

Document de travail n° 90

Compléments

Faire de la décarbonation
un levier de croissance

Ce document de travail a été réalisé par Michel DIDIER, Gilles KOLÉDA, Raphaël TROTIGNON

Rexecode

COMITÉ DE DIRECTION

Denis FERRAND, directeur général
Michel DIDIER, conseiller spécial
Olivier REDOULÈS, directeur des études
Charles-Henri COLOMBIER, directeur de la conjoncture
Raphaël TROTIGNON, responsable du pôle énergie-climat

CONJONCTURE ET PRÉVISIONS

Jean-Alain ANDRIVON : Etats-Unis, Royaume-Uni, Japon
Tél. 01 53 89 20 75 - jaandrivon@rexecode.fr
Charles-Henri COLOMBIER : Pétrole, Zone euro, Allemagne, Italie
Tél. 01 53 89 20 77 - hcolombier@rexecode.fr
Denis FERRAND : France, Espagne
Tél. 01 53 89 20 86 - dferrand@rexecode.fr
Anthony MORLET-LAVIDALIE : pays émergents
Tel. 01 53 89 20 96 - amorlet-lavidalie@rexecode.fr

ETUDES ET MODÉLISATION

Olivier REDOULÈS : France, politique économique, études sectorielles, marché du travail
Tél. 01 53 89 20 87 - oredoules@rexecode.fr
Pierre ANDREWS : politique économique - pandrews@rexecode.fr

POLE ENERGIE CLIMAT

Michel DIDIER : Partenaires, programme
Raphaël TROTIGNON : Etudes coûts efficacité
Tél. 01 53 89 20 76 - rtrotignon@rexecode.fr
Gilles KOLÉDA : Modèles, enjeux macroéconomiques
Tél. 01 53 89 20 81 - gkoleda@rexecode.fr
Guillaume ALLART : Investissement industriel : 01 53 89 20 81- gallart@rexecode.fr

SYSTÈMES D'INFORMATION

Murielle PREVOST - directrice des systèmes d'information - Tél. 01 53 89 20 83 - mprevost@rexecode.fr

STATISTIQUES

Meriem TOUILI - Tél. 01 53 89 20 95 - mtouili@rexecode.fr

DOCUMENTATION - INFORMATIQUE - SITE WEB

Fabienne BESSON-LHOSTE - Tél. 01 53 89 20 92 - fbesson-lhoste@rexecode.fr
Sylvie FOUTRIER - Tél. 01 53 89 20 98 - sfoutrier@rexecode.fr

ADMINISTRATION ET GESTION

Administration générale - Tél. 01 53 89 20 99
Françoise SAINT-LOUIS : secrétariat et publications, diffusion adhérents - Tél. 01 53 89 20 89 - fsaint-louis@rexecode.fr

CONSEIL D'ADMINISTRATION

PPrésident : Pierre GADONNEIX
Invités permanents : Jacques-Henri DAVID : Président d'honneur ; Michel DIDIER : Président d'honneur
Vice-président : Michel CICUREL ; Trésorier : Antoine GENDRY
Administrateurs : Ghislaine BAILLY, Olivier COSTA de BEAUREGARD, Pierre-André de CHALENDAR, Christian DARGNAT,
Xavier FONTANET, Olivier KLEIN, Fabienne LECORVAISIER, Hubert MONGON, Henri MOREL, Laurence PEYRAUT,
Garance PINEAU, Michel de ROSEN, Olivier SALLERON, Samuel TUAL, Arnaud VAISSIÉ, Pierre VERGRIETE, Amaury de WARENGHIEN

Centre de Recherche pour l'Expansion de l'Economie et le Développement des Entreprises

Rexecode : association régie par la loi du 1^{er} juillet 1901 - Siret : 784 361 164 00030 - APE 9412Z
Siège social : 24 place du Général Catroux - 75017 PARIS - Tél. (33) 01 53 89 20 89 - www.rexecode.fr - www.twitter.com/Rexecode

Faire de la décarbonation un levier de croissance

Annexe 1	
Le fonctionnement du système d'échange de quotas d'émissions dans l'Union européenne	3
Annexe 2	
Les grandes familles de technologies de la transition énergétique	13
Annexe 3	
Les chiffres clés des émissions par région	21
Annexe n° 4	
Les dispositions au Plan national d'action climatique (avant-projet) . . .	23
Annexe 5	
Le plan France 2030 et la loi industrie verte	25

Ce document de travail est disponible en ligne sur le site de Rexecode
<http://www.rexecode.fr/public/Analyses-et-previsions/Documents-de-travail>

Annexe 1

Le fonctionnement du système d'échange de quotas d'émissions dans l'Union européenne

L'Union européenne a mis en place depuis 2005 un système de permis d'émissions négociables (en français : système d'échanges de quotas d'émissions ou SEQE, en anglais : *Emissions Trading Schemes* - ETS). Ce système n'exclue pas d'autres mesures de niveau européen, ni des politiques nationales, mais il constitue la pierre angulaire de la politique énergie-climat des 27 pays membres de l'Union européenne.

La base légale principale du Seqe-UE français est la Directive 2003/87, transposée au niveau national dans le code de l'environnement. Le système consiste : 1. à fixer au niveau de l'Union un plafond annuel d'émissions, qui diminue dans le temps, 2. à fixer des règles générales d'attribution de droits d'émissions (en quotas) aux acteurs, 3. à imposer aux assujettis de mesurer leurs émissions et à en rendre compte annuellement, 4. à imposer aux assujettis présenter annuellement un nombre de permis (quotas) égal à ces émissions vérifiées, sous peine de pénalités non-libératoires.

On entend par quota l'autorisation à « émettre une tonne d'équivalent-dioxyde de carbone au cours d'une période spécifiée, valable uniquement pour respecter les exigences de la présente directive, et transférable conformément aux dispositions de la présente directive. Et par « émissions », le rejet dans l'atmosphère de gaz à effet de serre, à partir de sources situées dans une installation, ou à partir d'un aéronef ».

Les autorisations d'émissions sont attribuées par les instances de l'Union gratuitement, ou bien vendues aux enchères aux exploitants qui peuvent les recevoir ou les acquérir (et les céder) sur un marché boursier créé à cette fin.

Le prix du quota d'émission se forme sur le marché pour équilibrer l'offre (le nombre de quotas sur le marché, lié principalement au niveau de l'ambition climatique) et la demande, qui correspond aux émissions des assujettis. Les assujettis sont incités à réduire leurs émissions car les émissions de CO₂ ont un coût économique. Il est rentable d'engager une action pour réduire les émissions dès lors que le coût de cette action est inférieur au prix du quota d'émission.

Depuis 2003, les règles ont évolué et plusieurs réformes majeures du marché carbone ont été adoptées, dont la dernière en date en avril 2023 dans le cadre du paquet « *Fit for 55* ». Cette réforme comprend notamment :

- Un objectif de réduction des émissions de GES à horizon 2030 de -62 % par rapport à 2005 sur les secteurs couverts par le Seque-UE (contre -43 % antérieurement) ;
- Pour les installations industrielles, une extinction progressive des quotas gratuits pour certains secteurs industriels (acier, ciment, aluminium, engrais, hydrogène) en lien avec la mise en œuvre d'un Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF) ; la mise en œuvre de conditionnalités environnementales des quotas gratuits ; une modification du champ d'application visant à favoriser les technologies bas-carbone.
- Pour l'aviation : une extinction progressive entre 2024 et 2026 des quotas gratuits historiques ; l'introduction de quotas gratuits visant à soutenir l'utilisation de carburants d'aviation durables, ainsi que diverses mesures spécifiques.
- Une inclusion du transport maritime dans le système des quotas.

Le Seque-UE s'applique à la plupart des installations industrielles, depuis 2013 aux compagnies aériennes, et depuis 2024 aux compagnies maritimes.

a. Installations industrielles

Les secteurs concernés sont notamment, la production d'électricité et de chaleur, l'industrie lourde, comme les raffineries, la production d'acier, de ciment, de produit chimique, d'aluminium, de verre, de céramique, de papier-carton. Le périmètre concerne les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), mais également les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) pour certains secteurs chimiques et d'hydrocarbures perfluorés (PFC) pour l'aluminium.

Environ 13 000 installations sont incluses dans le Seque-UE à l'échelle de l'Union européenne et environ 1 000 en France. En 2022, les émissions couvertes par le Seque-UE pour les installations s'élevaient à 1 285 MtCO₂ à l'échelle de l'UE (sur un total de 3 500 MtCO₂ environ), dont 85 MtCO₂ en France et 354 MtCO₂ en Allemagne.

b. Aviation

Initialement prévu pour l'ensemble des vols au départ ou à l'arrivée de l'Espace Economique Européen, le périmètre du Seque-UE appliqué à l'aviation a été réduit à un périmètre intra-européen en 2013 (décision dite « *stop the clock* »).

Le Seque couvre environ 1 600 compagnies d'aviation à l'échelle européenne. Environ 400 sont attribuées à la France. Le Seque a couvert 49,2 MtCO₂ d'émissions issues de l'aviation en 2022 dans l'UE, dont 3,2 MtCO₂ émises par les compagnies attribuées à la France. Air France et Transavia représentaient en 2022 85 % de ces émissions.

c. Maritime

Le Seque-UE s'applique à partir de 2024 aux compagnies maritimes. Il concerne comme l'intégralité des émissions des voyages entre deux ports de l'espace économique européen (EEE) ou des émissions à quai, et pour 50 % des émissions des voyages entre un port de l'EEE et un port en dehors de cet espace ;

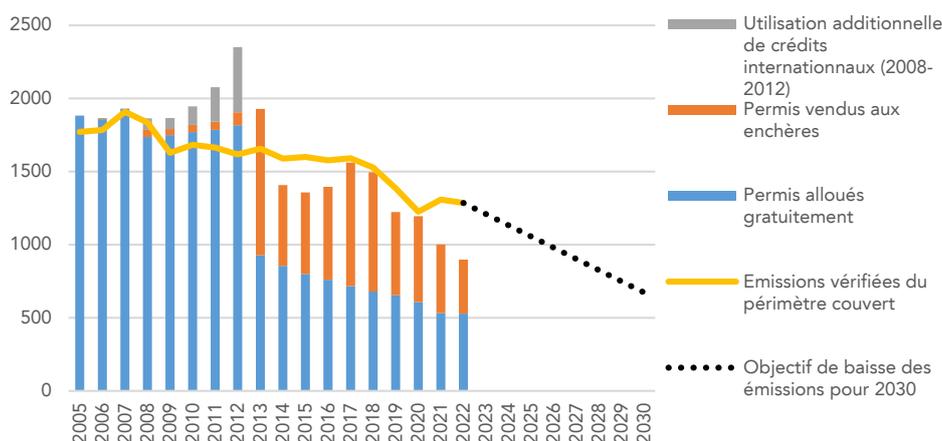
Le Seque en France

En 2022, le Seque-UE couvre 1 059 installations qui ont émis 85 MtCO₂, soit environ 20 % des émissions territoriales de la France. Cette proportion est plus faible que la moyenne européenne (le Seque couvre environ 40 % des émissions de l'UE) du fait du mix électrique essentiellement décarboné de la France.

L'industrie (hors production d'électricité et de chaleur) représente la moitié des émissions : 44 MtCO₂ (52 % des émissions de l'industrie sont couvertes par le Seque-UE). 41 millions de quotas gratuits ont été alloués gratuitement à l'industrie en 2022 (d'une valeur de plus de 3 Mds€). Les 50 sites industriels les plus émetteurs représentent les deux tiers des émissions, hors production électrique.

Le plafond d'émissions du Seque-UE reflète l'ambition climatique de cet instrument, car il détermine la quantité maximale autorisée d'émissions de gaz à effet de serre des secteurs concernés.

Evolution de l'offre de permis (gratuits + enchères) et de la demande de permis (émissions vérifiées) depuis 2005



Source : Commission européenne

© Rexecode

La trajectoire du plafond d'ici 2030 vise à atteindre une réduction d'émissions de -62 % en 2030 par rapport au niveau de 2005 pour les installations fixes, l'aviation et le maritime.

Lors de la phase III (2013-2020), le plafond pour les installations fixes diminuait selon un facteur linéaire de réduction de 1,74 % par an, augmenté à 2,2 % par an à partir de 2021 par la révision du Seqe adoptée en 2018. La réforme dans le cadre du paquet *Fit for 55* augmente le facteur linéaire de réduction à 4,3 % par an de 2024 à 2027 et à 4,4 % de 2028 à 2030. Le plafond est « rebasé » à deux reprises par une diminution de 90 millions de quotas en 2024 et 27 millions de quotas en 2026, cependant pour prendre en compte l'inclusion du secteur maritime, le plafond est augmenté de 78,4 millions de quotas en 2024.

Le plafond de l'Union européenne pour 2024 concernant les installations fixes et le maritime est fixé à 1 386 051 745 quotas. La réduction annuelle correspondant au facteur de réduction linéaire (4,3 % par an) est de 87 924 231 quotas.

L'évolution du prix des quotas

Prix du quota dans le Seqe



Source : Rexecode d'après Intercontinental Exchange, prix à terme des contrats à échéance en décembre de l'année suivante.

© Rexecode

Après un démarrage à un niveau moyen autour de 20 €/tCO₂ les premières années, le prix des quotas est ensuite resté faible pendant une longue période (2012-2018), autour de 5 €, à cause d'un déséquilibre du marché entre l'offre (la quantité totale de permis disponible et anticipée sur quelques années, qui est fixée à l'avance dans les textes européens) et la demande (les émissions de gaz à effet de serre, plus basses qu'attendues en raison notamment de la crise économique de 2008-2009). Associée à la révision de la directive pour relever l'ambition du dispositif de la phase IV (2021-2030), la création d'une réserve de stabilité du marché, active à partir de 2019, a conduit à une multiplication par quatre du prix du quota en un an, entre septembre 2017 et septembre 2018. Le prix a ensuite fluctué entre 25 et 30 €, avec une baisse importante mais temporaire pendant la crise du Covid au printemps 2020.

En fin d'année 2020, le prix a à nouveau connu une tendance haussière marquée, portée par l'anticipation de sa réforme dans le cadre du Pacte Vert, avec encore une multiplication du prix par près de quatre en un peu plus d'un an, entre novembre 2020 et février 2022, atteignant près de 100 €. Le prix a ensuite fluctué autour de 70-90 € de février 2022 à octobre 2023. D'octobre 2023 à mars 2024, il a baissé continuellement pour se situer actuellement légèrement en-dessous de 60 €.

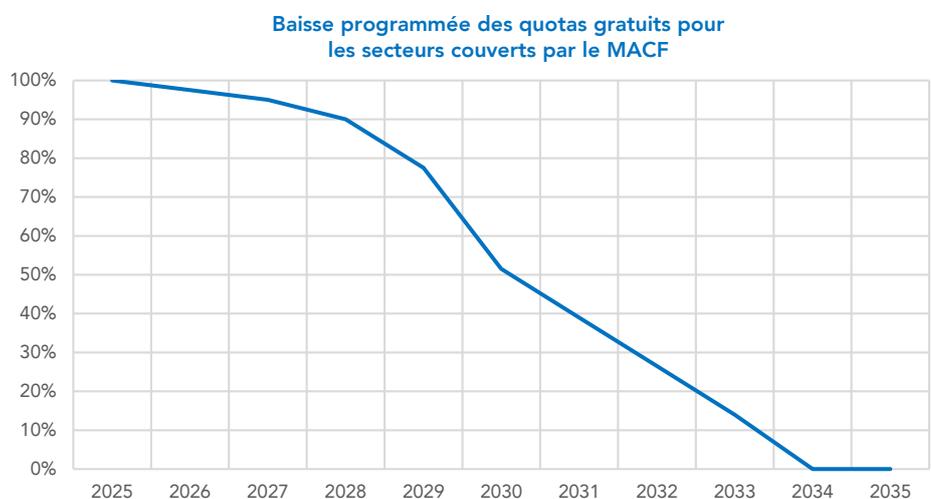
Allocation gratuite de quotas pour les installations

Dans ses débuts, le marché du quota a été quasiment intégralement alimenté par des quotas gratuits (99 % entre 2005 et 2007, puis 95 % entre 2008 et 2012). A partir de 2013, les producteurs d'électricité ne reçoivent plus d'allocation gratuite de quotas et la part de quotas gratuit passe à 48 %.

La mise aux enchères est la méthode par défaut pour allouer des quotas d'émission aux entreprises participant au Seque-UE. Cependant, dans les secteurs autres que la production d'électricité, certains quotas continuent d'être alloués gratuitement jusqu'en 2030 et au-delà, et la transition vers la mise aux enchères se déroule progressivement. Aucun quota gratuit n'est alloué à la production d'électricité. Pour les autres secteurs, les secteurs ou sous-secteurs considérés comme à risque de fuites de carbone reçoivent le maximum possible d'allocation gratuite (facteur d'exposition aux fuites de carbone égal à 100 %) dans la limite du niveau du référentiel (*benchmark*), tandis que les autres secteurs ont un rabais significatif et ont leur allocation progressivement réduite à zéro en 2030. La poursuite de l'allocation gratuite permet à l'UE de poursuivre des objectifs ambitieux de réduction des émissions tout en protégeant les industries soumises à la concurrence internationale contre les fuites de carbone. La mise en œuvre du Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières a vocation à remplacer progressivement l'allocation gratuite de quotas pour permettre, en théorie, de renforcer le signal-prix du carbone tout en limitant les risques de fuites de carbone (renvoyer vers notre repère MACF).

Les règles d'allocation gratuite sont définies dans un règlement (règlement FAR 2019/331 pour *Free Allocation Rules*).

L'allocation gratuite pour chaque installation est calculée en utilisant des référentiels (ou benchmarks en anglais) de gaz à effet de serre développés pour chaque produit, dans la mesure du possible. Il existe actuellement 54 référentiels. Les secteurs soumis au MACF ont leur allocation gratuite progressivement réduite à partir de 2026, pour atteindre zéro allocation gratuite en 2034 gratuits. Le graphique ci-dessous illustre le rythme de l'extinction progressive des allocations de quotas gratuits.



Source : Commission européenne

© Rexecode

La mise aux enchères des quotas

La mise aux enchères de quotas est la méthode par défaut de mise sur le marché depuis 2013. Les quotas sont mis aux enchères, sauf s'ils sont alloués gratuitement ou placés dans la Réserve de stabilité du marché. Les quotas mis à disposition du Fonds pour l'innovation et du Fonds pour la modernisation sont également mis aux enchères. Un peu plus de la moitié des quotas du Seqe-UE sont mis aux enchères

Pour l'aviation, 15 % du plafond était mis aux enchères jusqu'à 2023, et d'ici 2026 l'intégralité des quotas sera mis aux enchères (fin des allocations gratuites), à l'exception de 20 millions de quotas réservés pour encourager l'utilisation de carburants durables d'aviation.

Les enchères sont régies par un règlement européen dédié pour s'assurer qu'elles sont menées de manière ouverte, transparente, harmonisée et non discriminatoire. Actuellement, *European Energy Exchange (EEX)* basée à Leipzig est la plateforme d'enchères commune. Tous les Etats participants au Seqe-UE à l'exception de la Pologne et de l'Allemagne qui disposent de leur propre plateforme mettent aux enchères leurs allocations sur la plateforme d'enchères commune. Les enchères se déroulent toute l'année au rythme d'environ trois par semaine (d'un volume de quelques millions de quotas à chaque enchère).

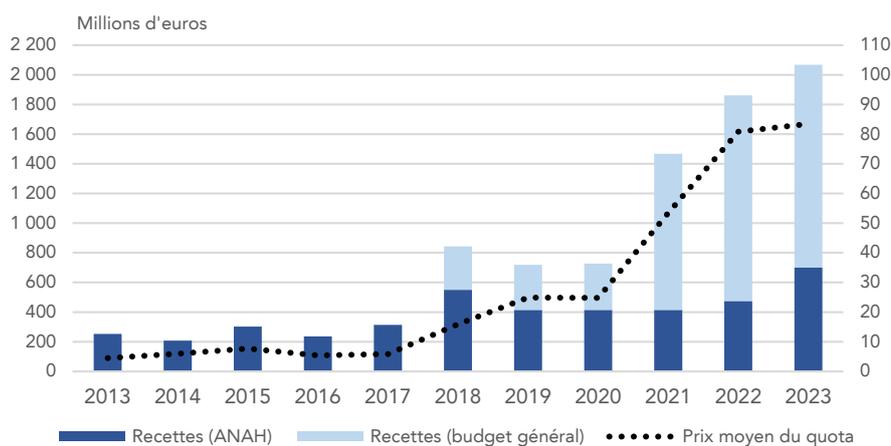
L'utilisation des recettes d'enchères

La répartition des enchères entre les Etats Membres est déterminée par une clé de répartition prédéfinie, s'appuyant principalement sur les émissions historiques du Seqe-UE. Elle est de 6,1 % pour la France en ce qui concerne

les quotas généraux (la grande majorité des volumes d'enchères) et de 11,3 % en ce qui concerne les quotas aviation. La part relativement faible de la France (en regard par exemple de la part de son revenu national brut, aux alentours de 17 %) s'explique par son mix électrique essentiellement décarboné.

Depuis 2013, les lois de finances prévoient que les revenus des enchères de la France soient affectés à l'Agence nationale de l'habitat (ANAH) dans la limite d'un plafond, le reste étant versé au budget général de l'Etat. Ce plafond a fait l'objet de plusieurs modifications, et se situe en 2023 et 2024 à 700 M€. Les recettes ont fortement augmenté ces dernières années avec l'augmentation du prix du carbone, s'élevant à 2,1 Mds€ en 2023. Les revenus affectés à l'ANAH contribuent depuis 2022 au programme MaPrimRénov. A partir de 2024, la directive Seqe obligera de façon contraignante les Etats Membres à flécher 100 % des recettes d'enchères ou « l'équivalent en valeur financière de ces recettes » vers des dépenses pour le climat.

Recettes des enchères de quotas de CO2 de la France



Sources : Agence France Trésor, Ministère de la transition écologique, Intcontinental Exchange

© Rexecode

Fonds pour l'Innovation

Une partie des recettes d'enchères finance le Fonds pour l'Innovation (par l'article 10 bis paragraphe 8 de la Directive Seqe). Ses modalités de fonctionnement sont précisés dans un règlement européen dédié. Le fonds pour l'Innovation de la phase IV du Seqe (2021-2030) vise à soutenir des projets innovants, situés au stade de leur premier développement commercial, dans les secteurs soumis au Seqe : industries énérgo-intensives, énergies renouvelables, stockage de l'énergie, captage et stockage du carbone, mais également depuis la réforme de 2023 les secteurs éligibles au bâtiment, aux transports routier, maritime et ferroviaire et à la production de carburants bas-carbone pour l'aviation, le transport ferroviaire et routier. Il permet de soutenir, via un appel à projets annuel, jusqu'à 60 % des CAPEX et OPEX additionnels

pour les projets de grande ampleur (coûts d'investissements supérieurs à 7,5 M€), et jusqu'à 60 % des CAPEX pour les petits projets (coûts d'investissement inférieurs à 7,5 M€). Depuis la réforme de 2023, il permet de recourir à des mécanismes d'appel d'offres concurrentiels avec un soutien pouvant aller jusqu'à 100 % des coûts, tels que les contrats carbone pour différence .

Du fait de ces critères sur l'innovation et la maturité, le fonds d'innovation s'adresse à des projets qui en sont au stade de la première démonstration commerciale, précédant un déploiement à plus large échelle. Il s'agit de partager le risque avec les porteurs de projets pour aider à la démonstration de projets inédits et hautement innovants. Le Fonds est géré par la Commission, qui a délégué certaines tâches à l'agence exécutive CINEA (*Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency*).

Ce Fonds apporte des financements importants et durables pour le développement de nouvelles technologies industrielles, complémentaire des financements nationaux. La France en est un des premiers bénéficiaires, pour des projets de recyclage de batterie Litium-Ion de véhicules électriques.

Capture, transport et séquestration

Chaux et Dolomies du Boulonnais dans les Hauts-de France, en partenariat avec Air Liquide, pour un projet de capture et séquestration de carbone au moyen de la technologie CryoCap (125 M€ d'aides) ;

Un portail permet de naviguer parmi les différents projets lauréats.

Régulation du marché

Au début des années 2010, un excédent de quotas d'émissions s'est accumulé dans le marché. Cela a entraîné une baisse des prix du carbone, avec un prix aux alentours de 5 € sur une longue période ; et donc une incitation plus faible pour réduire les émissions.

Les colégislateurs ont pris plusieurs mesures à court et long terme pour remédier à cet excédent structurel. Ils ont diminué les volumes d'enchères.

Ils ont en outre adopté (fin 2015) une réserve de stabilité du marché (*market stability reserve* ou MSR en anglais) entrant en fonctionnement en janvier 2019. Le fonctionnement de cette réserve a pour but d'améliorer la résilience du système face aux chocs externes, en ajustant le nombre de quotas mis sur le marché par les enchères.

Le registre de l'Union

Le registre de l'Union est une base de données électronique normalisée et sécurisée contenant des éléments de données communs permettant de suivre la délivrance, la détention, le transfert et l'annulation des quotas, selon le

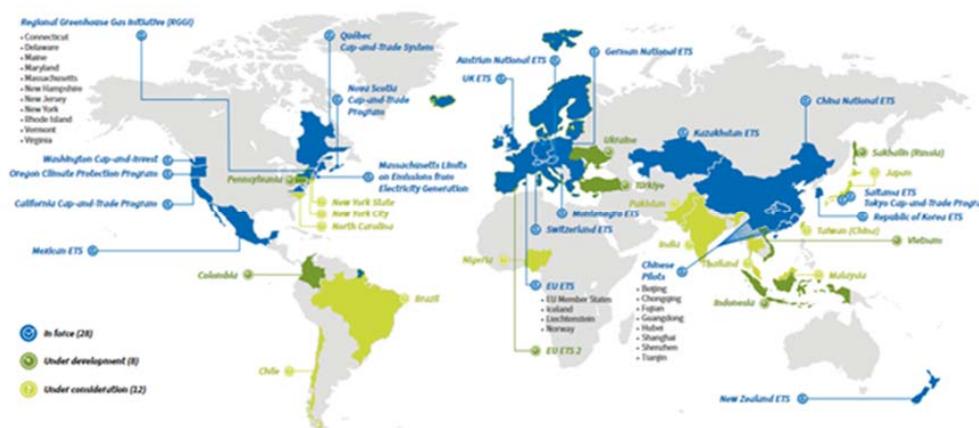
cas, et qui garantit l'accès du public et la confidentialité appropriée des données. Il garantit l'absence de transferts incompatibles avec les obligations découlant de la directive Seque, et assure le suivi de la propriété des quotas détenus dans des comptes électroniques, tout comme une banque tient un registre de tous ses clients et de leur argent.

Les opérations du Seque-UE ont été centralisées dans un registre unique de l'UE géré par la Commission européenne, dont les comptes d'utilisateur sont gérés par des administrateurs nationaux dans chaque Etat membre. Pour participer au Seque-UE, les entreprises ou les particuliers doivent ouvrir un compte dans le Registre de l'Union.

Le Registre consigne : la liste des installations, compagnies aériennes et compagnies maritimes couvertes par la directive Seque dans chaque pays, leurs émissions annuelles et leur allocation gratuite (concernant les installations et les compagnies aériennes), les comptes des entreprises ou des particuliers détenant des quotas, les transferts de quotas (« transactions ») effectués par les détenteurs de comptes, enfin la réconciliation annuelle des allocations et des émissions vérifiées, où chaque entreprise doit avoir rendu suffisamment de quotas pour couvrir toutes ses émissions vérifiées.

Marchés carbone et tarification carbone dans le monde

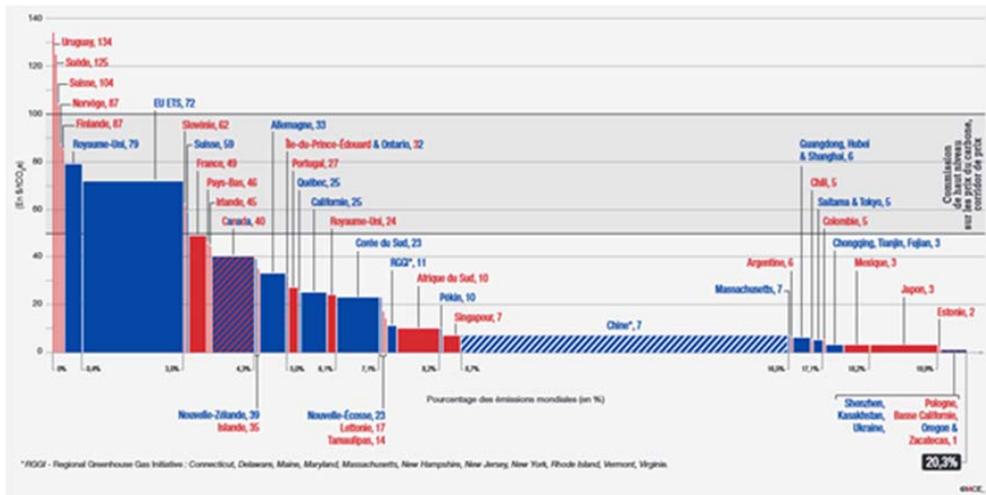
En janvier 2023 d'après le rapport annuel ICAP, 28 systèmes d'échanges de quotas d'émissions sont en vigueur au niveau national, supranational ou infranational, représentant 17 % des émissions mondiales. Une carte interactive des Seques est disponible sur le site.



Si on ajoute les taxes carbonées, d'après le *Carbon Pricing Dashboard* de la Banque Mondiale, 73 initiatives de prix du carbone sont mises en œuvre, dans 39 juridictions nationales et 33 juridictions subnationales, représentant 23 % des émissions mondiales.

L'Institut pour l'Economie du Climat synthétise également les mécanismes de tarification du carbone au niveau mondial dans ses comptes mondiaux du carbone (lien vers l'édition 2023).

L'éventail des prix du carbone observés de par le monde va de quelques euros à plus d'une centaine d'euros.



ICAP a également un outil, l'allowance price explorer, permettant de comparer de façon actualisée le prix du carbone dans différents systèmes d'échanges de quotas d'émissions.

Annexe 2

Les grandes familles de technologies de la transition énergétique

Les technologies de la transition énergétique (TTE) offrent une opportunité d'industrialisation pour la France. Afin de mobiliser ses ressources de façon pertinente, et bénéficier de la demande actuelle et à venir envers ces technologies, elle doit se positionner sur les technologies les plus porteuses.

Afin d'évaluer les opportunités offertes par ces technologies, il convient dans un premier temps de définir ce que sont ces technologies de la transition énergétique (TTE). Puis nous évaluons les opportunités qu'elles peuvent représenter pour l'UE en considérant d'une part les opportunités de marché, que nous approchons par les investissements ou les capacités futurs requis ; et d'autre part le positionnement actuel d'autres pays ou zones économiques sur ces technologies. Concernant la France, nous considérons également les cœurs de métiers d'une sélection illustrative de grands groupes français.

Il n'existe pas de définition précise et universelle des technologies de la transition énergétique. Des listes sont proposées par différents organismes. A partir des listes établies par l'Union Européenne¹ et l'AIE², Rexecode suggère la liste suivante :

- Production d'énergie solaire et photovoltaïque
- Production d'énergie Eolienne
- Production d'énergie nucléaire
- Piles à combustible et électrolyseurs
- Batteries
- Pompes à chaleur
- Capture et stockage du carbone
- Technologies du réseau électrique
- Biocarburants
- E-carburants
- Procédés industriels bas carbone

Le potentiel de marché des TTE

Nous retenons un scénario d'atteinte de la neutralité carbone au niveau mondial d'ici 2050. Ce scénario est cohérent avec les engagements de la France et de l'UE en matière de trajectoire d'émissions.

Selon ce scénario, l'évolution de l'investissement total en faveur de la transition énergétique présente une forte accélération d'ici 2030, atteignant un niveau 2 à 3 fois supérieur avant de connaître une stabilisation jusqu'en 2050. Le volume annuel des investissements d'ici 2030 s'établit autour de 4,8 T\$/an,

¹ [EU Net Zero Industry Act](#) - Draft version.

² AIE - [Energy Technology Perspectives 2023](#).

soit 22 % de l'investissement actuel, ou 16 % de l'investissement mondial en 2030, en retenant une croissance de 3 % par an et un taux d'investissement stable à 27 % du PIB.

Ces montants représentent l'ensemble des investissements et couvrent aussi bien les TTE, les infrastructures ou, de manière générale, les technologies déjà existantes. Concernant les TTE, nous envisageons d'une part le potentiel d'investissement (exprimé en capacités ou en valeur) d'ici 2030, ainsi que la part des projets déjà planifiés. La part restante représente donc une opportunité potentielle.

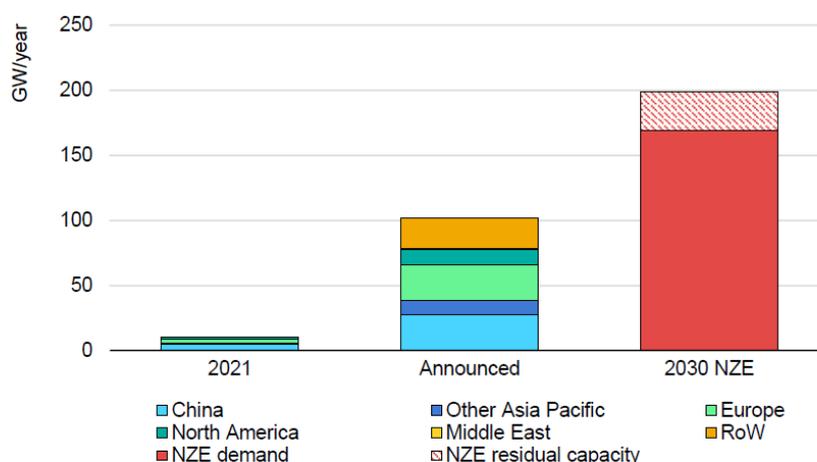
Piles à combustible et électrolyseurs

Selon le scénario de l'AIE, la production d'hydrogène est multipliée par 20 d'ici 2030, dont la moitié est prévue à aujourd'hui ou en service. L'Europe représente près de 30 % de ces capacités planifiées, au même titre que la Chine.

En termes de coûts d'investissement, le choix de technologie de production a une incidence significative. Les technologies actuelles, dites alcalines, présentent des CAPEX de l'ordre de 850 \$/GWe d'ici 2030³, pour un rendement énergétique attendu de l'ordre de 68 % en 2030. Mais cette technologie requiert une puissance stable, donc a priori peu compatible avec une production électrique intermittente non écrêtée. Les technologies alternatives, moins mûres, dites à membrane à proton et oxyde solide, présentent des coûts d'investissement respectifs de 1 500 \$/GWe et 2 800 \$/GWe pour des rendements énergétiques respectifs de 65 % et 80 %. L'investissement total requis d'ici 2030 s'échelonne de 250 B\$ à 696 B\$ dont la moitié sont déjà prévus.

³ AIE 2019 - *The Future of Hydrogen*.

Figure 4.12 Electrolyser manufacturing capacity by country/region according to announced projects and in the NZE Scenario



IEA. CC BY 4.0.

Notes: RoW = rest of world; NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario. Announced capacity includes existing capacity. The manufacturing capacity needed to meet projected demand in the NZE Scenario (NZE demand) is estimated assuming a utilisation rate of 85%. NZE residual capacity, thus, represents the manufacturing capacity that would remain unused, on average, which provides some flexibility to accommodate demand fluctuations.

Electrolyser manufacturing capacity is set to expand almost tenfold to more than 100 GW by 2030, but this would still cover only half of NZE Scenario requirements.

Source : Agence Internationale de l'énergie - *Energy Technology Perspectives 2023*.

Concernant les usages de l'hydrogène dans les transports, celles-ci ne devraient concerner que les transports lourds, la mobilité électrique basée sur des batteries apparaissant comme étant désormais la technologie dominante pour les véhicules légers. Le marché concerne donc potentiellement le remplacement des véhicules routiers lourds. L'AIE prévoit un besoin de 180 000 camions à hydrogène par an d'ici 2030, pour une capacité de production existante ou planifiée de 90 000.

Production d'énergie solaire et photovoltaïque

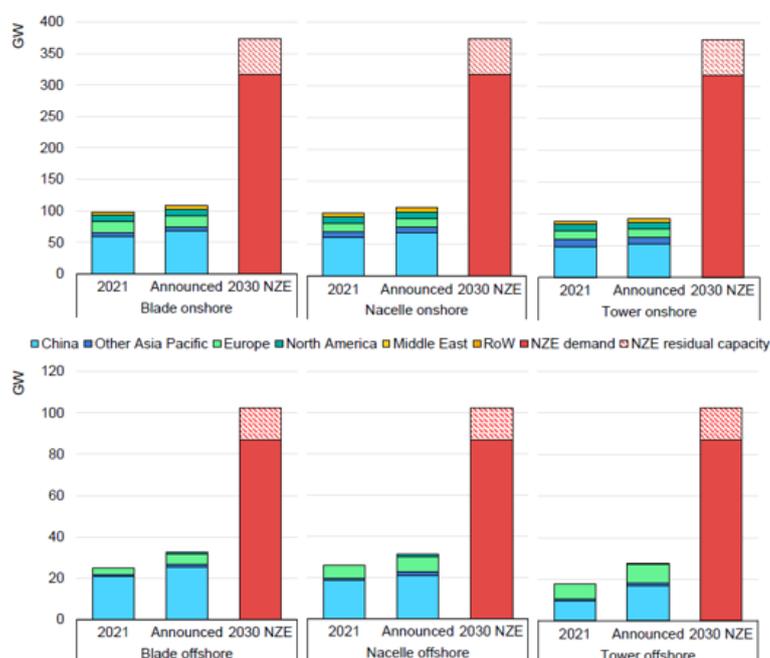
La production photovoltaïque devrait être multipliée par 5 d'ici 2030 selon une trajectoire net zéro. Une telle évolution implique un doublement des capacités de production, passant de 600 GW par an à 1 200 GW/an⁴. Ce marché est actuellement dominé par la Chine, laquelle produit plus de 90 % des galettes de silicium et 77 % des modules photovoltaïques. Par ailleurs, la Chine poursuit ses investissements de capacités dans cette filière, et il est attendu qu'elle maintienne sa domination dans la production future, laissant peu d'espace à des concurrents éventuels, d'ici 2030 comme d'ici 2050.

⁴ AIE - *World Energy Outlook 2023*.

Production d'énergie éolienne

La production d'énergie éolienne devrait être multipliée par 3 d'ici 2030. L'investissement correspondant est estimé à 70 B\$/an dont 65 restent à planifier. Si l'Europe reste un acteur significatif dans ce secteur, la Chine a néanmoins pris une position très importante à aujourd'hui sur l'ensemble des composants.

Figure 4.6 Wind power manufacturing capacity by component and country/region according to announced projects and in the NZE Scenario



Source : Agence Internationale de l'énergie - *Energy Technology Perspectives 2023*.

Production d'énergie nucléaire

Compte tenu des délais de construction et de mise en service de nouveaux réacteurs, notre analyse se concentre sur l'horizon 2050. En effet, la hausse attendue de la production nucléaire d'ici 2030, de l'ordre de 43 %, correspond principalement à des réacteurs déjà en construction.

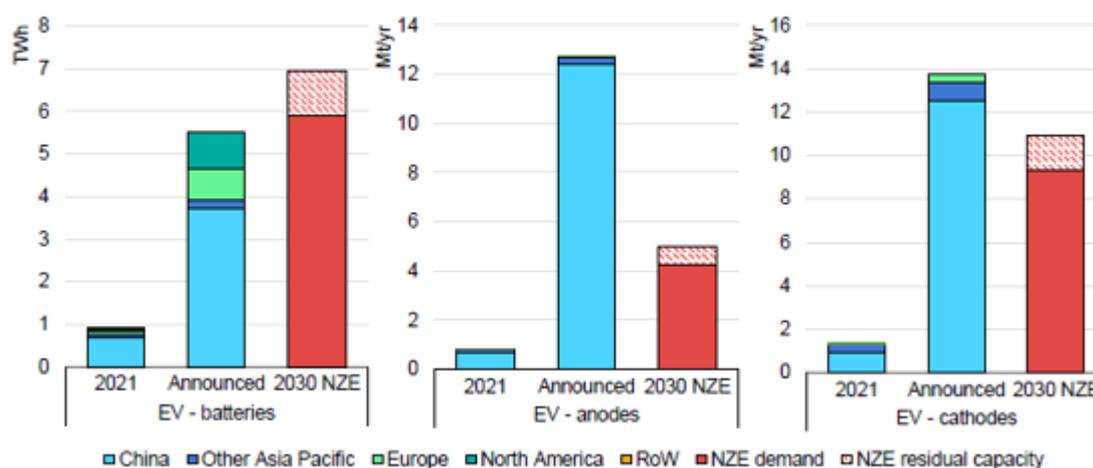
La production d'énergie nucléaire et les capacités correspondantes devrait être multipliée par 2,3 d'ici 2050 soit une hausse de 500 GW installés. Les coûts d'investissements estimés par l'AIE varient de 2 800 \$/kW en Chine à 5 100 \$/kW en Europe. Ces investissements sont pour la plus grande part localisés, sous la forme de grands chantiers. Une filière de petits réacteurs modulaires ou small modular reactors (SMR), lesquels sont produits en masse en usine puis assemblés sur place, pourrait offrir des perspectives d'export.

Batteries

Les besoins en batteries concernent principalement les véhicules électriques (VE) dont elles constituent un élément clef de la chaîne de valeur : de 25 % à 40 % du coût d'un VE. Leur rôle est aussi d'apporter de la stabilité au réseau électrique compte tenu de l'intermittence de l'éolien et du photovoltaïque, lesquels devraient représenter 20 % du mix énergétique mondial en 2030 et 41 % en 2050.

Les besoins en investissement sont estimés à 450 B\$ d'ici 2030, dont 338 B\$ sont déjà planifiés, principalement en Chine. La filière connaît une accélération des investissements annoncés, ouvrant la possibilité de surcapacités de production à l'horizon 2050. Ces surcapacités concernent déjà certains composants des batteries, les anodes et les cathodes.

Figure 4.8 Battery and component manufacturing capacity by country/region according to announced projects and in the NZE Scenario



Source : Agence Internationale de l'énergie - *Energy Technology Perspectives 2023*.

Pompes à chaleur

L'AIE estime les besoins à venir en capacités de production annuelle de pompes à chaleur à 460 GW d'ici 2030. Or, les capacités actuelles de production et les projets d'usines prévus représentent une capacité de l'ordre de 150 GW. Les capacités actuelles sont principalement concentrées en Chine. Un choix de positionnement se présente pour l'Europe et la France, entre la production de modules de taille réduite, destinés au chauffage des logements, et des modules de plus grande taille destinés à la chaleur industrielle.

Capture et stockage du carbone

Les besoins en capture et stockage du CO₂ sont estimés par l'AIE à 1,2 Gt/an en 2030 et 6,2 Gt/en en 2050, contre une capacité actuelle de 0,04 Gt/an. Ces projets sont localisés, car rattachés à des sites émetteurs existants, et les technologies mobilisées (séparation des gaz, compression, transport et injection) sont mûres. La maîtrise d'une technologie réside donc dans son déploiement coordonné là où se situent les besoins.

Technologies du réseau électrique

La transition énergétique implique une forte hausse de la part de l'électricité dans le mix énergétique, laquelle devrait être majoritairement fournie par des sources photovoltaïques et éoliennes. Or ces sources sont intermittentes et se caractérisent par de nombreuses installations de production de faible puissance unitaire. Ces développements vont conduire à des besoins matériels de renforcement du réseau, de son étendue et de sa capacité de transit. Les technologies sous-jacentes sont également mûres, l'enjeu est donc leur production et leur déploiement massif.

Biocarburants et biogaz

Cette famille de technologie regroupe les méthodes de production de carburants liquides et de gaz naturel à partir de biomasse, telles que la fermentation alcoolique (méthanol), l'estérification (biodiesel), la méthanisation (biogaz par fermentation), ou encore la pyrogazéification. Cette filière est contrainte par la disponibilité de la biomasse. la Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse⁵ estime que la biomasse supplémentaire mobilisable d'ici 2030 devrait s'élever à 8 Mtep.

E-carburants

Les e-carburants sont les carburants liquides obtenus à partir de monoxyde de carbone et d'hydrogène par le procédé Fischer-Tropsch. Le CO₂ capturé pourrait servir de source de monoxyde de carbone.

Les besoins en carburants liquides ainsi produits se trouvent notamment dans le secteur aérien, en substitution au kérosène d'origine fossile. Des projets pilotes existent en France, tandis que l'Observatoire Français des e-Fuels projette une capacité de production de 528 Mtep/an d'ici 2030. Les besoins annuels en électricité correspondant seraient alors de 14 TWh, et les besoins en CO₂ de 1,7 Mt⁶.

⁵ Stratégie Nationale de la Mobilisation de la Biomasse, Ministère de la Transition Ecologique, 2016.

⁶ Observatoire Français des e-fuels.

Procédés industriels bas carbone

Ces technologies recouvrent les méthodes et procédés de production industriels permettant de réduire ou d'éliminer les émissions de CO₂ sur site. Ils recouvrent donc toute technologie permettant la substitution des énergies fossiles par une source non émettrice à l'usage (comme l'électricité ou l'hydrogène) ou permettant de réduire les émissions de procédé, présentes notamment dans des industries comme la sidérurgie ou le ciment.

Annexe 3

Les chiffres clés des émissions par région

	USA	Chine	UE	France
Emissions de GES cumulées 1850-2021 (en GtCO ₂ eq)	558	366	404	60
Emissions de GES 2021 (hors UTCATF) (en MtCO ₂ eq)	6 280	14 300	3 460	415
Emissions de GES 2005 (hors UTCATF) (en MtCO ₂ eq)	7 460	7 810	4 550	550
Emissions de GES 1990 (hors UTCATF) (en MtCO ₂ eq)	6 480	3 630	4 860	539
Taux de variation des émissions de GES 2021 (hors UTCATF) / 2005 (en %)	-15,8	+83	-23,9	-24,5
Taux de variation des émissions de GES 2021 (hors UTCATF) / 1990 (en %)	-3,1	+294	-28,8	-23,0
Emissions de GES par habitant 2021 (tCO ₂ e)	18,9	10,1	7,7	6,1
Emissions de GES par habitant 2005 (tCO ₂ e)	25,2	6,0	10,4	8,8
Emissions de GES par habitant 1990 (tCO ₂ e)	25,9	3,2	11,6	9,5
Emissions de GES pour 1 000 \$ de PIB en 2021 (en kgCO ₂ e)	296	576	175	136
Emissions de GES pour 1 000 \$ de PIB en 2005 (en kgCO ₂ e)	464	1 126	278	211
Emissions de GES pour 1 000 \$ de PIB en 1990 (en kgCO ₂ e)	642	2 246	401	279
Ratio : empreinte carbone de la consommation / émissions territoriales en 2021 (en %) (émissions de CO ₂ fossiles et industrielles, UTCATF et autres gaz exclus) (en %)	1,11	0,91	1,25	1,36
Taux de croissance annuel moyen des émissions de GES depuis 1990 (en %/an)	-0,1	+4,5	-1,1	-0,9
Taux de croissance annuel moyen des émissions de GES depuis 2005 (en %/an)	-1,1	+3,9	-1,7	-1,9
Objectif NDC de moyen terme (2030)	-50 à -52 % 2025/2005	Pic d'émissions avant 2030	-55 % en 2030 /1990	-55 % en 2030/1990
Rythme annuel de baisse des émissions nécessaire à partir de 2021 pour atteindre l'objectif 2030 (en %/an)	-5,8	ns	-5,0	-4,4
Objectif NDC de long terme	Neutralité en 2050	Neutralité avant 2060	Neutralité en 2050	Neutralité en 2050

Annexe n° 4

Les dispositions au Plan national d'action climatique (avant-projet)

Dans le secteur des transports, plusieurs objectifs sont fixés : accroître massivement la part de véhicules à faibles émissions dans le parc, améliorer l'efficacité énergétique des véhicules, favoriser le développement des biocarburants, soutenir le report vers des modes de transport moins émetteurs (transport collectif, ferroviaires etc...). La stratégie additionne les mesures européennes (par exemple l'impact des quotas carbone et les règlements européens établissant des normes de performance d'émissions de CO₂ des véhicules thermiques) jusqu'à l'interdiction de la vente de voitures neuves à moteur thermique en 2035, et les mesures nationales, fiscales et financières, notamment le bonus-malus à l'achat, la prime à la conversion des logements ainsi que les mesures pour développer des infrastructures de recharge et des zones à faibles émissions.

La loi de transition énergétique pour la croissance verte fixe en outre un objectif de 7 millions de points de recharge publics et privés d'ici 2030. D'autres mesures visent à soutenir le développement des biocarburants par une taxe incitative à l'utilisation d'énergie renouvelable dans le transport (TIRUERT). L'objectif de reporter la mobilité vers les modes de transport les moins émetteurs de CO₂ est une nouvelle fois invoqué⁷, la loi climat résilience du 24 août 2021 fixe un objectif de doublement de la part modale du fret ferroviaire de marchandises à horizon 2030, de 9 % (en 2019) à 18 %, ainsi qu'une augmentation à horizon 2030 de 50 % de la part modale du fluvial. Pour le transport aérien, les vols intra-européens sont inclus dans le système de marché carbone européen (SEQE-UE). La révision de la directive SEQE-UE adoptée en mai 2023 dans le cadre du paquet « Ajustement à l'objectif 55 » a renforcé la tarification carbone s'appliquant aux secteurs couverts, dont l'aviation, en accélérant la baisse du plafond d'émissions et elle l'étend au transport maritime.

Dans le secteur des bâtiments résidentiels et tertiaires, il s'agit pour la construction neuve de normes exigeantes pour les bâtiments existants. L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments existants passe par des mesures budgétaires, fiscales, réglementaires et d'accompagnement : financement des rénovations énergétiques (aide « MaPrimeRénov' » progressive en fonction du revenu, dispositif des certificats d'économies d'énergie, éco-prêt à taux zéro, TVA à taux réduit, etc.), formation des professionnels, obligation de mettre en œuvre une isolation thermique lors de la réalisation de gros travaux de rénovation des bâtiments.

⁷ On rappelle que l'objectif du report modal est à l'ordre du jour depuis les années 80. Il est par exemple évoqué dans le rapport du Conseil d'Analyse économique [« Infrastructures de transport, mobilité et croissance »](#), Michel Didier et Rémy Prudhomme. La Documentation française, 2007.

Pour l'industrie, outre les mesures d'efficacité énergétique et de développement des énergies renouvelables, des politiques et mesures spécifiques sont mises en œuvre. Pour la période 2022-2026, le plan d'investissement « France 2030 » consacre 5,6 milliards d'euros à la décarbonation de l'industrie : 5 milliards d'euros sont consacrés au déploiement de solutions de décarbonation des sites industriels, soutien à la décarbonation profonde de sites industriels très émetteurs (par exemple, la sidérurgie, la chimie lourde, le ciment, l'aluminium) (4 milliards d'euros), déploiement de solutions plus matures dans le tissu industriel français, notamment la chaleur bas carbone et l'efficacité énergétique (1 milliard d'euros) et 600 millions d'euros sont dédiés à l'émergence et l'industrialisation de solutions de décarbonation de l'industrie (soutien à l'innovation).

L'objectif d'amélioration de l'efficacité énergétique repose en France notamment sur les certificats d'énergie. La France utilise depuis plusieurs années le mécanisme des certificats d'économies d'énergie (CEE). Les CEE (1 CEE = 1 kWh cumac : économies cumulées actualisées d'énergie finale) sont attribués aux acteurs éligibles (les « obligés » et d'autres personnes morales non obligées, comme les collectivités territoriales, les bailleurs sociaux, etc.) qui ont réalisé des opérations d'économies d'énergie respectant certains critères fixés. Ces CEE peuvent librement être échangés. Le dispositif CEE repose sur une obligation triennale imposée par les pouvoirs publics aux vendeurs d'énergie (d'électricité, de gaz, de fioul, de carburant, etc.), qualifiés d'« obligés ». Au-delà d'un certain seuil les obligés doivent justifier lors de leur demande de certificats qu'ils ont eu effectivement un rôle actif et incitatif et en fin de période d'obligation, doivent justifier, sous réserve d'une pénalité libératoire dissuasive, de l'accomplissement de leurs obligations par la détention de certificats d'un montant équivalent à ces obligations. Le dispositif des CEE a pour but de mobiliser les gisements d'économies d'énergie, notamment dans les secteurs où ils sont les plus diffus. Ainsi, le dispositif des CEE concerne tous les secteurs : résidentiel, tertiaire, industrie, transports et agriculture. Le total des obligations imposées aux vendeurs d'énergie représente une dépense de 3 milliards d'euros pour la période 2023-2025, soit de l'ordre de 1 milliard par an.

Annexe 5

Le plan France 2030 et la loi industrie verte

France 2030 a affecté 54 Md € à la recherche et à l'innovation sur les dix ans à venir. L'ambition affichée est « à la fois de rattraper notre retard dans certains secteurs historiques, et de donner un temps d'avance à la France en créant de nouvelles filières industrielles et technologiques pour accompagner les transitions écologiques et numériques ». Le plan affiche deux objectifs transversaux consistant à consacrer à la fois 50 % de ses dépenses à la décarbonation de l'économie, et 50 % à des acteurs émergents porteurs d'innovation, en excluant toutes dépenses défavorables à l'environnement. France 2030 élargit les objectifs de la mission Investissements d'Avenir en intégrant le soutien au déploiement industriel, en complément du soutien public à la recherche et à l'innovation technologique.

Deux logiques structurent la répartition des crédits. La première est celle de l'innovation « structurelle ». Le plan prévoit de renforcer le financement de l'enseignement supérieur, de la recherche dans l'espoir de susciter des innovations de rupture inattendues. La seconde est celle de l'innovation « dirigée », qui répond à la nécessité de définir des priorités d'investissement pour répondre aux enjeux de transition de l'économie française. Cinq des dix « priorités stratégiques » de France 2030 s'appliquent au domaine de l'énergie :

- Favoriser l'émergence d'une offre française de petits réacteurs modulaires (SMR) d'ici 2035 et soutenir l'innovation de rupture dans la filière.
- Devenir un leader de l'hydrogène décarboné et des énergies renouvelables en 2030 en se positionnant en tant que leader sur la production d'hydrogène par électrolyse, ainsi que sur l'ensemble de la chaîne de valeur (membranes, piles à combustible, réservoirs, etc.). La France se donne ainsi l'ambition de compter sur son sol au moins deux « giga-factories » d'électrolyseurs et l'ensemble des technologies nécessaires à l'utilisation de l'hydrogène.
- Décarboner l'industrie en ciblant d'une part la décarbonation de sites industriels très émetteurs (chimie lourde, cimenteries, aluminium), d'autre part le déploiement de solutions matures (chaleur renouvelable, efficacité énergétique, électrification).
- Produire en France, à l'horizon 2030, 2 millions de véhicules zéro émission, développer une mobilité sobre, dans un contexte de fin programmée des véhicules thermiques en 2035 et produire en France, d'ici 2030, le premier avion bas-carbone.

Dans cet enchaînement de programmes, les circonstances ont joué un rôle significatif. Le premier PIA (2010-2018) venait après la crise de 2008 qui avait fortement déséquilibré les finances publiques. L'annonce d'une enveloppe de 35 milliards d'euros distinguait 20 milliards d'euros dont seuls les intérêts annuels (soit 3,4 %) pourraient être réellement dépensés. Un processus similaire a été reconduit pour le PIA 2 (2014-2017, 12 milliards

d'euros), adopté peu après la crise de l'euro. Le gouvernement engageait en outre une forte baisse des charges sociales pour améliorer la compétitivité coût, puis en 2017 un PIA 3 (10 milliards d'euros). En 2020, le PIA 4 s'est en partie intégré dans le plan France Relance qui s'inscrit plus dans une logique de soutien macroéconomique que de production industrielle. Le plan France Relance a fait l'objet d'une évaluation publiée en janvier 2024 (8). Sur le coût global de 100 milliards d'euros, 40 milliards proviennent de subventions relais de l'Union européenne dans le cadre de la facilité pour la reprise et la résilience. L'objectif de soutien macroéconomique a été atteint, bien que le rebond du PIB français s'avère moindre que la moyenne européenne. Les objectifs liés à l'écologie ont représenté 30 % du total, soit de l'ordre de 10 milliards d'euros affectés à des mesures qui concernent peu l'offre industrielle.

⁸ Comité d'évaluation au plan France relance, rapport final, Xavier Javel, Sylvie Montout, France Stratégie, janvier 2024.

Rexecode, l'analyse économique au service des entreprises

1

Un service d'études économiques dédié à l'entreprise

Rexecode offre à ses adhérents en exclusivité :

- un **diagnostic** de la conjoncture mondiale
- des **prévisions** argumentées
- un **réseau** d'échanges avec les entreprises adhérentes et les économistes
- une **équipe** disponible (documentalistes, statisticiens, économistes)
- les **outils** de l'analyse économique (tableaux de bord, diaporama, radars, etc.)

2

Un acteur du débat de politique économique

Rexecode met à la disposition du public :

- des **documents de travail, notes d'actualité, tableaux de bord, cahiers de graphiques** sur les enjeux majeurs de la politique économique : croissance, compétitivité, emploi, économie numérique, développement durable, finances publiques
- des **enquêtes originales** (trésorerie des entreprises françaises, compétitivité qualité et prix des produits des grands exportateurs mondiaux)



Pour en savoir plus sur le forfait adhérent ou les études publiques, contactez-nous : contact@rexecode.fr

24 place du Général Catroux
75017 PARIS
Tél. (33) 01 53 89 20 89

www.rexecode.fr
[twitter @Rexecode](https://twitter.com/Rexecode)

Documents de travail récemment parus

<i>La compétitivité française en 2023</i>	<i>N° 89 - février 2024</i>
<i>La durée effective du travail en France et en Europe en 2022</i>	<i>N° 88 - décembre 2023</i>
<i>Etat des lieux de la fiscalité locale de production</i>	<i>N° 87 - septembre 2023</i>
<i>Enjeux macroéconomiques de la régulation économique du médicament</i>	<i>N° 86 - juillet 2023</i>
<i>Comment répondre à plus de besoins collectifs avec moins d'argent public ?</i>	<i>N° 85 - juin 2023</i>
<i>La compétitivité française en 2022 - Recul endigué des parts de marché mais déficit extérieur record</i>	<i>N° 84 - janvier 2023</i>
<i>Les enjeux économiques de la décarbonation de la France</i>	<i>N° 83 - mai 2022</i>
<i>Nouvelle dégradation de la compétitivité française en 2021</i>	<i>N° 82 - février 2022</i>
<i>L'essor du numérique est favorable à la croissance et à la réduction de l'empreinte carbone de la France</i>	<i>N° 81 - janvier 2022</i>
<i>Perspectives économiques et budgétaires 2022</i>	<i>N° 80 - octobre 2021</i>
<i>La durée effective du travail en France et en Europe</i>	<i>N° 79 - octobre 2021</i>
<i>La soutenabilité de la dette publique ou le dilemme des émissions</i>	<i>N° 78 - avril 2021</i>
<i>Les indicateurs de compétitivité de la France reculent nettement en 2020</i>	<i>N° 77 - mars 2021</i>
<i>Les émissions françaises de gaz à effet de serre d'ici 2030</i>	<i>N° 76 - janvier 2021</i>