoir les réinjecter dans le marché si le besoin s'en fait sentir. Cette réserve entre en vigueur le 1er janvier 2019.

16. Outre le MACF que nous développerons en troisième partie, de nombreuses évolutions sont attendues pour les années à venir, parmi lesquelles l'intégration du transport maritime en 2024 et le lancement du système EU ETS 2 en 2025.
- Dès 2024, les émissions de GES liées au transport de marchandises intraeuropéen seront comptabilisées à 100 % au sein du système EU ETS. Le transport entre un pays européen et un pays non européen sera comptabilisé à 50 %, les 50 % restants étant laissés à la discrétion de la partie non européenne.
 - Dès 2025, le système EU ETS 2 doit voir le jour et permettre d'encadrer les émissions du bâtiment, du transport routier et également des établissements industriels de taille plus modeste qui ne sont pas encore couvertes par le système EU ETS premier du nom.

²¹ D'après la proposition de décision du Parlement européen et du Conseil concernant la mise en place de la réserve de stabilité du marché.

Tableau de synthèse²²

	Phase I 2005 – 2007	Phase II 2008 – 2012	Phase III 2013 – 2020	Phase IV 2021 – 2030
Pays concernés	UE25 + Roumanie et Bulgarie en 2007	UE27 + Liechtenstein, Islande et Norvège	UE28 + Liechtenstein, Islande et Norvège	UE27 + Liechtenstein, Norvège et Islande
Gaz à effet de serre	CO2	CO2 et N2O	CO2, N2O et PFC	CO2, N2O, PFC et CH4
Périmètre	Électricité et chaleur + Raffineries + Acier et fer + Ciment et chaux + Verre + Pâtes à papier	Mêmes secteurs + Aviation (2012)	Mêmes secteurs + Métaux ferreux et non ferreux + Aluminium + Chimie (acide nitrique, acide adipique, acide glyoxylique, ammoniac, poussière de soude, hydrogène, pétrochimie)	Mêmes secteurs
Objectif de réduction des émissions			2020 : -21% par rapport à 2005	2030 : -43% par rapport à 2005 (révision : -62%)
Plafond total	Environ 2300 Mt CO2eq	Environ 2100 Mt CO2eq	2013 : 2100 Mt CO2eq 2020 : 1800 Mt CO2eq	2021 : 1570 Mt CO2eq 2030 : 800 Mt CO2eq
Réduction annuelle du plafond			-1,74% calculé sur le point médian de la phase II	-2,20% calculé sur le point médian de la phase III Révision : -4,30% entre 2024 et 2027, puis -4,40% entre 2028 et 2030
Allocations gratuites	95% minimum (100% si risque de fuites de carbone)	90% minimum (100% si risque de fuites de carbone)	I : 80% en 2013 / 30% en 2020 / Objectif de réduction de 30% à 0% entre 2026 et 2030 E : 20% (hors article 10 quater et article 10 bis)	E : 0% (hors article 10 quater et article 10 bis)
Pénalité si dépassement	40€/t	100€/t	100€/t + inflation	100€/t + inflation
Banking	Illimité Interdit de la phase I à la phase II	Illimité Autorisé de la phase II à la phase III	Illimité	Illimité
Borrowing	Possible de N pour N-1 Interdit en 2007	Possible de N pour N-1 Interdit en 2012	Possible de N pour N-1	Possible de mettre en conformité les années N-k avec l'année N

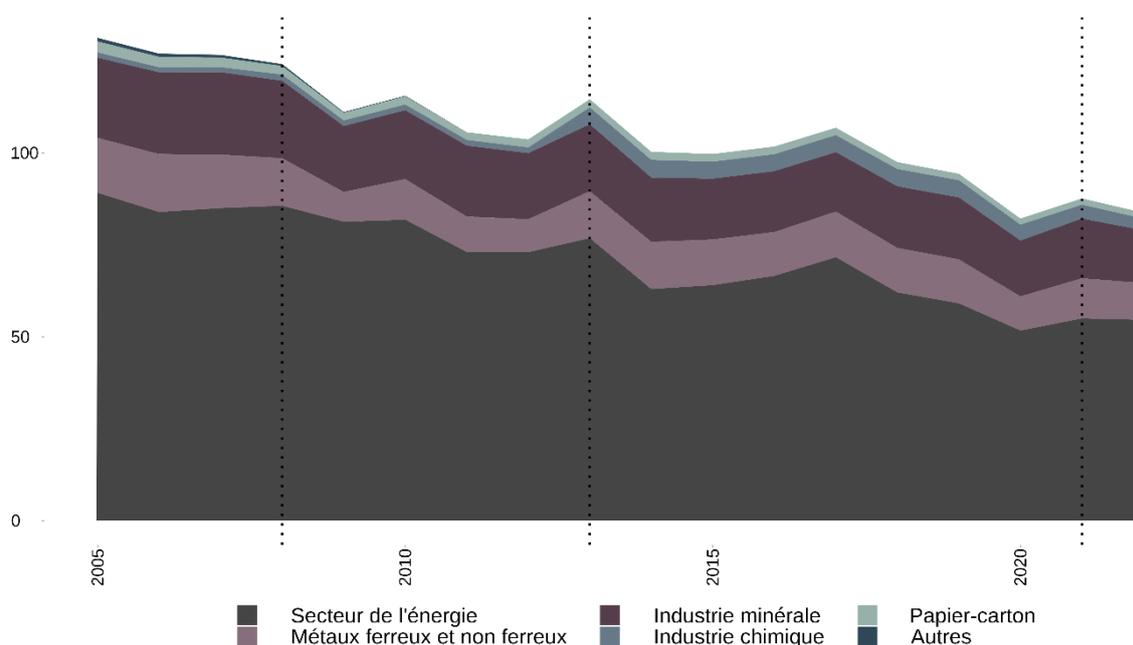
²² Réalisé d'après *Le système d'échange de quotas d'émission de l'UE : l'allocation de quotas à titre gratuit devrait être mieux ciblée*, Rapport spécial 18 2020, Cour des Comptes européenne, 2020 ainsi que les informations du Ministère de la transition écologique (<https://www.ecologie.gouv.fr/marches-du-carbone>).

Analyse des données EU ETS

A. Périmètre global

17. En 2022, les données EU ETS prennent en compte 1 581 établissements industriels et de production d'électricité français. Cette base recense les émissions vérifiées pour chaque établissement, pour la période allant de 2005 à 2022. Ne sont pas reproduits ici les graphiques ayant déjà fait l'objet d'une analyse dans le cœur du rapport.
18. Comment évoluent les émissions françaises encadrées par l'EU ETS depuis 2005 ? Quelles activités y contribuent majoritairement ?

Figure 1 : Émissions de GES EU ETS selon l'activité émettrice (en Mt CO₂eq)



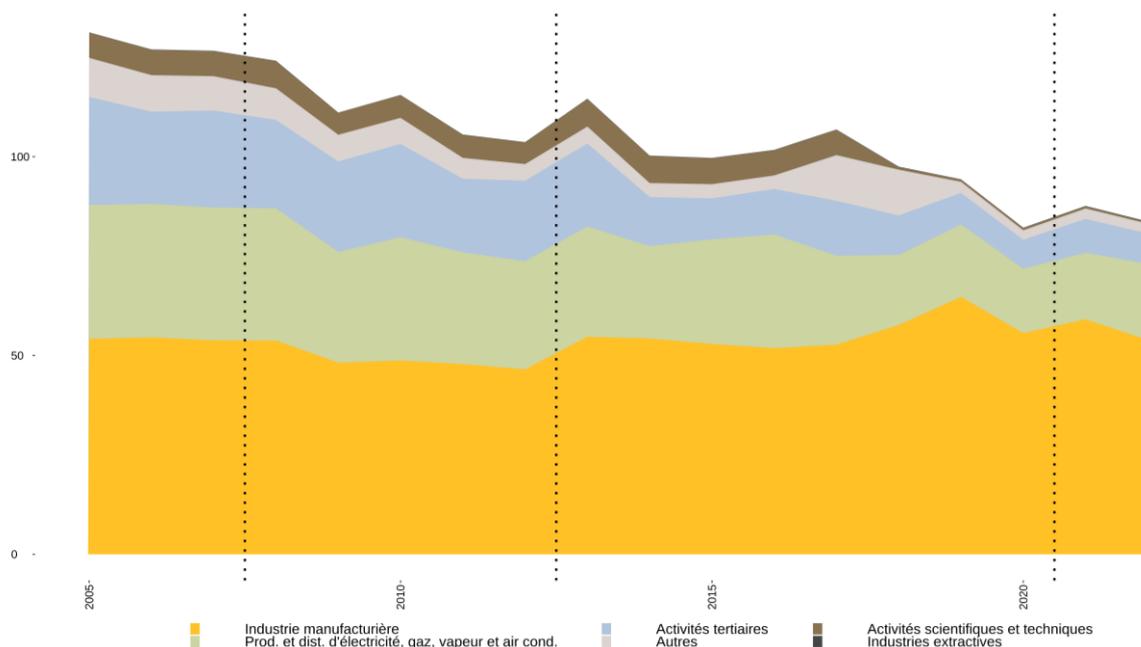
Source : EUTL, etilab

19. La **Figure 1** classe les émissions suivant les activités qui les engendrent (conformément à la méthodologie choisie par la Commission européenne) : cela ne présage en rien de l'activité principale des établissements soumis à l'EU ETS. On observe que les activités de nature énergétique (en noir sur le graphique) comptent historiquement pour près des trois quarts des émissions françaises encadrées par l'EU ETS. La transition de phase en 2013 (resp. 2021) apparaît clairement sur le graphique, dans la mesure où les variations de périmètre ont induit une hausse de 10,5% (resp. 6,67%) des émissions françaises soumises au marché carbone européen.
20. Un rebond des émissions EU ETS ne traduit pas nécessairement un rebond des émissions françaises en général (cf. Figure 4 du rapport, qui établit ce constat pour le cas particulier de l'industrie manufacturière). L'année 2013 est à cet égard exemplaire

en ce que la forte hausse des émissions enregistrées par le SEQE est exclusivement due à l'accroissement du périmètre pris en compte par ce dispositif à la veille de l'entrée en phase III.

21. À quel secteur INSEE appartiennent les entreprises françaises soumises à l'EU ETS ?

Figure 2 : Émissions de GES EU ETS selon le secteur INSEE de l'établissement (en Mt CO₂eq)²³



Source : EUTL, etilab

22. Outre le rattachement à la source émettrice, il est également possible de cartographier les émissions suivant leur finalité, en s'attachant au secteur industriel auquel est rattachée l'entreprise émettrice. Le total annuel est identique à celui présenté dans la **Figure 1**, c'est le mode de présentation des résultats qui varie.
23. Afin de différencier les deux rattachements possibles, prenons un exemple tiré des données EU ETS sur lesquelles nous travaillons. Considérons une entreprise ABC de l'agroalimentaire réalisant une combustion de carburants pour chauffer d'immenses cuves employées à la confection de soupes de légumes. Selon la nomenclature adoptée par la Commission européenne, le rattachement par origine (**Figure 1**) imputera cette émission à la catégorie « Activités dans le secteur de l'énergie ». Le rattachement par finalité (**Figure 2**) imputera cette émission à l'industrie agroalimentaire, ici incluse dans le secteur « Industrie manufacturière ».
24. Cette figure met en évidence les inflexions qui ont pu marquer l'implémentation très progressive du marché carbone européen. On retrouve les grandes tendances déjà observables sur la **Figure 1** :

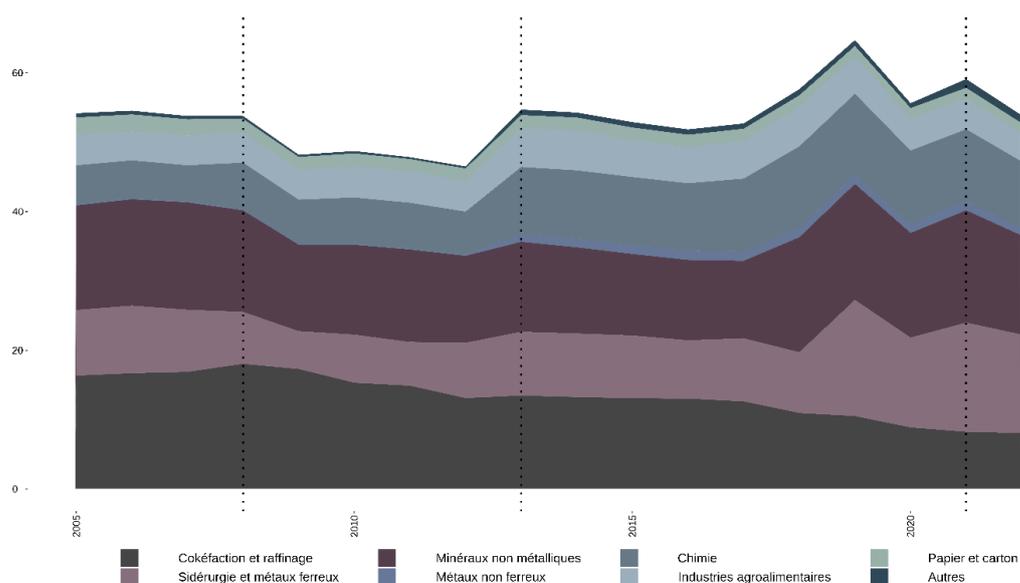
²³ Autres : Commerce ; transports et entreposage ; construction ; eau, déchets et dépollution.

- La phase I (2005-2007) est marquée par une relative stagnation des émissions. Cette phase est statique, à visée expérimentale et se concentre essentiellement sur la définition exacte du périmètre retenu et la mesure des émissions associées.
- L'entrée dans la phase II (2008-2012) induit une baisse significative des émissions. Le mécanisme limitatif qu'est l'EU ETS commence à être appliqué par les établissements retenus. On peut également supposer que le contexte international de crise économique a pu contraindre la demande et, partant, l'offre de biens manufacturiers non essentiels.
- L'entrée dans la phase III (2013-2020) s'accompagne d'une hausse des émissions captées par l'EU ETS. Il s'agit ici d'une conséquence directe de l'accroissement extensif du périmètre initié en 2013 : la part des émissions liées à l'industrie manufacturière augmente significativement avec l'intégration des industries liées à la production de verre et de céramique. Une variation intensive a également cours, en incluant davantage d'émissions dans les secteurs précédemment ciblés, en particulier l'industrie chimique.
- L'entrée dans la phase IV (2021-2030) est elle aussi associée à un renchérissement des émissions soumises à l'EU ETS, pour les mêmes facteurs que ceux identifiés précédemment.

B. Périmètre industrie manufacturière

25. Comment évoluent les émissions françaises encadrées par l'EU ETS, en se restreignant au périmètre de l'industrie manufacturière ?

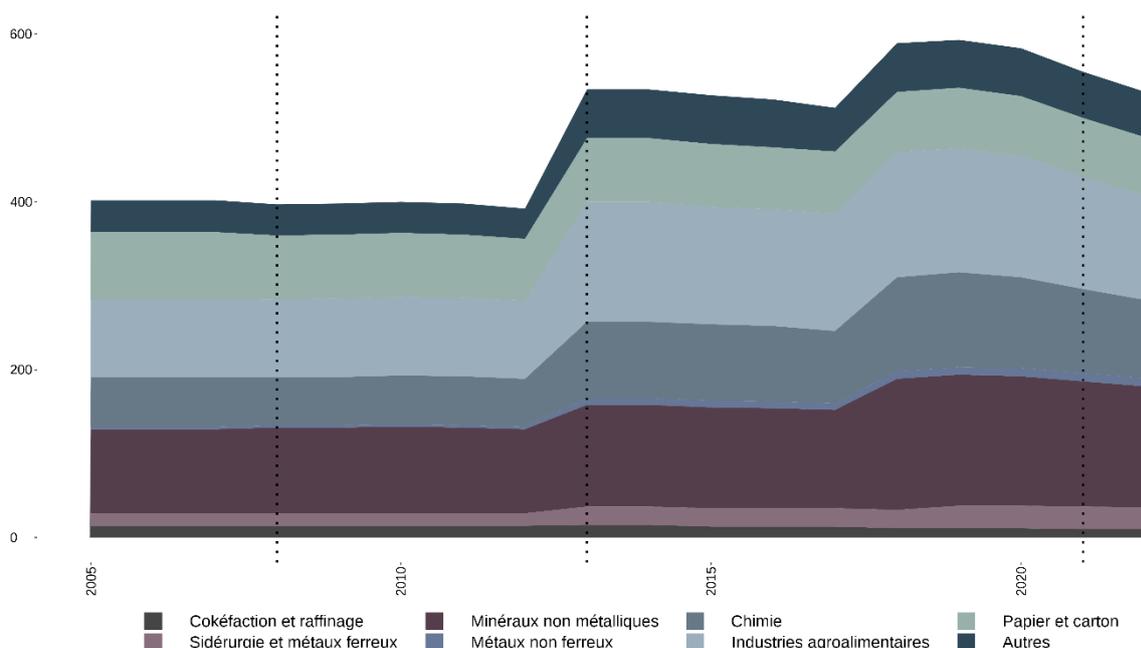
Figure 3 : Émissions de GES EU ETS pour l'industrie manufacturière (en Mt CO₂eq)



Source : EUTL, etilab

26. On restreint ici l'analyse des émissions EU ETS au périmètre de l'industrie manufacturière. La hausse des émissions captées par le système entre 2012 et 2013 est particulièrement sensible pour l'industrie manufacturière, qui voit son total évoluer de 17,6% (contre « seulement » 10,5% pour les émissions françaises EU ETS dans leur ensemble). La part des émissions françaises liées à l'industrie manufacturière dans le système passe donc de 44,9% en 2012 à 47,8% en 2013.
27. Les hausses générales observées en 2013, 2019 (en préparation du passage à la phase III) et 2021 se retrouvent en restreignant le périmètre de l'étude à la seule industrie manufacturière. Ainsi, malgré quelques fluctuations en cours de période, ainsi qu'un accroissement considérable du nombre d'entreprises concerné par l'EU ETS, les émissions totales pour l'industrie manufacturière sont à égalité quasi parfaite en 2005 et en 2022, autour de 55 Mt.
28. Comment a évolué le périmètre du SEQE en termes de nombre d'établissements (en se restreignant à l'industrie manufacturière) ?

Figure 4 : Nombre d'établissements intégrés au système EU ETS (industrie manufacturière)



Source : EUTL, etilab

29. Ce graphique permet de dénombrer plus finement l'évolution du périmètre concerné par le SEQE au fil des ans. Il complète l'analyse précédente qui portait essentiellement sur l'évolution des émissions au fil des ans.
30. Les réformes de 2013 et 2018 sont particulièrement perceptibles, avec deux fortes hausses du nombre d'établissements inclus dans le dispositif. Reflet de la concentration du secteur, on observe que les sites métallurgiques sont peu nombreux, bien que responsables d'une part non négligeable des émissions. A contrario, les industries alimentaires constituent un sous-secteur industriel plus atomisé. La réforme de 2013 a

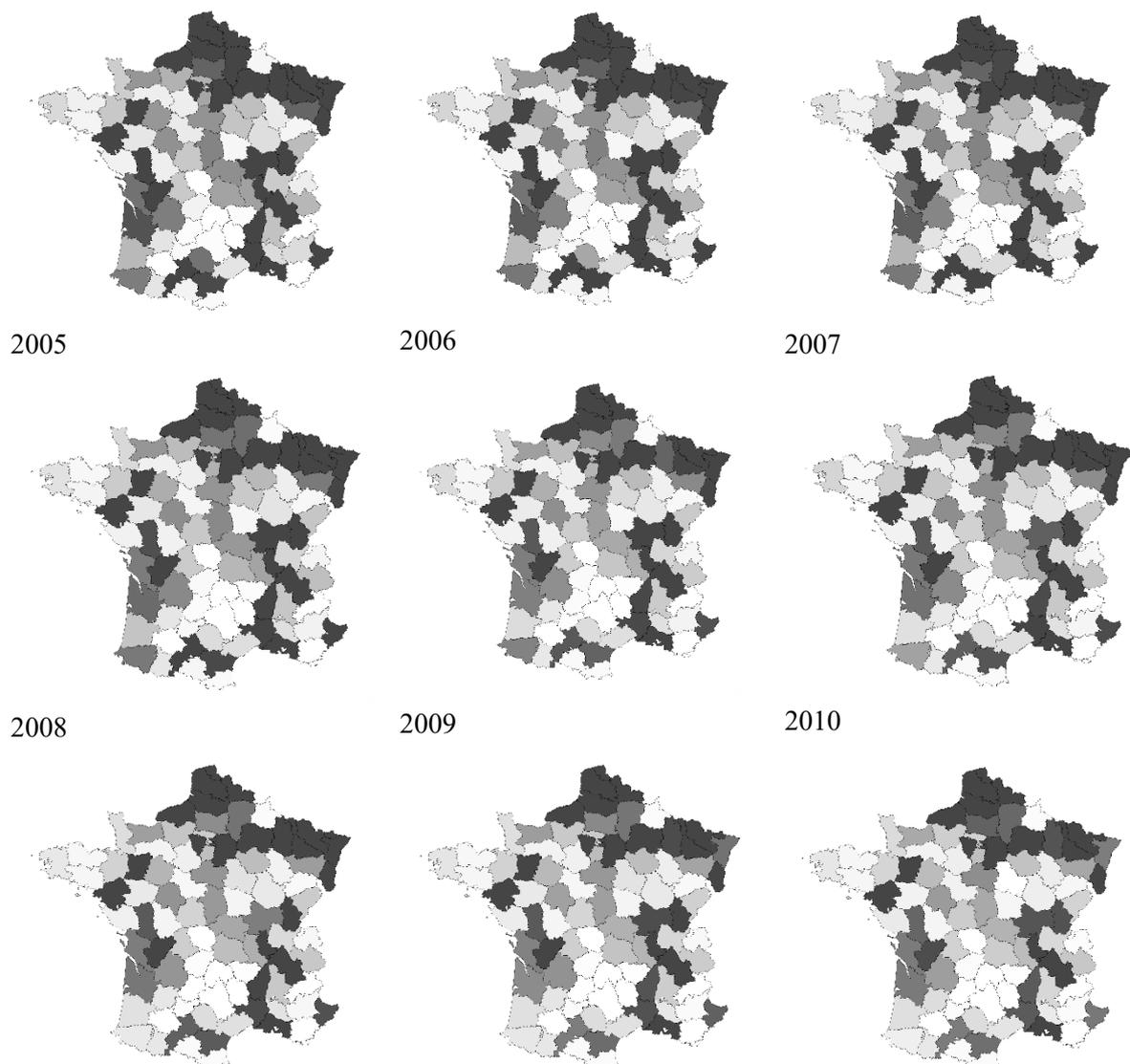
un impact particulier sur l'industrie chimique, puisqu'elle visait entre autres à améliorer la prise en compte des établissements dont les activités ont trait à la chimie : le nombre d'établissements concernés dans cette industrie passe ainsi de 47 à 71, soit une hausse de 51%. On a démontré précédemment que cette réforme revêtait un aspect tout à fait singulier pour les ETI, particulièrement concernées par la chimie et les minéraux non métalliques.

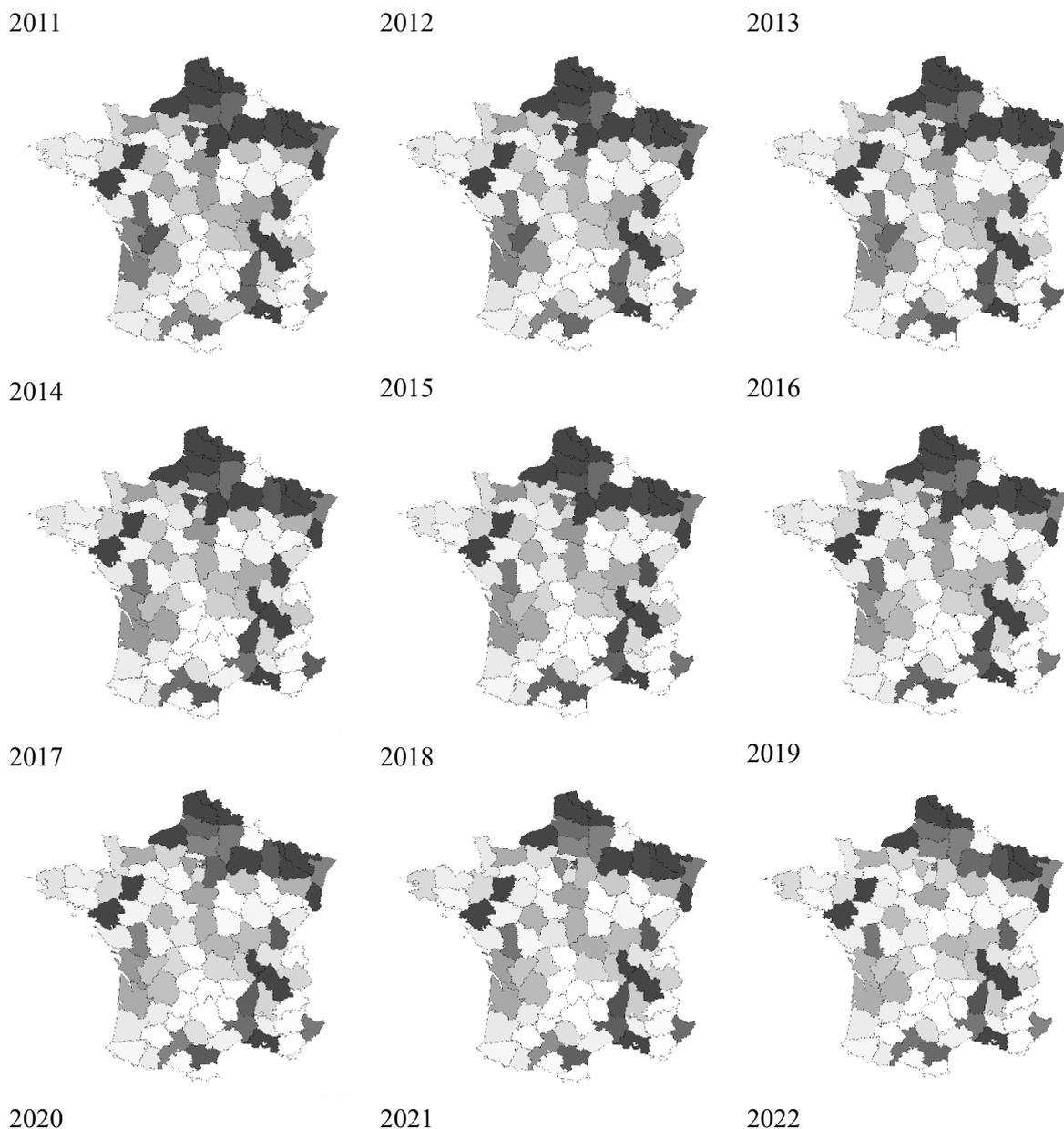
31. La réforme de 2018, anticipant le passage en phase IV prévu pour début 2021, est plus généralisée, avec une évolution homogène du nombre d'établissements en fonction du secteur considéré.

C. Répartition spatiale des émissions EU ETS

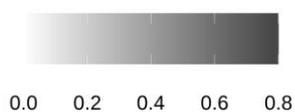
32. Comment les émissions françaises capturées par le SEQE sont-elles réparties sur le territoire métropolitain ? Quelles dynamiques spatiales suivent-elles depuis 2005 ?

Figure 5 : Dynamiques spatio-temporelles des émissions EU ETS en France (en Mt CO₂eq)





Source : EUTL, etilab



33. D'un point de vue méthodologique, les départements les plus foncés sont ceux déclarant le plus d'émissions EU ETS (supérieures à 0,8 Mt CO₂eq). A contrario, les départements les plus clairs déclarent un nombre plus faible d'émissions.
34. La confrontation des 18 figures exposées précédemment met en lumière deux dynamiques structurantes pour les émissions prises en compte par le marché carbone européen :
 - Elles matérialisent très visuellement la dynamique temporelle que nous connaissons déjà, c.-à-d. la tendance baissière de ces émissions depuis le

lancement du système en 2005. Si le périmètre englobé évolue à la hausse (cf. Figure 4), les émissions produites depuis le sol français et incluses dans le système EU ETS ont fortement diminué en 18 ans.

- Elles matérialisent également des dynamiques spatiales qui manquaient encore au raisonnement. On observe une relative stabilité dans le classement des départements les plus concernés par EU ETS, qui concorde logiquement avec les bassins industriels historiques. Ces départements sont les seuls à toujours apparaître en gris foncé ou en noir dans les dernières cartes, entre autres : les Bouches-du-Rhône, la région lyonnaise, les cinq départements des Hauts-de-France, l'Est de l'Île-de-France ainsi que le Grand Est.
35. On observe également des départements historiquement moins industrialisés, car plus ruraux ou tournés vers d'autres secteurs économiques.

Le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF)

A. Répartition spatiale des émissions EU ETS

36. Le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) est un dispositif correctif visant à répondre au phénomène de fuites de carbone provoquées, entre autres, par le Système d'Échange des Quotas d'Émission de l'Union européenne (SEQE-UE). Le MACF vient donc compléter le système de quotas gratuits qui a perduré dans certains secteurs jugés particulièrement sensibles au risque de fuites carbone. Il consiste à soumettre les produits importés dans le territoire douanier de l'Union européenne à une taxation carbone équivalente à celle subie par les industriels européens comparables soumis au SEQE. Son mode de fonctionnement, les produits concernés et son cadre législatif d'application sont précisés dans le règlement UE/2023/956, pour une entrée en application prévue au 1er octobre 2023.
37. Deux étapes sont prévues dans la mise en place de ce nouveau dispositif²⁴ :
- D'octobre 2023 à décembre 2025, les importateurs de marchandises couvertes par le MACF s'inscrivent sur la plateforme dédiée, déclarent de manière trimestrielle leurs émissions importées et candidatent pour obtenir le statut obligatoire de « déclarant MACF autorisé ».
 - À partir de janvier 2026, le MACF est pleinement fonctionnel : les déclarants autorisés sont contraints d'acheter des certificats MACF en nombre équivalent à leurs émissions importées. Ce mécanisme rappelle donc le mode de fonctionnement du SEQE, si ce n'est qu'une contrainte supplémentaire pèse sur les déclarants MACF autorisés : à la fin de chaque trimestre, ces derniers doivent impérativement détenir un stock de certificats équivalent à 80% de leurs émissions importées à date.

B. Finalité et lien avec EU ETS

38. Ce mécanisme répond à deux problématiques qui ont graduellement pris de l'ampleur, au fur et à mesure que l'Union européenne a déployé et approfondi EU ETS :
- Les fuites de carbone minent les efforts économiques et technologiques fournis par les 27 États de l'Union européenne pour réduire leurs émissions. Une étude de la Direction Générale du Trésor mentionne dans le numéro 280 du magazine Trésor-Eco paru en mars 2021 un taux de fuites compris entre 5% et 30%, quand le Ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires français fait état dans son article dévolu au MACF d'un taux de 20%.

²⁴ D'après le règlement (UE) 2023/956 du Parlement européen et du Conseil du 10 mai 2023 établissant un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières, 10 mai 2023.

- L'absence de mécanisme correctif aux frontières produit un effet néfaste pour les entreprises européennes qui sont soumises au SEQE. Leurs investissements vertueux en faveur du respect des accords de Paris doivent être valorisés, afin de préserver la compétitivité des entreprises européennes et la souveraineté industrielle de l'Union. Une telle iniquité dans le traitement des entreprises européennes et des entreprises extraeuropéennes pourrait également, à terme, porter préjudice à l'acceptabilité sociale des mesures écologiques prises par l'Union européenne.
39. Comme énoncé précédemment, son principe de fonctionnement est tout à fait analogue au système de quotas d'émission entré en vigueur à la suite du Protocole de Kyoto. Le MACF est indissociable du phénomène de disparition progressive des quotas d'émission gratuits prévue pour la décennie 2020. Pour l'heure, certains secteurs disposent encore d'une allocation généreuse de quotas gratuits (précisément pour prévenir ce risque de fuites de carbone aux frontières). En plus de répondre aux deux problématiques énoncées ci-avant, le MACF doit donc permettre de renforcer l'efficacité du SEQE en facilitant la réduction des quotas gratuits, dont le surnombre dans certains secteurs a faiblement incité les entreprises concernées à réduire leurs émissions.
40. Les institutions de l'Union européenne ont opté pour une implémentation progressive du MACF, qui se limite aujourd'hui aux secteurs suivants : acier, ciment, aluminium, engrais, azotés et hydrogène. Ces secteurs ont été identifiés comme fortement exposés au risque de fuites de carbone, et représentent en cumulé près de 50% des émissions industrielles de l'Union européenne. Ce mécanisme doit être étendu à d'autres secteurs industriels (en particulier le raffinage et la chimie) et à d'autres produits proches des produits déjà identifiés. Cette seconde extension a pour objectif de limiter les possibilités de contournement par l'aval en important des produits semi-transformés en lieu et place des produits ciblés par le MACF.

C. Méthode de calcul

41. En fin de phase III, trois critères²⁵ ont présidé à la définition des secteurs à protéger par la mise en place du MACF. Il suffisait pour un secteur de vérifier un des trois critères pour être visé par ce dispositif :
- Critère 1 : Intensité du coût du carbone c.-à-d. la somme des coûts supplémentaires (directs et indirects) rapportée à la valeur ajoutée brute > 30%.
 - Critère 2 : Intensité des échanges avec les pays tiers c.-à-d. la somme des importations et des exportations rapportée à la consommation intérieure > 30%.
 - Critère 3 : Intensité du carbone > 5% et intensité des échanges > 10%.
42. En phase IV, ces trois critères sont remplacés par un score unique appelé « indicateur de fuite de carbone » (ou indicateur FC), facteur résultant du produit de l'intensité

²⁵ D'après *La proposition de la Commission européenne sur le mécanisme d'ajustement aux frontières (MACF) : analyse des modalités d'application*, O. Sartor et S. Sourisseau pour l'ADEME, février 2022.

commerciale et de l'intensité des émissions . Les secteurs ou sous-secteurs dont l'indicateur FC dépasse 0,2 sont considérés comme présentant un risque de fuite de carbone. Une étude qualitative et quantitative complémentaire est effectuée en seconde intention, pour les secteurs dont l'indicateur est inférieur à 0,2, mais pour lesquels des suspicions existent.

Annexe 6 - Panorama des solutions de décarbonation pour l'industrie

1. La présente annexe dresse un panorama non exhaustif de solutions de décarbonation pour 12 familles de procédés industriels, identifiés comme stratégiques pour la décarbonation des ETI.
2. La première section précise le périmètre de l'étude, la seconde détaille la compatibilité de ces familles de solutions avec des étapes de procédés industriels (**Tableau 2**) et liste des exemples de ruptures de procédés envisageables (**Tableau 3**).
3. Les auteurs précisent que cette annexe ne prétend refléter ni l'entièreté des enjeux ni la complexité de la décarbonation des ETI. L'ambition est de proposer une vision large des leviers techniques disponibles, ainsi que leurs spécificités.

Périmètre de l'étude

4. Les émissions d'un site industriel (scope 1 et 2) peuvent être réparties en 3 catégories : les émissions « chimiques » de procédés (décarbonation du clinker, électrolyse d'alumine avec une anode en carbone, etc.), les émissions énergétiques directes (combustion sur site) et les émissions énergétiques indirectes (production hors site d'électricité, de vapeur ou de froid). Les émissions indirectes de l'entreprise (scope 3 – logistique et transport, actifs immobiliers, matière première, etc.) sont exclues de cette étude.
5. Certains leviers de décarbonation reposent sur un remplacement très coûteux d'infrastructures sur site (changement de four ou de brûleurs), d'autres consistent en l'ajout de briques techniques sur les infrastructures existantes (systèmes de récupération de chaleur fatale, capture du carbone), ou reposent sur une substitution de vecteur énergétique.
6. Il convient enfin de rappeler que la production de chaleur représente 70 % des besoins énergétiques de l'industrie, ce qui fait de sa décarbonation une condition de réussite. Pour certains procédés, la chaleur requise dépasse les 1000°C, une température difficilement atteignable aujourd'hui sans combustion pour les procédés listés.

Analyse sectorielle des technologies de décarbonation

A. Éléments de contexte par filière

7. L'intégration de nouveaux vecteurs énergétiques, systèmes énergétiques ou équipements industriels se considère essentiellement à l'échelle d'un procédé

(contraintes propres à la chimie du procédé) et d'un site industriel (contraintes propres à la géométrie de l'usine). D'autres enjeux se traitent au niveau des filières des solutions de décarbonation, voire de la politique énergétique d'une zone géographique, par exemple l'arbitrage autour de la biomasse.

8. Le tableau ci-dessous précise plusieurs enjeux transverses aux filières des solutions de décarbonation de l'industrie.

Tableau 1. Éléments de contexte par filière

Familles de solutions	Enjeux transverses à la filière
Biomasse	<p>Références de décarbonation industrielles en France : oui</p> <ul style="list-style-type: none"> - Enjeu national de bouclage biomasse sous toutes ses formes (solides, liquides, gazeuses) - Très répandu pour le réchauffage de fluides (chaudières) <p>Enjeux spécifiques à la combustion de solides dans des fours</p>
Biométhane / méthane de synthèse / biogaz	<p>Références de décarbonation industrielles en France : oui</p> <ul style="list-style-type: none"> - Enjeu national de bouclage biomasse sous toutes ses formes (solides, liquides, gazeuses) - À acheter sur le réseau national ou en « <i>behind-the-meter</i> » - Le biométhane et le méthane de synthèse peuvent remplacer le gaz fossile dans tous les usages actuels du gaz dans l'industrie, sans changement d'infrastructure - Utilisation directe du biogaz dans des procédés sans épuration préalable en biométhane avec des brûleurs spéciaux
Capture et stockage du carbone	<p>Références de décarbonation industrielles en France : oui</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fonctionne bien pour des fumées concentrées en CO₂ - Emprise au sol et consommations énergétiques importantes <p>Enjeu sur l'identification de zones de séquestration durables</p>
Combustion d'hydrogène (électrification indirecte)	<p>Références de décarbonation industrielles en France : oui</p> <ul style="list-style-type: none"> - Intégration de 10-20 % de H₂ dans un brûleur de méthane sans modification technologique majeure - Maturités inégales par technologies de brûleurs 100 % H₂ : TRL 8-9 pour brûleurs faible puissance et TRL 4-5 pour hautes puissances <p>Enjeux pour l'intégration dans une enceinte : vitesse de flamme, diffusion de la chaleur, gestion de la vapeur d'eau, etc.)</p>
Électrification directe de la production de chaleur	<p>Références de décarbonation industrielles en France : oui</p> <ul style="list-style-type: none"> - Contraintes fortes sur le réseau électrique (raccordement et puissance soutirée) - Inégalité de maturité entre les différentes technologies (résistances, induction, arc électrique, etc.), besoins (cuisson, séchage, chauffage de fluides) et procédés (fusion du verre, traitement thermique, etc.)
Géothermie basse énergie	<p>Références de décarbonation industrielles en France : oui</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mobilisable sur tout le territoire avec une pompe à chaleur géothermique, permettant d'atteindre 60-80°C - Dans certaines zones géographiques, la géothermie peut fournir une chaleur plus importante, avec des sondes sèches profondes ou en captant de l'eau chaude souterraine - Permet également la production de froid
Récupération de chaleur fatale	<p>Références de décarbonation industrielles en France : oui</p> <ul style="list-style-type: none"> - Technologiquement mature pour les 5 techniques principales (échangeurs sur fumées de four, économiseur sur fumées de chaudières, échangeurs sur buées de séchage, condenseurs sur groupe froid, énergie des eaux usées)
Solaire thermique	<p>Références de décarbonation industrielles en France : oui</p> <ul style="list-style-type: none"> - Largement mobilisable en hybridation d'une consommation de gaz - Gestion de l'intermittence journalière et saisonnière avec du stockage thermique - Difficilement intégrables sur des toitures (panneaux lourds et chargés en eau) - Le solaire thermique à concentration permet de monter à des températures de 350-400°C

B. Compatibilité des solutions par niveaux de température

9. Le **Tableau 2** ci-dessous précise la capacité des principales familles de solutions thermiques à fournir de la chaleur aux niveaux de température requis par différents procédés industriels. Il ne tient pas compte d'autres critères de sélection (puissance, intégration dans l'usine, foncier, etc.).

10. Une case verte indique que la solution peut fournir tous les niveaux de température, une case vert clair que la solution peut fournir une partie des niveaux de température et une case rouge que la solution n'est pas mobilisable. Pour ce dernier cas de figure, l'hybridation est à envisager pour réduire l'utilisation d'énergies fossiles, par exemple pour le préchauffage d'air dans un four. Dans le cas des ruptures de procédés, une case verte indique qu'une solution est en développement et qu'elle est estimée mobilisable à moyen / long terme.

Tableau 2 : Compatibilité des solutions par niveau de température

		Récupération et valorisation de chaleur perdue				Intégration EnR			Ruptures de procédés			
Étapes clés du procédé	Niveaux de température requis	Buées de séchage	Condensation de groupes froids	Fumées de chaudière	Fumées de fours	Géothermie basse énergie	Solaire thermique	Biomasse solide / CSR	Électrification / hybridation électrique	Combustion H2 (électrification indirecte)	CCS	Autres ruptures de procédé
0 - Tous secteurs (bureaux et bâtiments)												
Production d'ECS	< 80°C											
Chauffage des locaux	< 30°C											
Climatisation	< 20°C											
1 - Aluminium primaire												
Procédé Bayer (Alumine) - dissolution Bauxite & soude	150-200°C											
Procédé Bayer (Alumine) - calcination	1050°C											
Procédé Hall-Héroult (Aluminium) - émission CO2 lié à l'électrolyse	X											
2 - Ammoniac												
Synthèse des mélanges - Catalyse	500°C											
Préréchauffage												
Haber-Bosch - Chauffage	450°C 300 bar											
Haber-Bosch - Procédé	450°C 300 bar											
Condensation												

Peut couvrir tous les niveaux de température
 Peut couvrir une partie des niveaux de température
 Non mobilisable - Pas d'information

Étapes clés du procédé	Niveaux de température requis	Récupération et valorisation de chaleur perdue				Intégration EnR			Ruptures de procédés			
		Buées de séchage	Condensation de groupes froids	Fumées de chaudière	Fumées de fours	Géothermie basse énergie	Solaire thermique	Biomasse solide / CSR	Électrification / hybridation électrique	Combustion H2 (électrification indirecte)	CCS	Autres ruptures de procédé
3 - Chaux												
Calcination de composés calcaires	900 - 1200°C											
Calcination - décarbonatation												
Hydratation de la chaux												
4 - Ciment												
Préchauffage du cru	800°C											
Cuisson du cru - combustion	1500°C											
Cuisson du cru - décarbonatation	1500°C											
5 - Dichlore												
Électrolyse												
6 - Éthylène et plastiques												
Vapocraquage	800°C											
Polymérisation												
7 - Forge et fonderie												
Fusion aluminium (notamment recyclé)	700-800°C											
Fusion de métaux ferreux (notamment recyclés)	Autour de 1500°C											
Mise à nuance métaux ferreux	Plus de 1500°C											
Traitements thermiques												
8 - Papier carton												
Production chimique de pâte à papier (kraft, sulfite)	170°C											
Production mécanique de pâte à papier												
Blanchiment de la pâte (optionnel)	20 - 130 °C											
Séchage	175-180°C											

Peut couvrir tous les niveaux de température
 Peut couvrir une partie des niveaux de température
 Non mobilisable - Pas d'information

Étapes clés du procédé	Niveaux de température requis	Récupération et valorisation de chaleur perdue				Intégration EnR			Ruptures de procédés			
		Buées de séchage	Condensation de groupes froids	Fumées de chaudière	Fumées de fours	Géothermie basse énergie	Solaire thermique	Biomasse solide / CSR	Électrification / hybridation électrique	Combustion H2 (électrification indirecte)	CCS	Autres ruptures de procédé
9 – Plâtre												
Cuisson du plâtre												
Séchage du plâtre												
10 – Sucre												
Diffusion du sucre dans de l'eau chaude depuis les cossettes	80°C											
Épuration avec de la chaux vive - Préchauffage	85°C											
Épuration avec de la chaux vive - 2e carbonatation	95°C											
Évaporation	130°C											
Évaporation - dernier évaporateur	85°C											
Cristallisation												
11 - Terre cuite / Céramique												
Séchage	80°C à 150°C											
Cuisson	950°C à 1700°C											
12 - Textile												
Blanchiment	60 - 100°C											
Teinture	60 - 100°C											
Traitements d'apprêt	< 200°C											
Lavage	60 - 100°C											
Séchage	< 200°C											
Thermofixation												
13 - Verre												
Fusion - Verre creux	1300-1550°C											
Fusion - Verre plat												
Fusion - Décarbonatation carbonates	1300-1550°C											
Traitement de surface												
Recuison	600°C											

C. Ruptures de procédés

11. Les ruptures de procédés permettent de décarboner lorsque la transition de l’approvisionnement énergétique est inefficace. Elles concernent en particulier les émissions « chimiques », liées à la « recette » du procédé. Ces ruptures technologiques demandent en général des efforts financiers importants en R&D et en ingénierie, ce qui peut encourager les industriels à traiter le sujet en filière.
12. L’électrification ou l’hybridation électrique directe, la combustion d’hydrogène et le CCS sont des formes de ruptures de procédés. Au-delà de ces leviers, certains projets sont en cours de développement dans certains secteurs. On en fait un panorama dans le **Tableau 3**.

Tableau 3. Ruptures de procédé sectorielles hors électrification, combustion H2 et CCS

Aluminium primaire	Anode inerte
	Anode en carbone issu de biomasse
Ammoniac	Production d'ammoniac par réduction de N ₂ O
	Synthèse directe à partir de l’eau et de l’air sans production intermédiaire d’hydrogène
Dichlore	Valorisation de l'hydrogène co-produit (9% restent non valorisés aujourd’hui)
	Retrofit de la technologie membrane (cathode dépolarisée à oxygène)
Éthylène et plastiques	Synthèse d'alcènes à partir de CO ₂ et d'hydrogène décarboné
	Bioéthylène par déshydratation du bioéthanol
	Recyclage chimique
Acier (forge et fonderie)	Injection d’hydrogène de source renouvelable ou de biomasse gazéifiée comme agent réducteur à la place du coke dans le haut fourneau
	Production de minerai préréduit (DRI) à l’hydrogène de source renouvelable

Sources : Interne CSF NSE, ALLICE ADEME

13. Afin de décarboner l’industrie française avec des solutions à fort contenu local, le Comité stratégique de filière des Nouveaux Systèmes Energétiques porte la démarche Je-decarbone (je-decarbone.fr) en partenariat avec l’alliance ALLICE et le CEA, avec le soutien de l’ADEME et en lien étroit avec l’État.

Annexe 7 - Compétences et Emploi

A. Définitions et méthode

1. Les emplois environnementaux sont définis comme « connexes à la production »²⁶ dans la nomenclature retenue pour cette étude (PCS-2003). Ces fonctions ont trait aux questions énergétiques, traitement des pollutions, contrôle des risques environnementaux. Il est possible de distinguer 2 niveaux d'expertise : les cadres et les techniciens.
2. Il convient de noter que la nomenclature statistique actuelle (PCS-2021) agrège ces emplois aux fonctions de production principales d'une entreprise. Cette agrégation de catégories conduit à des imprécisions dans le suivi du nombre ainsi que de la part d'emplois environnementaux dans l'industrie.
3. Les figures et statistiques présentées dans cette annexe ont été réalisées à l'aide de la nomenclature PCS-2003 qui propose un degré de précision supérieur.

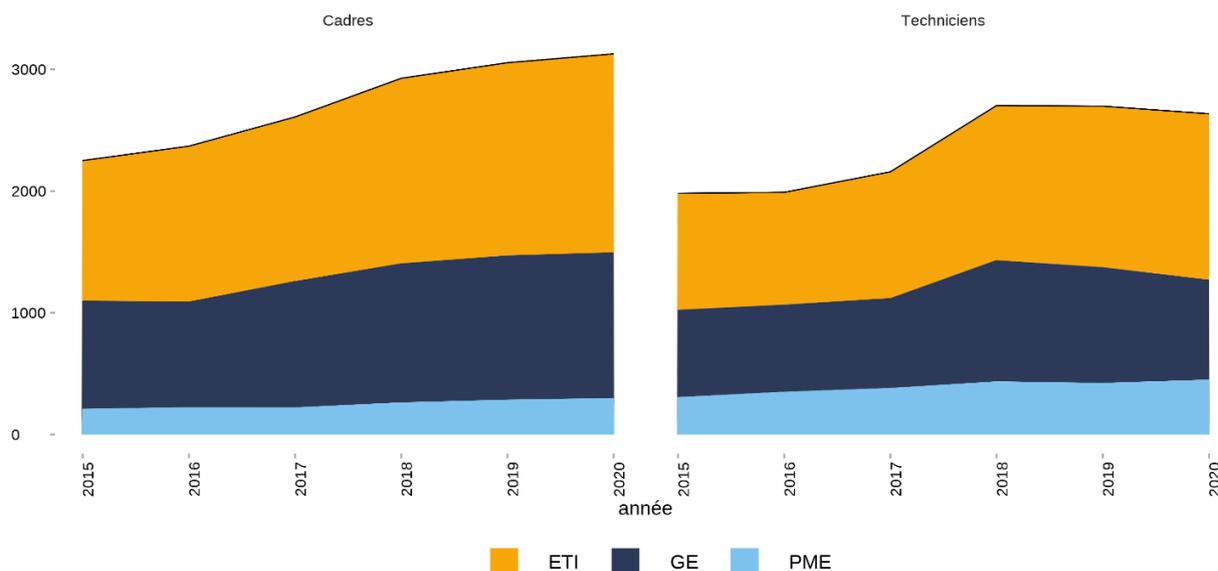
B. L'emploi environnemental croît dans l'industrie entre 2015 et 2020, surtout pour les ETI

Évolution du nombre d'emplois environnementaux dans l'industrie entre 2015 et 2020 par catégorie d'entreprise

4. Les ETI représentent une part importante des emplois environnementaux de l'industrie manufacturière. Comme le montre la **Figure 1**, elles contribuent pour environ la moitié des effectifs, tous secteurs confondus.

²⁶Nomenclature PCS-2003, disponible sur le site de l'INSEE.

Figure 1 : Suivi des équivalents temps plein environnementaux dans l'industrie manufacturière entre 2015 et 2020 par catégorie d'entreprise



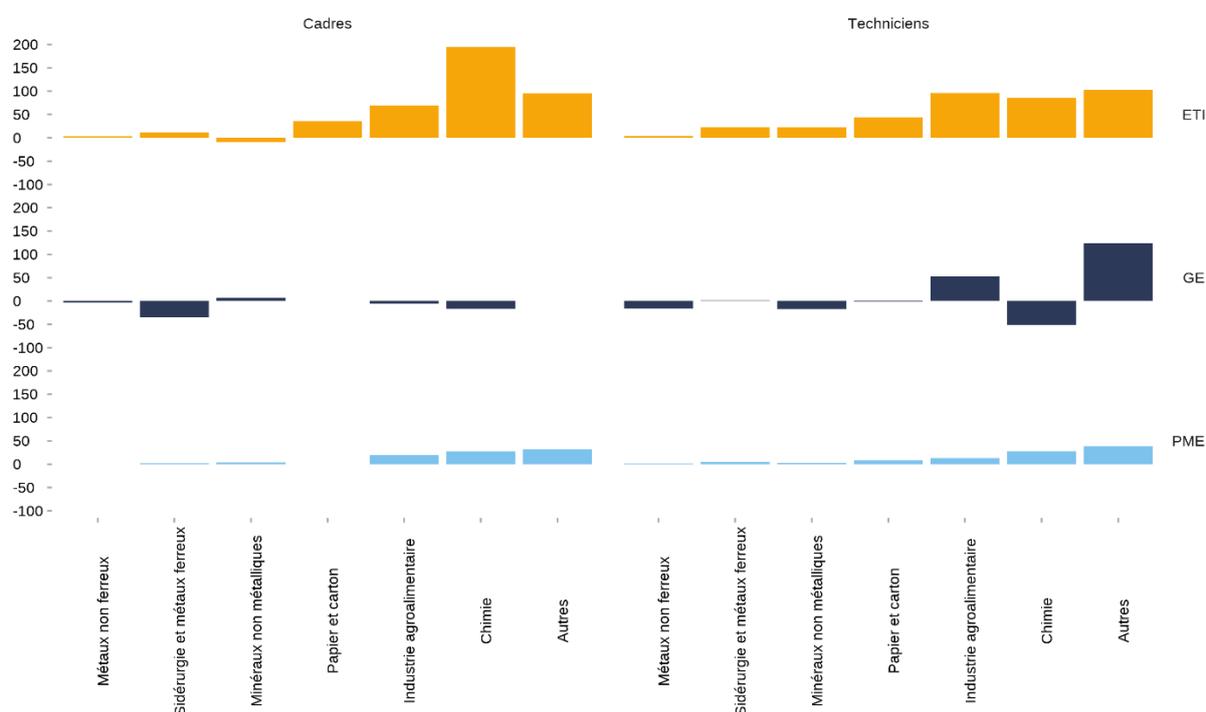
Source : DADS, FARE.

- Les emplois environnementaux sont globalement en croissance (+ 36,16 % entre 2015 et 2020). Mais cette évolution doit être différenciée entre catégories d'entreprise : 42,04 % d'augmentation pour les ETI, 25,72 % pour les GE et 44,58 % pour les ETI, tous postes confondus.

Delta observé entre 2015 et 2020 par secteur et catégorie d'entreprise

- Sur la **Figure 2** sont présentées les évolutions par secteur pour chaque type d'emploi environnemental entre 2015 et 2020. En orange sont représentées les ETI, en bleu clair les PME, et les GE en bleu foncé.

Figure 2 : Différence en EQTP des emplois environnementaux entre 2015 et 2020 par secteur et catégorie d'entreprise.



Source : DADS, FARE

7. Les ETI ont en règle générale augmenté leurs effectifs dans les emplois environnementaux.
8. Sur cette figure sont présentées les évolutions par secteur pour chaque type d'emploi environnemental entre 2015 et 2020. En orange, les ETI, en bleu clair, les PME et en bleu foncé les GE. L'augmentation la plus importante s'observe dans le secteur de la chimie qui gagne environ 250 équivalents temps plein sur la période. Ensuite viennent les autres secteurs manufacturiers et enfin l'industrie agroalimentaire, qui ont vu une augmentation d'environ 200 et 150 équivalents temps plein sur la période.
9. Pour les GE, on observe généralement une stagnation voire une diminution de l'emploi environnemental au sein des différents secteurs, à l'exception des autres secteurs manufacturiers où l'on voit une augmentation de 150 EQTP sur la période. Les ETI ont quant à elles connu une augmentation modérée du nombre d'emplois environnementaux sur la période.

Part des emplois environnementaux en 2018 pour les entreprises manufacturières.

10. Enfin, nous pouvons présenter pour l'année 2018 la part des emplois environnementaux dans l'emploi total de chaque catégorie d'entreprise et par secteur dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Part des emplois environnementaux dans l'emploi total par secteur et catégorie d'entreprise en 2018

	ETI	GE	PME
Autres	0,20 %	0,21 %	0,08 %
Chimie	0,56 %	0,54 %	0,27 %
Industrie agroalimentaire	0,19 %	0,17 %	0,07 %
Métaux non ferreux	0,63 %	1,02 %	0,41 %
Sidérurgie et métaux ferreux	0,42 %	0,74 %	0,16 %
Papier et Carton	0,23 %	0,28 %	0,07 %
Minéraux non métalliques	0,27 %	0,58 %	0,11 %

Source : DADS, FARE

11. Au sein de chaque secteur, la part des emplois environnementaux est généralement plus grande pour les GE que pour les ETI ou PME, sauf pour la chimie, et l'industrie agroalimentaire.
12. Les emplois environnementaux représentent une plus faible part de l'emploi des PME, cela est notamment dû à la faible représentation des cadres des métiers environnementaux dans ces entreprises.



Chaire de Recherche et d'Enseignement sur les ETI



Pierre Fleckinger, titulaire
Antoine Prévet, directeur exécutif

etilab@minesparis.psl.eu
<https://etilab.minesparis.psl.eu/>