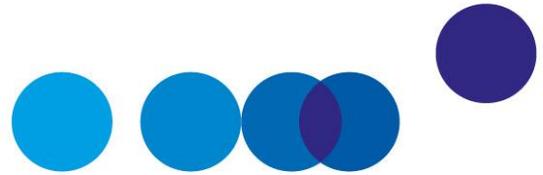


Les coûts d'abattement

Partie 6 – Ciment

Rapport de la commission présidée par
Patrick Criqui



LES COÛTS D'ABATTEMENT

Partie 6 – Ciment

Rapport de la commission
présidée par **Patrick Criqui**

Rapporteur

Maxime Gérardin





PRÉSENTATION

À la suite de la signature de l'accord de Paris en 2015, la France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. La Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), révisée tous les cinq ans, constitue la feuille de route française pour lutter contre le changement climatique : elle détaille les actions à mettre en œuvre dans chaque secteur. Le présent travail vise à fournir des outils méthodologiques dans la perspective de l'élaboration de la troisième SNBC.

Les coûts d'abattement des différentes solutions de décarbonation, c'est-à-dire leur coût rapporté aux émissions évitées, sont en effet une donnée essentielle pour l'élaboration d'une stratégie climat efficace. Le recours au coût d'abattement socioéconomique permet de hiérarchiser les actions de décarbonation et d'identifier celles susceptibles de maximiser les réductions effectives d'émissions de gaz à effet de serre, à niveau d'effort donné pour la collectivité. La comparaison du coût d'abattement à la valeur de l'action pour le climat (VAC)¹ établit l'efficacité socioéconomique d'une action. Elle doit par ailleurs permettre de s'assurer que le niveau d'effort consenti reste proportionné au regard de la trajectoire nationale de réduction des émissions vers la neutralité carbone en 2050.

Après la publication du rapport de la commission Quinet sur la valeur de l'action pour le climat en février 2019, qui faisait le constat de la nécessité « de poser un cadre méthodologique clair et partagé pour pouvoir évaluer le coût d'abattement socioéconomique des différentes actions », la commission sur les coûts d'abattement des émissions de gaz à effet de serre a été installée en septembre 2019. Présidée par Patrick Criqui, directeur de recherche émérite au CNRS, elle est composée d'économistes et d'experts sectoriels.

¹ Quinet A. (2019), *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, rapport, France Stratégie, février.

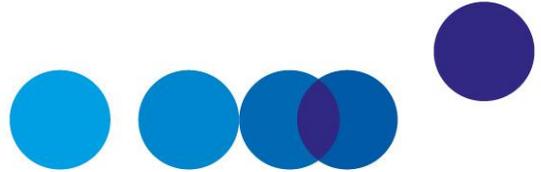
L'objectif des travaux de la commission est triple :

- préciser le (ou les) sens que l'on donne au « coût d'abattement » et définir un cadre méthodologique partagé pour les calculs de ces coûts ;
- expliquer l'interprétation qui peut être faite d'une évaluation des coûts d'abattement en fonction du mode de calcul retenu, en particulier préciser comment elle peut être comparée à la valeur de l'action pour le climat ;
- présenter les coûts d'abattement harmonisés d'une série de technologies ou d'actions pour la réduction des émissions ainsi que l'utilisation qui pourrait en être faite au service des politiques climatiques et les limites de cette utilisation.

Après une première partie méthodologique qui explicite le concept et les méthodes de calcul des coûts d'abattement socioéconomiques, des travaux sectoriels de cette commission sont publiés successivement depuis deux ans : transports, électricité, hydrogène, logement, industrie – dont ciment, le sujet du présent rapport – et agriculture (à venir).

Volets déjà publiés

1. Criqui P. (2021), *Les coûts d'abattement. Partie 1 – Méthodologie*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, juin, 70 p. Rapporteurs : Stéphane Crémel (Direction générale du Trésor) ; Aude Pommeret (France Stratégie)
2. Criqui P. (2021), *Les coûts d'abattement. Partie 2 – Transports*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, juin, 92 p. Rapporteurs : Stéphane Crémel (Direction générale du Trésor) ; Bérengère Mesqui (France Stratégie)
3. Criqui P. (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 3 – Électricité*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, janvier, 132 p. Rapporteurs : Silvano Domergue, Olivier de Guibert et Emmanuel Memmi (Commissariat général au développement durable) ; Julie Corberand et Aude Pommeret (France Stratégie)
4. Criqui P. (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 4 – Hydrogène*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, mai, 82 p. Rapporteur : Maxime Gérardin (France Stratégie)
5. Criqui P. (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 5 – Logement*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, novembre, 160 p. Rapporteurs : Boris Le Hir et Alice Robinet (France Stratégie)



SOMMAIRE

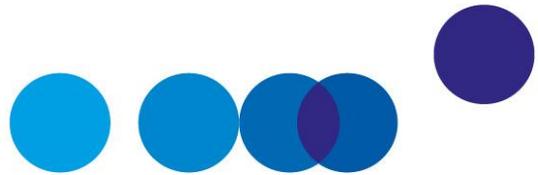
Synthèse	7
Introduction	11
Chapitre 1 – Le ciment aujourd’hui	13
1. Les usages du ciment	13
2. Le processus de production du ciment.....	14
3. La structure de la filière	15
4. Le volume du marché du ciment	16
5. Quelles émissions de gaz à effet de serre pour une tonne de clinker ?.....	16
6. Le volume d’émissions de gaz à effet de serre.....	18
Chapitre 2 – Quelles actions pour réduire les émissions ?	21
1. Un continuum de leviers de décarbonation	21
2. Quelle trajectoire pour la demande de ciment ?.....	23
3. Sur quels leviers calculer des coûts d’abattement ?.....	24
Chapitre 3 – Les argiles calcinées pour diminuer le besoin de clinker	29
1. La production d’argiles calcinées	29
2. Les émissions évitées par les argiles calcinées	30
3. Les coûts d’abattement calculés	30
4. Les argiles calcinées ne sont aujourd’hui pas valorisées par le marché des quotas européens	32
5. Quels outils pour déclencher pleinement les réductions d’émissions permises par les argiles calcinées ?.....	33

Chapitre 4 – La capture et séquestration de carbone pour produire du clinker bas-carbone.....35

1. La capture du CO₂ : de multiples voies technologiques 35
2. Le stockage du CO₂ : une possibilité limitée à certains territoires 37
3. Les coûts d'abattement calculés 38
4. Le clinker bas-carbone et les outils de politiques publiques 40

ANNEXES

- Annexe 1** – Membres de la commission 43
- Annexe 2** – Hypothèses de calcul 45
- Annexe 3** – Formules de coût d'abattement 47



SYNTHÈSE

La production de clinker, composant principal du ciment conventionnel et donc matière première des bétons d'aujourd'hui, présente la particularité d'émettre du CO₂ non seulement par la combustion d'énergies fossiles qu'elle requiert pour « cuire » les matériaux, mais surtout en libérant les atomes de carbone contenus dans le calcaire (CaCO₃), matière première du clinker. Au total, la production de ciment émet en France environ 10 millions de tonnes de CO₂ par an, soit 3 % des émissions de CO₂. Ce ratio s'élève à 7,4 % à l'échelle mondiale, et plus encore dans les pays qui connaissent une urbanisation rapide. La production de clinker est massifiée en un nombre limité de sites, et donc aussi en un nombre limité de grandes entreprises cimentières.

En France comme dans les pays déjà largement urbanisés, le secteur du ciment et du béton présente la particularité de connaître, sur le long terme, une diminution tendancielle de ses volumes, avec une division par deux depuis 1974. Du fait des tendances de la construction et des politiques publiques visant le zéro artificialisation nette (ZAN), cette trajectoire semble appelée à se poursuivre, avant même tout effort porté spécifiquement sur la décarbonation ; et elle sera nécessairement accentuée dans le cadre d'une décarbonation répondant aux objectifs de neutralité carbone.

Cette décroissance des volumes et le processus de réorganisation/consolidation des sites cimentiers qui en résulte constituent une donnée d'entrée incontournable pour toute analyse de l'industrie cimentière et de sa décarbonation future.

Les leviers de décarbonation du ciment et de ses usages forment un large continuum, comprenant notamment :

- les éventuelles inflexions dans le déploiement et l'usage du bâti, permettant d'en modérer les besoins nouveaux ;
- les innovations technologiques, améliorations de pratiques, optimisations et substitutions permettant, à usage final constant, de réduire le besoin en ciments, qu'ils soient utilisés pour les bétons (cas majoritaire) ou pour les maçonneries ;
- les leviers techniques de décarbonation de la production d'une tonne de ciment.

Les deux premiers sujets recouvrent une multiplicité d'actions et d'innovations permettant de réduire la consommation de ciment. Il est impossible de les identifier par avance et *a fortiori* de chiffrer leurs coûts d'abattement. Ces actions et innovations sont néanmoins susceptibles de porter une très large part des réductions d'émissions du secteur. On ne calcule ici que des coûts d'abattement relevant du troisième item, lesquels se divisent en deux leviers principaux.

Coûts d'abattement : de quoi s'agit-il ?

À la suite de l'accord de Paris, la France s'est fixé l'objectif de zéro émission nette à l'horizon 2050. Il s'agit d'un objectif ambitieux qui implique, pour une partie des réductions d'émissions, le déploiement de technologies coûteuses. La question se pose alors du choix des technologies à mettre en œuvre, et du moment pour le faire. La réponse canonique à cette question passe par le calcul du coût associé à la réduction de chaque tonne de CO₂-équivalent d'émissions, exprimé en €/tCO₂eq et appelé *coût d'abattement* d'une action de décarbonation. Plus le coût d'abattement est faible, plus l'action sera économiquement « facile ». Pour sélectionner et hiérarchiser les actions utiles à la collectivité, il faut comparer les coûts d'abattement entre eux, mais aussi à la mesure des gains de l'action. Cette dernière est donnée par la VAC (valeur de l'action pour le climat), actuellement fixée à 120 €/tCO₂eq, et qui augmente progressivement jusqu'en 2050, en passant par 250 €/tCO₂eq en 2030.

Après avoir établi, en 2019, cette trajectoire de la VAC préconisée pour la France, la commission Quinet¹ constatait qu'« il est essentiel de poser un cadre méthodologique clair et partagé pour pouvoir évaluer le coût d'abattement socioéconomique des différentes actions ». Dans ce but a été mise en place une commission présidée par Patrick Criqui et appuyée par le CGDD, la DG Trésor et France Stratégie. Son travail s'inscrit également dans le cadre des suites à donner à la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC 2), et de la préparation de la SNBC 3. En plus d'aborder les aspects méthodologiques, cette commission recense et établit les coûts d'abattement (en €/tCO₂eq évitée) associés à différentes actions et technologies dans les secteurs du transport, de l'électricité, du bâtiment, de l'industrie, de l'hydrogène et de l'agriculture.

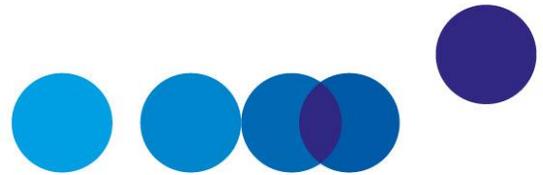
¹ Quinet A. (2019), *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, rapport, France Stratégie, février.

Le premier levier consiste à incorporer aux ciments une part d'argiles calcinées, produites presque comme le clinker, mais avec des émissions très réduites, puisqu'on évite alors de relâcher dans l'atmosphère du carbone stocké géologiquement dans les roches calcaires. Ce levier connaît aujourd'hui un début de déploiement, avec plusieurs investissements soutenus par la puissance publique. Un très large déploiement permettrait d'éviter, à quantité de ciment donnée, entre un quart et un tiers des émissions. Le coût de ces émissions évitées ressort, dans un calcul socioéconomique conduit du point de vue de la collectivité, comme particulièrement faible, de l'ordre de 25 euros par tonne de CO₂ évitée. L'accélération du déploiement de cette voie, qui soulève des questions de normalisation et d'appropriation par les acteurs de la construction, est donc extrêmement souhaitable.

Le second levier consiste à produire du clinker en lui adjoignant la capture et le stockage géologique du CO₂ produit (CSC). Ce levier s'inscrit donc dans la perspective, plus large que celle du seul secteur du ciment, du déploiement d'infrastructures et de politiques de capture et stockage de CO₂. Il est susceptible d'induire une concentration de la production de clinker vers les zones propices à la CSC, comme les littoraux notamment, ce qui aurait des conséquences massives pour la localisation des activités cimentières. Le coût de la tonne de CO₂ évitée ressort, en calcul socioéconomique, dans une fourchette de 135 à 215 euros par tonne, ce qui est significatif mais tout à fait acceptable au regard du standard que constitue la « valeur de l'action pour le climat », de 250 €/tCO₂ en 2030.

En attendant la définition et la mise en œuvre complètes du mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF), le marché européen de quotas carbone (EU ETS) ne permet pas de valoriser la plupart des leviers de décarbonation du secteur, car il alloue aux sites cimentiers des quotas gratuits en quantités proportionnelles à leur production de clinker. Ainsi seul le dernier levier cité sera, en l'état, valorisé par l'ETS.

Dans le bâtiment, la réglementation environnementale RE 2020 fixe pour les bâtiments neufs un seuil maximal d'émissions en analyse du cycle de vie (ACV) et confère donc au carbone, dans les optimisations conduites par les maîtres d'œuvre, une valeur implicite mais potentiellement significative. Son entrée en vigueur ouvre donc une voie de valorisation des actions de décarbonation des ciments et bétons. Cependant, l'aménagement des voiries et des réseaux urbains met également en œuvre des quantités significatives de ciments et bétons, et l'enjeu de la maîtrise de leur usage et de leur décarbonation ne semble pas y faire l'objet d'autant d'attention.



INTRODUCTION

La production de ciment est le premier poste d'émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur de la construction. Elle représente 3 % environ des émissions françaises de CO₂, et davantage encore au niveau mondial. La spécificité des processus qui conduisent à ces émissions, et donc des possibles voies de la décarbonation, est grande.

Planification de la décarbonation du ciment

Pour le cas français, le secteur du ciment fait l'objet d'une feuille de route de filière, préparée dans le cadre du Comité stratégique de filière « Industries pour la construction » et présentée en mai 2021¹ ; et d'un Plan de transition sectoriel (PTS) élaboré sous la responsabilité de l'Ademe, en concertation très étroite avec la filière². Ce PTS sera très certainement un point de référence central pour les actions de réduction des émissions à mettre en œuvre dans les années à venir. Ses analyses étant extrêmement riches, la quasi-totalité des éléments présentés ici est couverte par le PTS.

La spécificité du présent document tient à l'identification de calculs de coûts d'abattement socioéconomiques, pour deux des voies de décarbonation possibles, et selon la méthodologie de la commission Criqui.

Avertissements méthodologiques

Les calculs de coûts d'abattement présentés ici renvoient à la logique des évaluations en termes d'économie publique. Ils s'entendent toujours par comparaison à une chaîne technique « de référence », à savoir celle qui satisfait la même production ou le même usage à moindre coût, dans un contexte de décarbonation incomplète. Les coûts sont dits « socioéconomiques » : ils sont considérés hors fiscalité, mais en intégrant autant que

¹ Conseil national de l'industrie (2021), « [Feuille de route de la filière Ciment](#) », mai, 16 p.

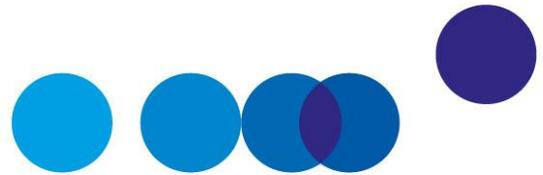
² Mari E., Sourisseau S., Bouxin A., Borde C., Padilla S. et Gourdon T. (2021), [Plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière en France](#), rapport final, Ademe, décembre, 187 p.

possible les principales externalités ; et ils découlent de l'application du taux d'actualisation public préconisé en France jusque fin 2021, à savoir 4,5 % par an. Ils sont exprimés en valeur 2018 (€₂₀₁₈). Pour l'énergie, ils reposent sur des hypothèses de prix (détaillées en [annexe 2](#)) qui se projettent au-delà de la crise énergétique en cours à la date de publication, et qui sont donc plus faibles que les prix de marché de court terme observés début 2023.

Les coûts d'abattement obtenus ne doivent donc pas être compris comme une appréciation du niveau de tarification du carbone qui, s'il était atteint dans le marché de quotas européens, permettrait aux solutions examinées de se déployer spontanément. Notamment, ils ne font pas apparaître le coût éventuel du risque privé¹ associé à un investissement ; et le taux d'actualisation public ne coïncide pas nécessairement avec le coût moyen du capital pour le financement de projets.

Enfin, même en se plaçant dans une perspective socioéconomique, plusieurs modalités de calcul des coûts d'abattement distincts peuvent être considérées, en fonction de l'usage qui en est fait. L'[annexe 3](#), en fin de document, revient sur ce point.

¹ Risque perçu par un investisseur privé.



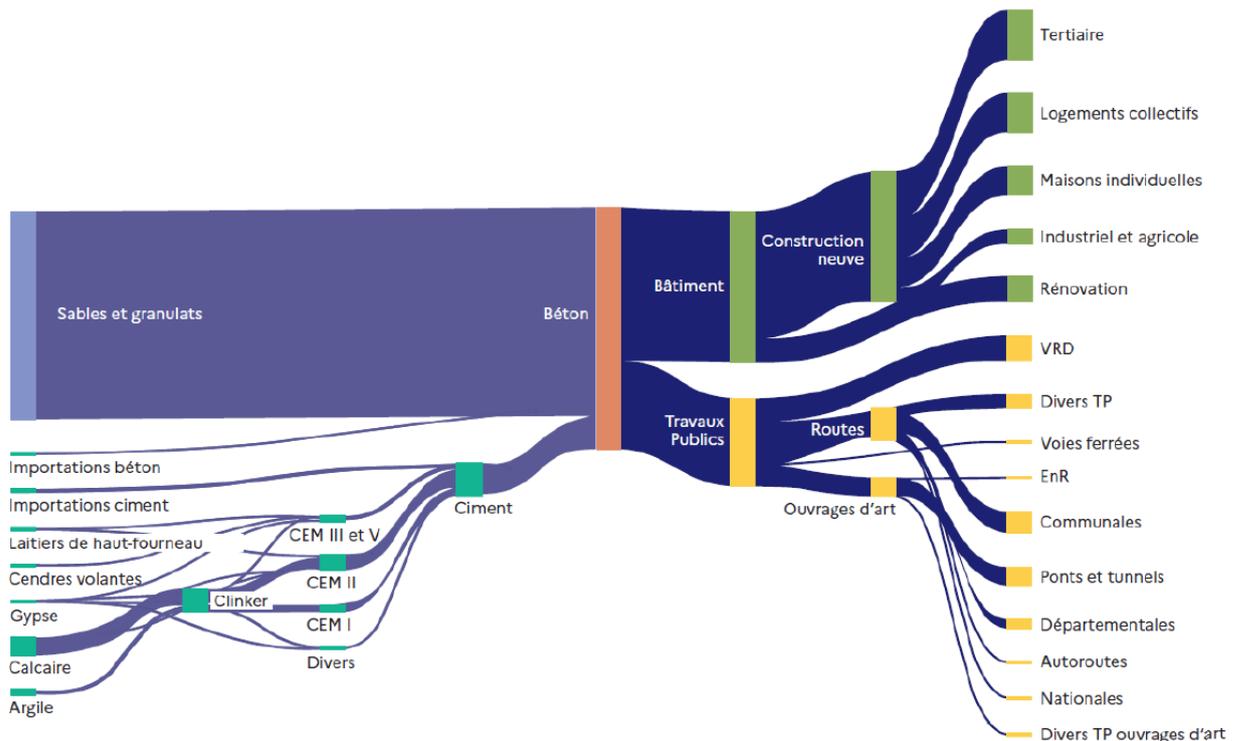
CHAPITRE 1

LE CIMENT AUJOURD'HUI

1. Les usages du ciment

La quasi-totalité du ciment produit sert à composer des bétons, qui sont des mélanges de granulats (roches concassées et calibrées) et de ciment constituant le liant des granulats. Le ciment représente alors environ 14 % de la masse du béton.

Figure 1 – Usages du ciment en France



Source : outil PEPITO (Perspective d'évolution de la production industrielle pour une trajectoire 0 carbone), rapporté dans Mari E., Sourisseau S., Bouxin A., Borde C., Padilla S. et Gourdon T. (2021), [Plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière en France, rapport final, Ademe, décembre, p. 44](#)

Le ciment est, en France, utilisé à presque deux tiers par le bâtiment et à un peu plus d'un tiers par les travaux publics (éléments de voiries, de réseaux techniques, ouvrages d'art, etc.). Il est commercialisé, approximativement :

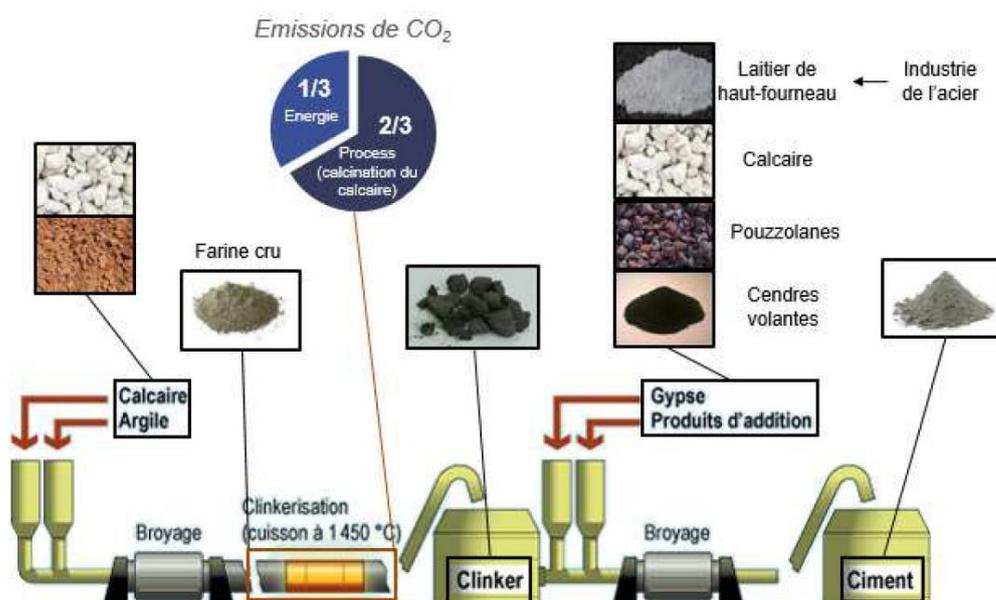
- à 60 %, sous forme de béton prêt à l'emploi (installations dédiées sur les très grands chantiers, et surtout camions-toupies dirigés vers les chantiers de taille suffisante) ;
- à 20 %, en sacs destinés aux petits chantiers, sur le lieu desquels les mortiers ou bétons sont directement confectionnés ;
- à 20 %, sous forme de produits en béton préfabriqués, comme les parpaings.

2. Le processus de production du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un composé qui durcit après avoir été mis en présence d'eau, propriété essentielle qui permet ses applications. Son principal composant est le clinker, obtenu en portant à 1 450 °C un mélange de roche calcaire (principalement) et d'argile, broyées.

Le clinker constitue entre 50 % et plus de 95 % de la masse du ciment, en fonction de la classe de ciment considérée. Le restant est constitué de « produits d'addition » : roches non calcinées (calcaire à nouveau, pouzzolane) ou sous-produits d'industries lourdes (« laitier » de haut-fourneau, cendres dites « volantes » issues de la combustion de charbon).

Figure 2 – Représentation schématique du process cimentier



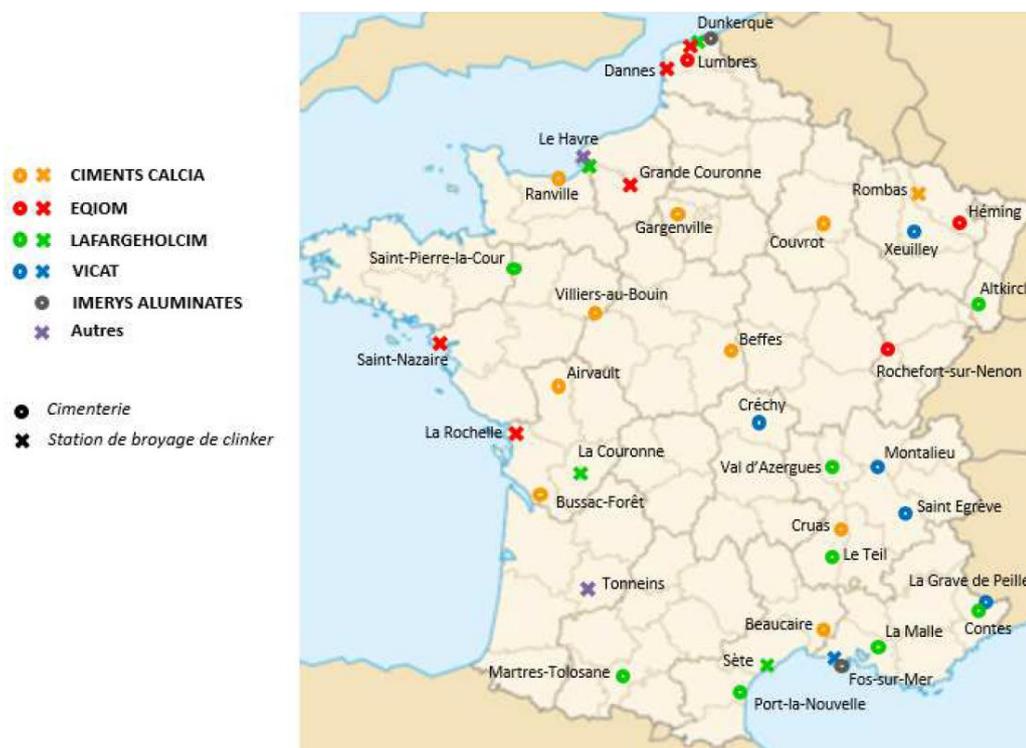
Source : *Éric Menneteau (CNRS), reproduit dans Mari E., Sourisseau S., Bouxin A., Borde C., Padilla S. et Gourdon T. (2021), Plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière en France, op. cit., p. 13*

3. La structure de la filière

Les marchés du ciment sont essentiellement domestiques : il s'agit en effet d'un matériau de faible valeur massique, produit à partir de matières, le calcaire et l'argile, disponibles en de très nombreux endroits. Le lieu de production est donc généralement proche du lieu de consommation, et peu de ciment franchit les frontières¹.

Cependant, les économies d'échelle dans les installations industrielles sont telles que la production du clinker se concentre en un nombre réduit de sites, et donc aussi en un nombre réduit d'entreprises cimentières. Outre ces sites de production de clinker, certains autres (« stations de broyage ») reçoivent du clinker et le transforment en différentes qualités de ciment.

Carte 1 – Sites cimentiers de France métropolitaine



Lecture : repérés par des ronds, les sites regroupant toute la chaîne de production présentée précédemment en figure 2 ; et par des croix, les sites réceptionnant du clinker produit ailleurs pour le broyer, avec des produits d'addition, en différents ciments.

Source : Mari E., Sourisseau S., Bouxin A., Borde C., Padilla S. et Gourdon T. (2021), [Plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière en France](#), op. cit., p. 17

¹ L'Ademe cite le contre-exemple des Pays-Bas, peu pourvus en ces ressources, qui en conséquence importent du clinker ou du ciment, notamment de Belgique et d'Allemagne.

4. Le volume du marché du ciment

En 2020, 4,6 milliards de tonnes de ciment ont été produites dans le monde. 55 % de cette production est localisée en Chine et 8 % en Inde.

16,5 millions de tonnes de ciment ont été produites en 2018 en France, soit environ 0,4 % du total mondial. Que ce chiffre soit très inférieur à la part de la France dans le PIB mondial¹ ne traduit pas une spécificité de la France par rapport aux pays comparables, mais rappelle que le rythme d'urbanisation et d'équipement en infrastructures est le principal déterminant de la consommation de ciment d'un pays – ainsi la production-consommation française de ciment a atteint son maximum en 1974, à un niveau deux fois plus élevé qu'aujourd'hui.

Si l'essentiel du marché français du ciment est domestique, une minorité de flux transfrontaliers existe aussi, avec des importations de clinker légèrement plus élevées que les exportations. Le risque d'importations massives de clinker par la façade méditerranéenne, avant une simple transformation en ciments dans des stations de broyage en France, est *a priori* un point d'attention : ces flux, quoique encore faibles à l'échelle de la consommation française, ont rapidement augmenté dans les dernières années.

5. Quelles émissions de gaz à effet de serre pour une tonne de clinker ?

La principale source d'émissions de gaz à effet de serre (GES) lors de la production de ciment provient précisément de la production du clinker ; il s'agit de CO₂ émis par la « décarbonatation » du calcaire (CaCO₃ – carbonate de calcium). La décarbonatation correspond à :



après quoi la chaux, CaO, se combine avec les minéraux issus de l'argile, présents dans le même four, pour former les constituants du clinker, tandis que le CO₂ est émis dans l'atmosphère.

Il s'agit donc de CO₂ « non énergétique », c'est-à-dire que le carbone émis ne provient pas de la combustion d'une énergie fossile, comme pour la majorité des émissions de CO₂, mais est issu de la roche transformée. Ainsi, du point de vue du cycle du carbone, le processus est à la fois semblable aux autres émissions de CO₂ anthropogénique ; mais

¹ 3,2 % en nominal, et 2,5 % en parité de pouvoir d'achat, en 2017. Voir OCDE (2020), « [OECD share in world GDP stable at around 50% in PPP terms in 2017](#) », article du 19 mai.

différent, en ceci que le « stock » de carbone à émettre est constitué par du calcaire, et non du charbon, du pétrole ou du gaz. Cela constitue une spécificité forte – par exemple, même les émissions dites « de procédé » des hauts-fourneaux proviennent de charbon.

Les émissions de ce CO₂ « de procédé » s'élèvent à environ 525 kg par tonne de clinker produite, ce chiffre découlant directement de la composition du clinker et de la réaction décrite ci-dessus.

À ces émissions de procédé s'ajoutent les émissions énergétiques, liées au chauffage des matériaux. Le combustible utilisé est, à l'origine, essentiellement du charbon et du coke de pétrole. Depuis deux décennies environ, ces combustibles fossiles sont partiellement remplacés par des déchets combustibles, dans une double préoccupation d'élimination de ces déchets par une solution plus vertueuse que l'enfouissement, et de réduction des coûts d'approvisionnement en combustible. Le carbone contenu dans les déchets et émis par la combustion est en partie du carbone fossile (par exemple, dans le cas de solvants, qui avaient été manufacturés à partir de gaz ou de pétrole), et en partie du carbone biogénique (déchets de bois notamment).

En France, les combustibles de substitution représentent près de la moitié du mix thermique des cimenteries. Cependant ces combustibles de substitution ne sont constitués de biomasse qu'à hauteur d'un cinquième environ, si bien que la biomasse constitue aujourd'hui tout au plus 10 % du combustible des cimenteries ; s'y ajoute une part biogénique dans le carbone contenu dans certains déchets, comme les pneumatiques. Ce taux tombe à 3 % au niveau mondial, dans la mesure où, dans les économies en développement rapide, la quantité de déchets disponibles est plus faible et la demande en ciment plus élevée.

Les émissions d'énergie thermique (combustibles) s'élèvent à environ la moitié des émissions de procédé (décarbonatation du calcaire), si bien que le total des émissions est constitué pour deux tiers par les émissions de procédé, et pour un tiers par les émissions de combustion : les émissions directes totales sont de l'ordre de 820 kgCO₂ par tonne de clinker.

Enfin, la consommation électrique du processus cimentier, quoique plus faible que sa consommation d'énergie thermique, est significative : environ 145 kWh électriques par tonne de clinker, majoritairement pour le fonctionnement des broyeurs, aux différentes étapes du processus. On peut rapporter ce dernier chiffre aux précédents en appliquant à cette consommation d'électricité le facteur d'émission d'une centrale à gaz performante (une centrale à gaz à cycle combiné – CCGT), soit environ 400 gCO₂/kWh¹. 60 kgCO₂ par tonne de clinker, environ, viennent alors s'ajouter aux 820 kgCO₂ mentionnés ci-dessus (+7 %).

¹ Ce chiffre est bien supérieur à la moyenne du mix de production français, mais inférieur au contenu carbone marginal calculé en vue de compenser l'impact des quotas carbone européens sur le prix de l'électricité, pour les industriels localisés en France et exposés à un risque de fuite de carbone, qui ressort à 590 gCO₂/kWh. Voir la [Délibération n° 2021-126](#) du 6 mai 2021 de la Commission de régulation de l'énergie.

6. Le volume d'émissions de gaz à effet de serre

Pour passer ensuite à des émissions par tonne de ciment plutôt que par tonne de clinker, il convient d'appliquer le taux de clinker du ciment considéré¹. Sur l'ensemble des ciments commercialisés, ce taux est aujourd'hui de 78 % en France, et de 72 % dans le monde. Le facteur d'émission moyen du ciment est donc d'environ 643 kgCO₂ par tonne – ce chiffre masquant les hétérogénéités entre classes de ciment (voir ci-après).

Tableau 1 – Les émissions totales de CO₂ du secteur du ciment en 2019

	France	Monde
Production de ciment	16,5 Mt/an	4,3 Gt/an
Émissions de CO ₂ de la production de ciment	10 Mt/an	2,5 Gt/an
Part de la production de ciment dans les émissions de CO ₂ (hors autres GES et secteur des terres), 2019	3 %	6,9 %

Sources : Mari E., Sourisseau S., Bouxin A., Borde C., Padilla S. et Gourdon T. (2021), [Plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière en France](#), op. cit. et AIE (2022), [Cement – Tracking Report](#), Agence internationale de l'énergie, septembre

Ces chiffres font du clinker et du ciment des matériaux extrêmement émissifs en regard de leur prix : en supposant un prix de l'ordre de 100 €/t_{ciment}, environ 6,5 kgCO₂ par euro de matériau. Ce ratio place le ciment au même niveau que les combustibles fossiles : un baril de pétrole destiné à être brûlé présente le même ratio quand il s'échange pour 73 euros, et seul le charbon, à la fois moins cher et plus émissif que le pétrole, atteint un ratio nettement supérieur. Ainsi l'intensité en CO₂ du ciment, par unité monétaire de produit, est du même ordre que celle des énergies fossiles – autrement dit, un acteur économique disposant d'un budget donné à dépenser aura une égale « facilité », s'il n'intègre pas le climat dans ses critères de décision, à émettre du CO₂ via le ciment que via les énergies fossiles.

¹ Le contenu carbone des autres constituants usuels du ciment est négligeable, à l'exception de celui du laitier de haut-fourneau, qui fait l'objet de débats méthodologiques – comme en pratique la quantité de laitier disponible est fixée par avance, on n'entre pas ici dans ce débat qui a essentiellement des conséquences distributives entre les industries de l'acier et du ciment.

Le chiffre de 2,7 GtCO₂/an fait du secteur cimentier mondial l'équivalent en matière d'émissions de CO₂ d'un pays comme l'Inde, troisième pays le plus émetteur après la Chine et les États-Unis.

En France, les 10 MtCO₂/an de la production de ciment sont le premier poste d'émissions du secteur du BTP. La production des 4,3 Mt d'acier consacrées annuellement à la construction¹ vient ensuite². Ainsi, au sein de la construction, d'après le « hub des prescripteurs bas-carbone³ », dans le cas d'immeubles neufs en béton (logements collectifs ou bâtiments tertiaires), le béton – dont le ciment porte l'essentiel de l'empreinte – représente environ 30 % de l'empreinte carbone « produits de construction et équipements ».

¹ Voir la section C du I de la Première partie de Sénat (2019), *Les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du xx^e siècle. Opportunité de croissance et de développement*, rapport d'information n° 649 de Mme Valérie Létard, rapporteure, fait au nom de la mission d'information Enjeux de la filière sidérurgique, juillet, 279 p.

² À titre de repères, le recyclage d'acier en four à arc électrique, d'où proviennent majoritairement en France les produits en acier utilisés dans la construction (aciers longs), émet de l'ordre de 0,5 tCO₂/t d'acier ; tandis que la filière de l'acier neuf (hauts-fourneaux), si on souhaite argumenter qu'elle est sollicitée indirectement par toute consommation supplémentaire d'acier, émet environ 2 tCO₂/t d'acier.

³ Plateforme portée par l'Institut français de la performance du bâtiment, en partenariat avec Carbone 4.



CHAPITRE 2

QUELLES ACTIONS POUR RÉDUIRE LES ÉMISSIONS ?

1. Un continuum de leviers de décarbonation

Les leviers susceptibles de réduire les émissions de la construction en général, et du ciment en particulier, sont multiples. On peut tenter de les examiner en allant des actions les plus « comportementales » jusqu'aux plus « technologiques ».

- La maîtrise des besoins en surfaces de bâtiments (inversion des tendances à la hausse, ou baisse pour certains usages) est aujourd'hui mise en avant dans un grand nombre de scénarios. Quoiqu'elle puisse sembler quelque peu radicale, cette voie pourrait résulter de la combinaison d'un grand nombre d'évolutions sociologiques ou de changements d'habitudes, tendant à une meilleure mutualisation des espaces entre usages : taille des ménages, modèles de co-logement, bâtiments plus multifonctionnels, modes de travail au bureau et en télétravail, action sur les locaux vacants, degré d'occupation des résidences secondaires, etc. Même si le résultat de la combinaison de ces facteurs est difficile à anticiper, il convient de noter que, dans un pays comme la France où la majorité du parc immobilier futur est déjà en place, de petites variations dans la demande totale de surfaces peuvent suffire à provoquer des variations fortes dans le total de surfaces nouvelles à construire, et donc dans la demande de ciment.
- L'évitement de la construction neuve : requalifier le bâti existant permet de limiter les destructions-reconstructions, ou simplement d'augmenter les qualités des bâtiments traités ou leur adéquation avec les usages anticipés¹. De telles requalifications doivent bien sûr être liées à la rénovation thermique, indispensable pour une majorité de bâtiments, en vue de l'atteinte de la neutralité carbone². Au-delà de la contribution directe de ce levier, on peut souligner combien il est susceptible d'ouvrir un champ d'expression

¹ Par exemple, en préservant une flexibilité future des aménagements.

² Voir notamment Cricqui P. (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 5 – Logement*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, novembre, 160 p.

fécond pour la création architecturale et l'acte de bâtir, dans un contexte où sur le temps long, et même sans décarbonation, le rythme de la construction neuve sera de toute façon appelé à baisser pour des raisons démographiques – même si le rythme de cette baisse peut faire débat.

- La préférence pour des typologies de bâti plus sobres en matériaux de construction : cela peut passer par un plus faible recours aux constructions de grande hauteur, plus gourmandes en matériaux, et aux sous-sols, parkings notamment, qui requièrent d'importantes quantités de béton¹. De même, le recours plus fréquent à des trames porteuses plus denses et de moindre portée est de nature à réduire les quantités de matériaux nécessaires.
- Le recours à des modes constructifs alternatifs au béton : structures et ossatures en bois, construction en pierre, en terre, en brique... et, pour les travaux de voirie, limitation des équipements en béton de ciment, et recours à des matériaux et modes de construction alternatifs, y compris peut-être les enrobés bitumineux².
- L'optimisation de la conception et de la mise en œuvre des bétons et aciers, de manière à employer à chaque fois la juste quantité. Puisque les émissions du béton sont portées essentiellement par le clinker, cela inclut la conception, la production et la mise en œuvre de bétons à plus faible proportion de ciment, et de ciments à plus faible contenu en clinker (voir ci-après).
- La décarbonation de la production des matériaux de construction conventionnels.

Dans le cas du ciment, cette dernière catégorie peut passer notamment par :

- l'optimisation de l'efficacité énergétique de la production de clinker, qui porte principalement sur l'efficacité du processus thermique. On peut citer aussi l'efficacité quant à la consommation d'électricité, et l'optimisation du positionnement temporel de l'appel aux broyeurs, pour positionner la consommation d'électricité au moment le plus favorable pour le système électrique ;
- la substitution des combustibles fossiles par des combustibles bas-carbone, dont notamment la biomasse et ses déchets ;
- la capture et la séquestration des émissions de CO₂.

Ces leviers technologiques sont davantage détaillés ci-après.

¹ Ainsi des aménagements urbains à très forte densité, *a priori* souhaitables dans le cadre de l'objectif « zéro artificialisation nette » (ZAN), peuvent dans certains cas (par exemple, s'ils impliquent de forts volumes de parkings en ouvrage) être dommageables en termes d'émissions de GES à la construction.

² Les enrobés bitumineux sont le matériau usuel de revêtement des chaussées ; ils sont aussi appelés « bétons bitumineux » puisqu'il s'agit de granulats maintenus par un liant, en l'occurrence du bitume. En dépit de leur origine pétrolière et de l'image négative qui peut y être attachée, ils ont, d'après la base carbone de l'Ademe, une empreinte à la tonne environ trois fois plus faible que celle des bétons de ciment routiers. La question posée ici est celle d'une possible substitution s'appuyant entre autres sur les premiers pour réduire certains usages des seconds.

2. Quelle trajectoire pour la demande de ciment ?

Comme dans la plupart des secteurs, le défi de la construction de scénarios, qu'il s'agisse de scénarios de type *business-as-usual* ou de scénarios destinés à tracer un chemin de décarbonation, tient largement aux interactions entre l'ensemble des leviers ci-dessus, avec notamment la question de l'équilibre entre leviers de maîtrise de la demande et leviers technologiques de décarbonation.

Dans un rapport dédié aux matériaux dans la transition¹, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) a notamment mis en avant l'enjeu de l'« efficacité matière » (réduction du tonnage de matériaux utilisés, pour un même service final), susceptible de permettre, à l'échelle mondiale et à long terme, de passer d'une augmentation (modérée) des volumes de ciment à une baisse (modérée) de ces mêmes volumes. Dans le scénario mondial de neutralité carbone de l'AIE (« Zero Net Emissions by 2050 Scenario »), postérieur à la publication spécifique dédiée aux matériaux, la production mondiale de ciment reste constante de 2020 à 2030. Cela ne constitue pas toutefois une nette rupture de tendance, la production mondiale étant déjà passée, depuis 2014, d'une croissance soutenue à un plateau. Les travaux menés dans le cadre de l'OCDE conduisent aussi à mettre en avant cette efficacité matière comme un enjeu de premier rang².

Pour ce qui est de la France, le plan de transition sectoriel pose la question de l'équilibre entre maîtrise de la demande et technologies, en mettant en avant deux scénarios contrastés, intitulés « pari – *techno-push* » et « choc – sobriété *low-tech* », qui renvoient dans leur esprit et dans leurs arbitrages aux deux scénarios les plus extrêmes de l'exercice transversal « Transition(s) 2050 » conduit par l'Ademe³. Dans le premier scénario, la demande française de ciment diminue de 10 % d'ici 2050 ; dans le second, elle diminue de 56 %.

Quelles que soient les réponses apportées à ce débat, la baisse tendancielle de la demande en ciment reste une caractéristique, en France et dans les pays comparables, tant des décennies passées que de celles à venir. Ainsi la demande de ciment en France a été divisée par deux en un demi-siècle, après un pic en 1974. Le ralentissement démographique, les politiques de limitation de l'artificialisation des sols, ainsi que l'entrée en vigueur de la réglementation RE 2020 pour les bâtiments neufs, devraient conduire à la poursuite de cette baisse. Dans le « scénario de référence » du PTS, qui, à la différence des deux scénarios susmentionnés, n'atteint pas les objectifs de décarbonation mais se fonde sur les seules tendances et leviers d'action les plus sûrs, la consommation de ciment baisse de 15 % entre 2020 et 2050.

¹ Agence internationale de l'énergie (2019), *Material Efficiency in Clean Energy Transitions*, rapport technique, mars, 158 p.

² Bataille C. (2019), « *Low and zero emissions in the steel and cement industries. Barriers, technologies and policies* », OCDE, Issue Paper, 44 p.

³ <https://transitions2050.ademe.fr/>

Le contexte dans lequel il faut examiner les actions de décarbonation du ciment est donc vraisemblablement, et même en l'absence de décarbonation, un contexte de baisse des volumes, donc de surcapacités et de restructurations progressives de l'outil industriel cimentier.

3. Sur quels leviers calculer des coûts d'abattement ?

En théorie, toutes les actions listées précédemment présentent des coûts d'abattement. Cependant, dans de nombreux cas et notamment pour les actions les plus « comportementales », ces coûts ne sont pas facilement identifiables : quel coût, au sens large, y a-t-il à organiser différemment les usages d'un bâtiment pour qu'il rende davantage de services ? Ou à concevoir différemment un projet immobilier, afin d'éviter de construire des parkings en sous-sol ? Ou à raffiner l'ingénierie et les techniques de mise en œuvre du béton, pour, sur un même projet, mieux optimiser la quantité nécessaire ? Ou encore à réviser les Eurocodes, pour ramener les surdimensionnements de sécurité au niveau reconnu comme suffisant par les experts ?

Pour présenter des calculs robustes, on se concentre ici sur les leviers les plus centrés sur les processus de production du matériau ciment. Non parce que les autres leviers seraient moins pertinents, mais du fait même des limites d'application du calcul de coûts d'abattement qui ne permet pas d'éclairer tous les leviers.

Efficacité matière, par une diminution des taux de clinker dans le ciment

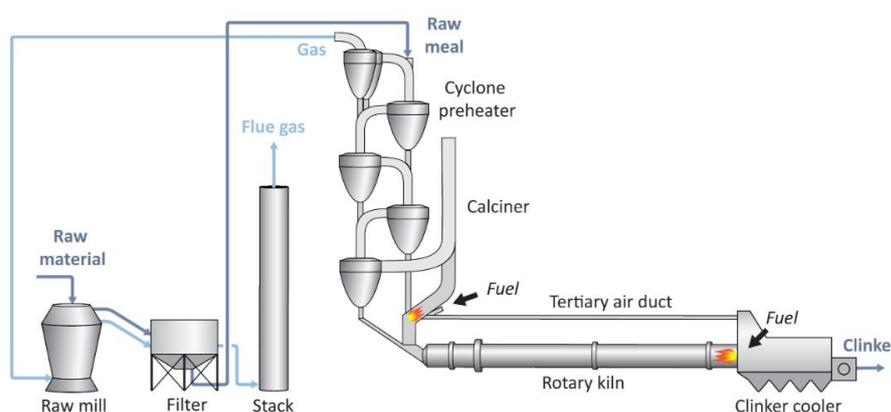
Ce levier peut comprendre l'incorporation dans le ciment de davantage de résidus d'autres industries (laitier de haut-fourneau, cendres volantes, etc.), ou la production de substituts. Ces résidus d'autres industries étant en quantités limitées, et surtout déjà largement mobilisés, il n'y a pas lieu de calculer un coût par rapport à une option sans incorporation. En revanche, la voie consistant à mettre en œuvre une production d'argiles calcinées, qui peuvent être un composant majeur de certains ciments (ciments LC3, où le taux de clinker n'est que de 50 % environ), peut donner lieu à un calcul de coût d'abattement. Il s'agit en effet d'une filière sans limitation forte de gisement, étant donné la disponibilité d'argile ; et qui permet d'identifier clairement une substitution entre clinker et argiles calcinées.

Efficacité énergétique du processus thermique ou upgrading

Il s'agit essentiellement de passer de la *voie humide*, encore en activité dans certaines cimenteries, ou d'autres voies intermédiaires, à la *voie sèche avec précalcinateur*. En effet, la manipulation du cru (farine de calcaire et d'argile) étant peu aisée, le processus ancien consistait à mélanger ce cru à de l'eau pour en faire une pâte introduite dans le four. La présence d'eau augmente alors le besoin en énergie thermique. Les meilleures techniques

disponibles aujourd'hui consistent à injecter le cru sec dans une tour de préchauffage, où il est progressivement chauffé, et décarbonaté, en croisant, dans des cyclones successifs, les gaz chauds issus du four ; le four rotatif n'assurant plus que la fin du processus.

Figure 3 – Cimenterie en voie sèche



Source : CEMCAP (2018),
CEMCAP Comparative
Techno-Economic
Analysis of CO₂ Capture
in Cement Plants,
novembre, p. 16

Ce levier ne fournit cependant qu'une petite part des réductions d'émissions nécessaires à la neutralité carbone. Surtout, son existence même est fonction du scénario considéré : le parc aux meilleures techniques disponibles, c'est-à-dire les installations fonctionnant déjà en voie sèche avec précalcinateur, couvre aujourd'hui la moitié de la production de clinker, et suffirait donc vraisemblablement à en couvrir la totalité ou presque dans des scénarios à forte baisse de la demande totale en clinker. De fait, le scénario « sobriété *low-tech* » du PTS ne mobilise pas ce levier. Ainsi d'éventuels investissements d'*upgrading* pourraient conduire à terme à ce que la capacité installée en voie sèche soit supérieure aux besoins. Ces investissements ne sont donc pas automatiquement sans regrets.

Substitution des combustibles carbonés par des combustibles bas-carbone (« mix thermique »)

Il s'agit principalement de mobiliser de la biomasse, ou ses déchets, en remplacement des combustibles fossiles.

À l'échelle d'un four cimentier, la substitution ne peut pas atteindre 100 %, car la biomasse ou ses déchets ont un pouvoir calorifique insuffisant – de peu – pour fournir la température élevée nécessaire au processus. C'est pourquoi, pour pousser très fortement ce levier, il est nécessaire d'être déjà en voie sèche avec précalcinateur : en effet, le point de combustion en pied de précalcinateur représente alors plus de la moitié de l'apport thermique et fonctionne à une température nettement inférieure à celle du foyer du four rotatif.

Ce levier renvoie plus largement à la question de la biomasse comme substitut aux combustibles fossiles, du gisement disponible et des conflits d'usage : dans la quasi-totalité

des usages actuels de combustibles ou de carburants fossiles, la biomasse, en combustion directe ou sous forme de biocarburant, biométhane, etc., est une voie de décarbonation envisageable. La question est donc celle du gisement de biomasse pour l'ensemble de ces usages, étant entendu que le besoin total est potentiellement très supérieur au gisement disponible. L'évaluation socioéconomique d'un recours à la biomasse ne ferait donc sens qu'à la condition de prendre en compte cette rareté, à travers un prix traduisant la tension sur cette ressource. Or la calibration de ce prix, c'est-à-dire du niveau de tension sur la ressource, supposerait de considérer l'équilibre d'ensemble du système via un modèle technico-économique détaillé de l'ensemble du système énergétique en transition.

Ainsi l'enjeu de la répartition de la biomasse entre ses usages possibles doit être éclairé, en complément du calcul de coûts d'abattement, par des exercices spécifiques sur la bonne adéquation entre ressource et usages. À ce titre, le haut niveau de température requis par le processus cimentier, qui rend très difficile toute électrification¹, est un argument en faveur d'une priorisation de la biomasse vers ce type d'usage.

Capture et stockage ou utilisation du CO₂

Il s'agit de modifier les process des cimenteries pour, au lieu d'émettre de manière diluée le CO₂ dans l'atmosphère, le récupérer sous forme concentrée. Deux destinations de ce CO₂ sont alors en général privilégiées :

- le stockage géologique (définitif). Ce premier cas peut donner lieu à un calcul de coût d'abattement, par comparaison des surcoûts aux quantités d'émissions évitées ;
- l'utilisation du CO₂, notamment pour la confection de combustibles ou de carburants de synthèse, en combinant ce CO₂ avec de l'hydrogène. Ce schéma, mis en avant notamment pour les sites cimentiers situés loin d'un possible site de stockage du CO₂, n'empêche pas l'émission du carbone – puisqu'il sera émis, *in fine*, par la combustion du combustible ou carburant de synthèse, mais « mutualise » ces émissions entre deux usages : la production de clinker est conservée, l'usage d'un combustible carboné est conservé, et, en première approche, une seule molécule de CO₂ a été émise, au lieu de deux. La principale difficulté d'un tel schéma tient à la disponibilité massive d'un hydrogène renouvelable « en bandeau² », situation que le volet *Hydrogène* de la présente série de rapports n'anticipe qu'« en fin de trajectoire de décarbonation³ ». À défaut, il faudrait envisager un surdimensionnement de l'installation de synthèse de carburant et un stockage temporaire du CO₂, de manière à ne fonctionner qu'à certains moments de l'année.

¹ Le rapport de suivi de l'AIE sur le ciment cite des pistes d'électrification, mais lointaines. Voir AIE (2022), *Cement – Tracking Report*, Agence internationale de l'énergie, septembre.

² C'est-à-dire fourni tout au long de l'année.

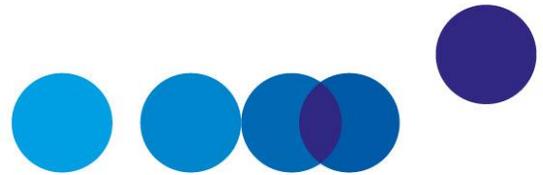
³ Criqui P. (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 4 – Hydrogène*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, mai, 82 p.



Nous nous concentrons donc ci-après, pour le calcul des coûts d'abattement, sur deux leviers :

- le développement d'une production d'argile calcinée, venant se substituer à du clinker ;
- le déploiement de la capture et séquestration du carbone (CSC), nécessaire pour décarboner entièrement la production de clinker restante après application des autres leviers.

Au-delà du cas français, ces leviers se trouvent correspondre à ceux mis en avant par l'AIE, dans son scénario de neutralité carbone pour 2050, comme fournissant les plus fortes contributions à la décarbonation du secteur.



CHAPITRE 3

LES ARGILES CALCINÉES POUR DIMINUER LE BESOIN DE CLINKER

Comme c'est la production de clinker qui est à l'origine de la plus grosse part des émissions lors de la fabrication du ciment, il est naturel de s'intéresser à la possibilité de produire du ciment à taux de clinker réduit. Se pose alors la question des matières à substituer au clinker.

Le laitier de haut-fourneau et les cendres volantes, déjà incorporés aux ciments aujourd'hui, ne sont disponibles qu'en quantités limitées et très vraisemblablement appelées à se raréfier encore davantage avec la diminution de l'usage des hauts-fourneaux (celle-ci pouvant résulter à la fois de moindres besoins en acier neuf et du développement de la réduction directe du minerai de fer), et, pour les cendres volantes, avec la fin des centrales électriques au charbon.

Restent donc, comme candidat principal, les argiles calcinées. On calcule dans cette section le coût d'abattement associé à une modification des « recettes » de ciment, où les argiles calcinées viennent se substituer partiellement au clinker.

1. La production d'argiles calcinées

La production d'argiles calcinées (dites aussi « activées ») suit, dans les grandes lignes, le même procédé représenté en figure 2 pour la production du clinker ; la différence tient à ce qu'on n'introduit pas dans le processus un cru cimentier constitué à 80 % de calcaire, mais seulement des argiles. Ainsi les émissions de procédé, qui venaient du carbone contenu dans le calcaire, sont évitées. La température de cuisson est réduite, ce qui d'ailleurs peut aider à incorporer, sous réserve de leur disponibilité, un fort taux de biomasse ou d'autres combustibles alternatifs légèrement moins calorifiques que les combustibles fossiles (voir ci-dessus le levier « mix thermique ») ; et le besoin en quantité de combustible, par tonne de matériau calciné, est légèrement réduit lui aussi. Néanmoins, même si les émissions de processus (deux tiers des émissions du clinker) sont supprimées, l'essentiel des émissions énergétiques (un tiers des émissions du clinker) est conservé.

Il est nécessaire, pour produire les argiles calcinées, de s'équiper de fours dédiés ; mais ceux-ci peuvent être de capacité¹ nettement réduite, dans un facteur de 3 à 10, par rapport aux fours à clinker. Il peut s'agir de fours neufs, ou encore d'anciens fours à clinker reconvertis, ces deux options apparaissant, d'après les hypothèses mobilisées (voir ci-après en [annexe 2](#)), aboutir au même ordre de coûts. De fait, les deux configurations existent dans les premiers projets en cours d'élaboration ou de mise en œuvre².

2. Les émissions évitées par les argiles calcinées

La limite de cette voie tient à ce que les argiles calcinées n'ont pas les mêmes propriétés de liant que le clinker, et ne peuvent donc s'y substituer que partiellement : les ciments « ternaires aux argiles » ou LC3³ intègrent environ 30 % d'argiles calcinées, 20 % d'autres intrants, mais toujours 50 % de clinker, ce qui est toutefois une forte réduction par rapport aux ciments « CEM I » et « CEM II » sans argiles (environ 95 % et 75 % de clinker, respectivement) qui constituent l'essentiel de la production aujourd'hui.

L'ampleur de la réduction d'émissions permise par les argiles calcinées dépendra de l'étendue de leur adoption. Si elles entraient dans la composition de l'essentiel des ciments produits, les argiles calcinées seraient en capacité de réduire d'un quart à un tiers les émissions du secteur, à production donnée.

3. Les coûts d'abattement calculés

Pour le calcul des coûts d'abattement socioéconomique, on recourt à la « formule 3 »⁴. En effet, les dates d'investissement dans des fours d'argiles calcinées ne sont pas (ou peu) contraintes par des cycles industriels préexistants. Au demeurant, se placer en « formule 1 » abaisserait les coûts d'abattement présentés ci-après de 35 %⁵.

On divise ensuite le calcul en deux cas, selon que le ciment sans argiles substitué était de catégorie CEM I ou CEM II, ce qui joue sur les ratios de substitution entre les différents

¹ En tonnage annuel de matériau effectivement traité.

² Par Vicat à Xeulley (Meurthe-et-Moselle), Calcia à Bussac-Forêt (Charente-Maritime), Lafarge à La Malle (Bouches-du-Rhône) et Saint-Pierre-la-Cour (Mayenne).

³ *Limestone Calcined Clay Cement*.

⁴ La « formule 3 » consiste à calculer, sur une année de fonctionnement du projet, le ratio entre les coûts annualisés du projet et l'abattement d'émissions annuel. Voir l'[annexe 3](#).

⁵ Cette valeur résulte de la combinaison du taux d'actualisation public (4, %/an) et de la durée de vie économique des investissements (vingt ans) ici retenus.

matériaux¹. On prend en compte le coût d'investissement dans le four de calcination des argiles, ainsi que les petits écarts de consommation de combustible résultant des substitutions entre matériaux (valeurs indiquées en [annexe 2](#)). Cependant, on ne considère pas que la moindre production de clinker permise par les argiles calcinées conduit à des économies en investissements ou en réinvestissements, que ce soit dans les fours ou dans d'autres éléments de l'infrastructure de production du clinker. En d'autres termes, on suppose que la transition vers l'incorporation d'argiles calcinées crée des actifs échoués, ou accélère la création d'actifs échoués, dans la production de clinker ; et on tient compte des coûts correspondants : il s'agit d'une hypothèse prudente, cohérente avec le constat d'une industrie dont les volumes décroissent.

L'application des hypothèses présentées en [annexe 2](#) conduit aux résultats détaillés dans le tableau 2, à lire conjointement aux avertissements méthodologiques présentés dans l'introduction du rapport.

Tableau 2 – Coûts d'abattement estimés des argiles calcinées

Transition depuis un ciment CEM I	Transition depuis un ciment CEM II	Moyenne (25 % CEM I – 75 % CEM II)
<i>Coût du four à argiles</i> + 12 €/tCO ₂	<i>Coût du four à argiles</i> + 25 €/tCO ₂	
<i>Diminution de combustible</i> - 12 €/tCO ₂	<i>Variation de combustible</i> ~ 0	
0 €/tCO₂	25 €/tCO₂	15 €/tCO₂

Les valeurs sont exprimées en €₂₀₁₈.

Source : *calculs des auteurs*

Ces résultats se composent de l'amortissement du four de calcination des argiles, qui pèse plus lourd dans un sous-cas que dans l'autre, car la quantité de clinker évitée par chaque tonne d'argile calcinée dépend fortement de la recette de ciment substituée² ; et de petits écarts de besoin de combustible entre formules de ciment, qui jouent positivement ou négativement selon le cas. Les coûts d'abattement obtenus sont, en valeur absolue, peu sensibles aux hypothèses : par exemple, un doublement des coûts du combustible abaisse le coût d'abattement moyen de 15 à 10 €/tCO₂.

¹ Voir les hypothèses de composition des CEM I et II, en [annexe 2](#).

² Voir les hypothèses de composition en [annexe 2](#).

Dans tous les cas, les coûts d'abattement de cette voie restent très faibles en regard non seulement de la « valeur de l'action pour le climat » (250 €₂₀₁₈/tCO₂ dès 2030), mais aussi du prix des quotas du système d'échange européen, de l'ordre de presque 100 €/tCO₂ au début 2023, suite aux réformes du marché et à la dynamique du Pacte vert pour l'Union européenne. Ainsi, ramené à l'échelle des émissions évitées, l'investissement dans les argiles calcinées permet des réductions d'émissions à coût très faible – sous réserve bien sûr que l'investissement ne se révèle pas *a posteriori* très surdimensionné.

Une objection pourrait être adressée à ce calcul, à savoir que, en accélérant la diminution de l'usage du clinker, l'introduction des argiles calcinées pourrait accélérer la réduction du nombre de sites producteurs de clinker et augmenter les distances à faire parcourir par le matériau, engendrant ainsi des coûts. Cet effet pourrait être pris en compte dans le calcul du coût d'abattement, puisqu'il sera, *in fine*, payé par les usagers du ciment. Même avec des hypothèses pessimistes, le coût d'abattement estimé ci-dessus à 15 €/tCO₂ monterait tout au plus à 40 €/tCO₂, laissant la conclusion ci-dessus inchangée.

4. Les argiles calcinées ne sont aujourd'hui pas valorisées par le marché européen des quotas

Même si le calcul socioéconomique ne renseigne pas directement sur la rentabilité privée des investissements de décarbonation¹, le très bas niveau des coûts calculés ci-dessus suggère que cette rentabilité privée serait relativement proche d'être atteinte ; et même qu'elle serait d'ores et déjà atteinte, avec une valorisation du carbone à hauteur des prix actuels des quotas du marché européen² – au point qu'on pourrait se demander pourquoi la voie des argiles calcinées n'est pas déjà largement déployée, ou, inversement, si on a oublié certains coûts dans le calcul.

Il faut en fait souligner que la diminution du taux de clinker par incorporation d'argiles calcinées, comme d'ailleurs tous les leviers listés ci-dessus (voir la section 1 du chapitre 2 *supra*), avant la décarbonation technique du clinker, n'est aujourd'hui pas valorisée par le système européen d'échange de quotas carbone dès lors que la baisse de production de clinker d'un site cimentier dépasse 15 %. En effet, les quotas gratuits dont bénéficie le secteur du ciment au titre de l'exposition à la concurrence internationale³ sont proportionnels à la quantité de clinker produite par chaque site industriel, en deçà de ce

¹ Voir l'introduction *supra*.

² Ou Système communautaire d'échange de quotas d'émissions (SCEQE).

³ Ces quotas gratuits sont justifiés par le constat que l'application directe d'un prix du carbone augmenterait significativement le coût du clinker produit dans l'Union européenne et provoquerait donc, en l'absence de mécanisme d'ajustement aux frontières, des importations massives de clinker non soumis au prix du carbone.

niveau de production¹. Cela, en neutralisant l'impact du prix des quotas sur les prix du clinker, annule presque tout effet incitatif via les prix, pour l'ensemble des leviers allant de la demande en ciment jusqu'à la diminution du taux de clinker par les argiles calcinées. Seule la réduction – puis la suppression – des quotas gratuits, qui va de pair avec la mise en place d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF), permettra au prix des quotas de se diffuser vers l'aval, et de « signaler » tout au long de la chaîne de valeur, jusqu'aux usagers du ciment, la nécessité de réduire les émissions correspondantes.

5. Quels outils pour déclencher pleinement les réductions d'émissions permises par les argiles calcinées ?

À défaut de valorisation par le système d'échanges de quotas européens, la réglementation environnementale du bâtiment RE 2020 fixe pour les bâtiments neufs un plafond d'émissions calculé en cycle de vie, y compris la construction du bâtiment, ce qui confère au carbone, dans les optimisations conduites par les maîtres d'œuvre, une valeur implicite mais potentiellement significative. Cette réglementation sera vraisemblablement, pour les usages du ciment qu'elle couvre, la première à soutenir la rentabilité des argiles calcinées – ainsi que des leviers de décarbonation agissant par réduction de l'usage du ciment. De fait, la récente normalisation de ciments incorporant des argiles calcinées² et les premiers projets de fours de calcination d'argiles sont concomitants à son entrée en vigueur.

Plus largement, la normalisation d'une large palette de formulations de ciments, mais aussi bien sûr de bétons, intégrant des argiles calcinées³ et l'appropriation de ces nouveaux produits par l'ensemble de la filière, depuis la conception des structures jusqu'à la mise en œuvre sur les chantiers, constituent un processus indispensable qui reste encore largement à réaliser. Il y a là certainement des « coûts d'apprentissage » (non pris en compte par les calculs ci-dessus), au sens le plus large, à consentir pour ouvrir l'accès aux

¹ Le benchmark appliqué, pour la période 2021-2025, est de 693 kgCO₂/t de clinker (voir le [Règlement d'exécution \(UE\) 2021/447](#) de la Commission du 12 mars 2021 déterminant les valeurs révisées des référentiels pour l'allocation de quotas d'émissions à titre gratuit pour la période 2021-2025). Il résulte du constat qu'en 2016-2017 les 10 % d'installations les plus efficaces se plaçaient à 722 kgCO₂/t de clinker, chiffre auquel une diminution est appliquée. Il a par ailleurs été constaté que, jusqu'à la phase 3 (2013-2020) du marché de quotas, les formules d'allocation de quotas gratuits pour le secteur cimentier, parce qu'elles comportaient de forts effets de seuil, ont pu engendrer des contre-incitations, des comportements stratégiques et des profits sans cause (voir Branger F. [2015], [Impact des politiques climatiques sur les industries énergie-intensives](#), thèse d'économie de l'environnement sous la dir. de P. Quirion). La présence de seuils a été fortement réduite en phase 4, sans qu'il soit possible à ce jour de dire si les effets correspondants ont été entièrement supprimés.

² En 2021, dans le cadre de la norme EN 197-5.

³ Voir par exemple « [LC3 in codes and standards](#) », *CemNet.com*, article du 11 juillet 2022.

réductions d'émissions massives que permettent les archives calcinées. Le très faible coût d'abattement calculé ici traduit l'importance que revêt l'accélération de ce processus.

Ainsi, le mix d'instruments de politique publique à concevoir ou à amplifier pour mobiliser rapidement et pleinement le gisement de réductions d'émissions à bas coûts qu'offrent les argiles calcinées semble devoir porter sur :

- l'apprentissage rapide, par l'ensemble de la filière aval, de l'incorporation d'argiles calcinées dans les ciments et bétons, et la levée des freins identifiés ;
- la vérification de l'adéquation entre les investissements dans la production d'argiles calcinées et le gisement vraisemblable d'incorporation d'argiles calcinées, et, le cas échéant, la correction des écarts, en veillant toutefois à ce que le mode de sécurisation de ces investissements ne vienne pas stimuler la demande totale en ciments et bétons, qui doit pouvoir suivre une trajectoire de diminution rapide ;
- l'extension de la prise de conscience et de la prise en compte réglementaire de l'empreinte climatique de l'usage du ciment, au-delà du secteur du bâtiment, à celui des voiries et réseaux – point dont le champ d'application dépasse celui des argiles calcinées.



CHAPITRE 4

LA CAPTURE ET LA SÉQUESTRATION DE CARBONE POUR PRODUIRE DU CLINKER BAS-CARBONE

Puisqu'il ne sera pas possible d'éliminer totalement l'utilisation de clinker, la capture et la séquestration du carbone (CSC¹) est un gisement de réduction d'émissions à considérer impérativement.

La CSC mobilise deux opérations successives : la capture du CO₂ sur l'installation et son stockage géologique.

1. La capture du CO₂ : de multiples voies technologiques

Plusieurs voies techniques peuvent être employées pour l'étape de capture : absorption par un solvant aux amines, boucle au calcium, capture par oxycombustion (qui consiste à introduire de l'oxygène pur plutôt que de l'air dans le four, de sorte que les fumées en sortie présentent une forte proportion de CO₂), capture par cryogénie, etc. Elles ont été examinées notamment par le projet européen CEMCAP², ou encore par le programme de R & D de l'AIE « IEAGHG³ ».

Ces diverses voies se distinguent par :

- leurs coûts ;
- leur capacité à être ajoutées en bout d'installations existantes, ou au contraire le besoin qu'elles imposent de reprendre l'ensemble de l'installation. Par exemple

¹ Ou CCS (*Carbon Capture and Storage*), en anglais.

² <https://www.sintef.no/projectweb/cemcap/>

³ International Energy Agency Greenhouse Gas R&D programme : <https://ieaghg.org/>

l'oxycombustion atteint de faibles coûts complets, mais se traduit par une modification d'ensemble de l'installation¹, tandis que d'autres voies comme la capture par boucle de calcium peuvent se prêter à un déploiement « *end of pipe* », c'est-à-dire en sortie d'installation ;

- leur consommation de chaleur et d'électricité – ou même leur production d'électricité, dans l'un des cas.

Le rapport de suivi de l'AIE relatif à la CSC² liste des réalisations en cours, qui couvrent largement le spectre des technologies.

Enfin, on peut signaler qu'une éventuelle électrification directe de l'apport de chaleur au four, quoique posant question en matière de rendement énergétique et de disponibilité d'électricité bas-carbone, aurait l'avantage d'assurer directement la concentration du CO₂ « de procédé ».

Pour les calculs des coûts de capture, nous considérons les différentes voies techniques traitées par l'étude CEMCAP, en retenant chaque fois l'option selon laquelle le CO₂ doit être liquéfié pour être transporté par navire, option légèrement plus coûteuse en investissements et en énergie. Pour calculer les coûts d'abattement, nous reprenons les coûts et les différences techniques entre voies (consommations d'énergie, etc.) déterminées par le CEMCAP, et retenons les hypothèses de coûts et de contenu carbone des énergies détaillées en annexe.

Il ressort que la capture, sans le stockage du CO₂ ni son transport vers le site de stockage, augmente les coûts du clinker dans une fourchette de 40 à 70 euros par tonne de clinker, et 60 à 120 euros par tonne de CO₂ évitée³. Ces coûts proviennent pour partie des coûts supplémentaires (CAPEX et OPEX) de l'installation industrielle, et pour partie des surcroûts d'émissions liés aux surconsommations d'énergie d'une installation avec captage ; la répartition entre les deux étant variable selon les voies techniques, depuis une répartition un quart-trois quarts jusqu'à une répartition trois quarts-un quart.

¹ La situation est donc analogue à celle de l'hydrogène obtenu par reformage de méthane, où l'adjonction de la CSC incite à basculer depuis le vaporeformage vers le reformage autothermique, lequel est analogue à l'oxycombustion. Voir Criqui P. (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 4 – Hydrogène*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, mai, 82 p.

² <https://www.iea.org/reports/carbon-capture-utilisation-and-storage-2>

³ Soit un coût de captage à peu près équivalent à ceux rencontrés dans d'autres secteurs, hormis la chimie de base (hydrogène, ammoniac, méthanol) où le coût de captage est plus faible – voir par exemple la comparaison avec l'acier dans IEAGHG (2018), *Cost of CO₂ Capture in the Industrial Sector: Cement and Iron and Steel Industries. IEAGHG Technical Review*, septembre, 65 p., et avec l'ensemble des secteurs dans Ademe (2020), « *Le captage et stockage géologique de CO₂ (CSC) en France. Le CSC, un potentiel limité pour la réduction des émissions industrielles* », avis technique, juillet, 43 p.

2. Le stockage du CO₂ : une possibilité limitée à certains territoires

La décarbonation par CSC n'est accessible que là où le CO₂ concentré pourra être expédié vers un site de stockage. Cela comprend les littoraux, et aussi les environs de certains bassins géologiques à l'intérieur des terres, tel le bassin aquitain, en fonction d'enjeux d'acceptabilité du stockage, ou ailleurs en fonction d'un éventuel transport du CO₂ par canalisation¹. Ainsi l'examen de la CSC comme voie de décarbonation des productions de clinker qui subsisteront pose directement la question de la localisation de l'industrie cimentière. Il s'agit d'une question majeure, face à laquelle toutes les entreprises cimentières ne sont pas dans des situations identiques, en fonction de la localisation historique de leurs sites de production de clinker.

Le Plan de transition sectoriel (PTS) élaboré par l'Ademe diagnostique dans son « scénario de référence » que 20 % seulement de la production de ciment actuelle est implantée dans des territoires qui, avec un niveau de certitude élevé, permettront la CSC – mais ce chiffre pourrait s'avérer plus élevé dans des scénarios plus favorables. Ainsi, même dans son scénario dit « *techno-push* »², le PTS de l'Ademe suppose que deux tiers, mais non la totalité, de la production de clinker restante en 2050 est connectée à une infrastructure de transport et stockage du CO₂ – si bien qu'un tiers de cette production voit ses émissions non abattues.

Au-delà de la scénarisation des volumes, le constat central ici est que la valorisation du carbone augmente les distances sur lesquelles il peut être pertinent de transporter du clinker ou du ciment.

Aujourd'hui, puisque le clinker et le ciment sont des matériaux peu coûteux au regard de leur poids, ces distances se limitent à quelques centaines de kilomètres, au-delà desquelles les produits transportés perdent de leur compétitivité en comparaison d'un clinker ou d'un ciment produit plus localement. Dans un avenir où la valeur du clinker décarboné par CSC serait pleinement prise en compte, un transport supplémentaire de ce clinker bas-carbone représentera des montants modestes compte tenu de son surcoût de production. Concrètement, il s'agirait de transporter le clinker depuis des sites de production en nombre limité, équipés de la CSC, vers des « stations de broyage » plus nombreuses et mieux réparties sur le territoire, où le clinker est mélangé aux autres ingrédients du ciment. La logistique du secteur est déjà organisée, dès aujourd'hui, selon un tel schéma (voir la Carte 1 ci-avant) : dans le cadre de la restructuration progressive

¹ Voir notamment Ademe (2020), « [Le captage et stockage géologique de CO₂ \(CSC\) en France...](#) », *op. cit.*

² Par opposition au scénario « sobriété *low-tech* », qui repose beaucoup plus fortement sur la baisse de la consommation de ciment. Il n'est pas exclu bien sûr que des éléments des deux scénarios puissent être combinés.

du secteur, les sites où il est mis fin à la production de clinker poursuivent en général leur vie en tant que stations de broyage.

Puisqu'on se place ici dans une perspective où les productions non évitées de clinker auraient vocation dans leur quasi-totalité à être décarbonées par CSC, on prend en compte dans le calcul un surcoût de transport (lié à l'allongement moyen des distances) de 10 euros par tonne de clinker en moyenne. En revanche, on ne prend pas en compte de coûts de création de nouveaux sites cimentiers : cela correspond à faire l'hypothèse que la diminution de production de clinker sera suffisamment forte pour que la production restante, qui devra être décarbonée par CSC pour l'essentiel de ses volumes, puisse être accueillie sur les sites compatibles avec la CSC.

Enfin, en cohérence avec le volet *Hydrogène* de la présente série de rapports¹, on retient un coût de 50 €/tCO₂ pour le transport et le stockage, correspondant à l'ordre de grandeur du coût pour une infrastructure de stockage en mer de grande échelle, utilisée à plein sur toute sa durée d'amortissement.

3. Les coûts d'abattement calculés

Pour les mêmes raisons que pour les argiles calcinées, on calcule le coût d'abattement selon la « formule 3 » (voir la section 3 du chapitre 3 *supra*, ainsi que l'[annexe 3](#)). Une fois l'ensemble des éléments ci-dessus pris en compte, le coût d'abattement par mise en œuvre de la CSC ressort dans une fourchette de 135 à 215 €/tCO₂². Ces chiffres se décomposent, selon les voies, en :

- 60 à 120 €/tCO₂ de surcoûts de l'installation (déjà mentionnés ci-dessus, dans la section 1 du présent chapitre) ;
- 60 à 80 €/tCO₂ d'incidence du coût de transport et de stockage du CO₂ – cette composante est supérieure à l'hypothèse de 50 euros par tonne de CO₂ stockée, car les surconsommations de l'installation impliquent que les émissions évitées sont un peu inférieures aux émissions stockées³ ;
- 15 à 20 €/tCO₂ d'incidence des coûts d'allongement des transports de clinker.

¹ Criqui P. (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 4 – Hydrogène*, *op. cit.*

² Comme vu dans la section 3 du chapitre 3, se placer en « formule 1 » abaisserait ces valeurs de 35 %.

³ Alternativement, on pourrait supposer que tous les vecteurs énergétiques concernés sont décarbonés – mais cela va *a priori* de pair avec des coûts ou prix plus élevés de ces vecteurs, et l'incidence de l'ensemble sur le coût d'abattement dépendra du détail des hypothèses.

Différents tests de sensibilité peuvent être conduits :

- en multipliant par deux les hypothèses de coût de l'énergie¹, les coûts d'abattement augmentent, pour se fixer dans une fourchette de 160 à 300 euros par tonne de CO₂. Cela rappelle que la capture du CO₂ du secteur du ciment suppose des surconsommations énergétiques non négligeables² ;
- par défaut, on a supposé que le contenu carbone de l'électricité consommée est de 400 g/kWh, soit une électricité produite au gaz fossile. Il s'agit d'une hypothèse prudente, qui peut refléter, dans un contexte de rareté énergétique et de décarbonation encore insuffisante du mix électrique européen, la volonté de prendre en compte, pour l'évaluation socioéconomique, les caractéristiques « marginales » plutôt que « moyennes » du mix électrique. Dans une trajectoire de décarbonation, d'une part cette valeur marginale décroîtra³, d'autre part il pourra être légitime de comptabiliser non un contenu carbone marginal instantané, mais celui de moyens de productions « placés en face » des consommations nouvelles. En tout état de cause, un test de sensibilité conduit sous une hypothèse de 10 g/kWh abaisse et élargit légèrement la fourchette des coûts d'abattement, qui s'établit alors de 115 à 220 €/tCO₂.
- enfin, bien entendu, les coûts d'abattement dépendent directement des coûts atteints par l'infrastructure de transport et de stockage du CO₂.

Ainsi la décarbonation du clinker par CSC implique l'engagement de coûts non négligeables, mais elle « passe la barre » de la valeur de l'action pour le climat (250 €/tCO₂ en 2030) et ressort donc comme un levier qui devra être mis en œuvre.

Enfin, même si le coût d'abattement socioéconomique ne renseigne pas directement sur la rentabilité privée des investissements, le fait qu'il s'établit plus haut que le prix actuel des quotas carbone indique⁴ que cette rentabilité n'est *a priori* pas atteinte sans dispositifs de soutien additionnels.

¹ Ce qui les amène dans la fourchette des prix de marché de court terme observés en France début 2023. Que ces prix se révèlent effectifs pour toute la durée d'amortissement d'une installation industrielle constituerait un scénario très dégradé.

² Par ailleurs, puisque le surcroît de consommation de la capture passe par des vecteurs (électricité, vapeur, etc.) très différents en fonction de la voie de capture retenue, faire varier l'étagement des prix des différents vecteurs a une incidence sur le classement économique des différentes voies – comme démontré dans le cadre du programme CEMCAP.

³ Reflétant l'apparition de périodes de plus en plus larges où les productions électriques décarbonées suffiront à couvrir les besoins.

⁴ Car tous les écarts entre rentabilité socioéconomique et rentabilité privée font de cette dernière la plus difficile à atteindre : taux d'actualisation et aversion au risque plus élevés, éventuels éléments de fiscalité, etc.

4. Le clinker bas-carbone et les outils de politiques publiques

La décarbonation du clinker par CSC renvoie plus largement au déploiement d'une politique et d'infrastructures de stockage de carbone, dont l'enjeu dépasse le seul secteur du ciment, et qu'on ne développe pas ici.

Contrairement à ce qui est le cas pour la quasi-totalité des autres leviers de décarbonation du ciment et du béton, les réductions d'émissions permises par la production de clinker avec la CSC seront naturellement valorisées par le système européen de quotas. D'éventuels dispositifs publics dirigés vers le clinker décarboné par CSC semblent donc pouvoir, au besoin, se concentrer sur le soutien ou la garantie des prix du carbone « perçus » par les industriels concernés.



ANNEXES



ANNEXE 1

MEMBRES DE LA COMMISSION

Président

Patrick Criqui, directeur de recherche émérite CNRS, UMR GAEL, université Grenoble Alpes

Secrétariat

Nicolas Riedinger, coordinateur, France Stratégie¹

Maxime Gérardin, France Stratégie

Olivier de Guibert, Commissariat général au développement durable

Boris Le Hir, Commissariat général au développement durable

Aude Pommeret, France Stratégie

Alice Robinet, France Stratégie

Membres

Émilie Alberola, directrice Innovation et Recherche, Eco'Act

Yasmine Arsalane, Agence internationale de l'énergie

Emmanuel Combet, Ademe

Dominique Bureau, délégué général, Conseil économique pour le développement durable (CEDD)

Antoine Dechezleprêtre, OCDE

Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, Institut I-tesé, CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)

¹ Bérengère Mesqui fut coordinatrice à France Stratégie jusqu'en mars 2022.

Matthieu Glachant, professeur d'économie, Mines Paristech

Joseph Hajjar, Direction générale de l'Énergie et du Climat

Jan Horst Keppler, professeur d'économie, université Paris-Dauphine

David Marchal, Ademe

Yves Marignac, association négaWatt

Andrew Prag, Agence internationale de l'énergie (AIE)

Yannick Pérez, CentraleSupélec

Cédric Philibert, université Paris-Dauphine

Philippe Quirion, CNRS-Cired



ANNEXE 2

HYPOTHÈSES DE CALCUL

Les prix sont exprimés en €₂₀₁₈.

Taux d'actualisation	4,5 %
Durées d'amortissement	20 ans
Consommation d'énergie d'un four	1 MWh/t de clinker
Émissions de procédé	525 kgCO ₂ /t de clinker
Coût du combustible solide	20 €/MWh
Contenu carbone du combustible solide	330 kg/MWh

Hypothèses propres à la substitution de clinker par les argiles calcinées

Fours de calcination d'argiles

	Four neuf	Four par reconversion
Investissement	20 M€	10 M€
Capacité effective	80 kt/an	70 kt/an
Consommation d'énergie	0,75 MWh/t	0,86 MWh/t

Recettes de ciment

	CEM I	CEM II	LC3
Clinker	95 %	75 %	50 %
Gypse, laitier, calcaire, cendres	5 %	25 %	20 %
Argiles calcinées			30 %

Surcoût de transport du clinker : 8 €/t de clinker.

Hypothèses propres à la production de clinker décarboné par CSC

D'après le rapport technico-économique du CEMCAP sur la capture de CO₂ dans les cimenteries : CEMCAP (2018), *CEMCAP Comparative Techno-Economic Analysis of CO₂ Capture in Cement Plants*, novembre, 92 p.

Les coûts en €₂₀₁₄ sont augmentés de 3 %, pour obtenir des €₂₀₁₈.

	Énergie	
	Vapeur	Électricité
Coût	30 €/MWh	60 €/MWh
Contenu carbone	220 kg/MWh	400 kg/MWh

Pourcentage de capture : 95 %.

Coût de transport et stockage du CO₂ : 50 €/t.



ANNEXE 3

FORMULES DE COÛT D'ABATTEMENT

Pour une même action de décarbonation, le coût d'abattement peut être calculé selon plusieurs formules, conduisant à des valeurs numériques, en €/tCO₂, différentes. Il convient de sélectionner la formule au mieux, en fonction de l'action analysée et du sens qu'on souhaite donner au calcul.

Coût d'abattement et valeur actualisée nette

Par nature, le calcul des coûts d'abattement établit un « classement » des actions de décarbonation¹, dont on souhaite qu'il corresponde à leur ordre de déclenchement dans une trajectoire économiquement optimisée – c'est-à-dire, la trajectoire d'investissement qui, étant donné une trajectoire de valeur collective du carbone, maximise la valeur actualisée nette (VAN) publique². Autrement dit, la question est de savoir, dans un cadre d'optimisation de la VAN publique, à partir de quelle date déclencher l'investissement ; et le coût d'abattement de cet investissement se définit comme la valeur de la trajectoire carbone à cette date.

Ici, deux principaux sous-cas se présentent.

- **Le cas des investissements « à date imposée »**

À un extrême, certains investissements de décarbonation sont en concurrence avec une autre option d'investissement, plus carbonée. C'est notamment le cas quand un investissement vient remplacer un actif en fin de vie qui, même en l'absence de décarbonation, aurait dû faire l'objet d'un ré-investissement : une chaudière ou un véhicule, pour lesquels la question se pose de choisir, pour le prochain cycle, entre plusieurs technologies plus ou moins carbonées. C'est le cas aussi quand un

¹ Puisqu'il les place toutes sur une même échelle, en €/tCO₂.

² Voir Criqui P. (2021), *Les coûts d'abattement. Partie 1 – Méthodologie*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, juin.

investissement nouveau est nécessaire, par exemple pour servir un besoin croissant en électricité ou en toute autre commodité – ce qui compte ici est que l'investissement ne peut pas être retardé : il faut investir, fût-ce dans une solution carbonée.

Dans ces cas, le surcroît de VAN apporté par l'action de décarbonation s'écrit comme la différence entre option considérée et option de référence plus carbonée.

Plus en détail, la formule exacte du coût d'abattement dépendra de la valeur relative donnée à des réductions d'émissions intervenant à différents moments. Parmi les choix possibles, la « règle de Hotelling » fournit un point de référence : partant du principe que chaque tonne de CO₂ évitée a la même importance quelle que soit son année d'émission, elle veut que la valeur collective du carbone (ou « trajectoire carbone », ou « valeur de l'action pour le climat ») augmente au cours du temps en suivant le taux d'actualisation public – ainsi, vue depuis une date fixée, la croissance de cette trajectoire compense l'actualisation appliquée aux valorisations, et *in fine* toute réduction d'émissions revêt la même valeur.

Si la règle de Hotelling est vérifiée, et avec quelques hypothèses simplificatrices¹, la VAN supplémentaire apportée par l'investissement prend la forme :

$$VAN = \sum_0^N \frac{\Delta E_t}{(1+r)^t} VSC_0 (1+r)^t - \sum_0^N \frac{\Delta C_t}{(1+r)^t}$$

L'optimisation consiste alors à faire l'investissement si et seulement si cette VAN est positive, et le coût d'abattement se définit comme la valeur de VSC_0 qui annule cette VAN, d'où il vient la « formule 1 » du rapport *Méthodologie* déjà cité :

$$CA_1 = \frac{\sum_0^N \frac{\Delta C_t}{(1+r)^t}}{\sum_0^N \Delta E_t}$$

Des trajectoires de valeur du carbone ne suivant pas la règle de Hotelling conduisent à des formules de coût d'abattement légèrement différentes – ainsi la forme particulière de la valeur de l'action pour le climat (VAC) retenue en France², qui ne se conforme pas exactement à la règle de Hotelling, conduit à la « formule 2 » du rapport *Méthodologie*.

¹ Taux d'actualisation public constant (cette hypothèse peut toutefois être relâchée en écrivant les termes $(1+r)^t$ sous une forme plus générale) ; durée de vie identique pour toutes les options (N années) ; et options d'investissement caractérisées par les coûts annuels C_t d'investissement puis d'opération induits ou évités, et les économies annuelles d'émissions E_t en résultant.

² Quinet A. (2019), *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, rapport, France Stratégie, février.

- **Le cas des investissements « à date flexible »**

À l'extrême inverse, certains investissements sont purement supplémentaires, induits par l'objectif de décarbonation, et sans lien avec les cycles d'investissement précédents¹ : isolation d'un bâtiment sur lequel il n'aurait pas été nécessaire d'intervenir avant longtemps, équipement industriel supplémentaire... Dans ces cas, la VAN de l'investissement prend sa forme la plus simple² :

$$VAN = VSC_0 \sum_0^N E_t - \sum_0^N \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

L'optimisation de cette VAN s'obtient non en l'annulant (ce qui répondrait à la question « Vaut-il mieux faire cet investissement maintenant ou jamais ? »), mais en recherchant la date d'investissement qui produit la VAN la plus élevée. En pratique, on calcule la différence entre la VAN, et elle-même avec une date de mise en service décalée d'un an³ – cette différence s'annule quand la VAN atteint son maximum. Cette démarche est exactement analogue à celle qui, en théorie de l'investissement (public comme privé), fait calculer non seulement le taux de rentabilité interne d'un projet, mais aussi son taux de rentabilité immédiat.

Cependant, cette démarche de calcul ne peut pas s'appliquer directement à la formule de VAN donnée ci-dessus, car les deux termes en VSC_0 pourraient s'annuler, empêchant toute conclusion pour le coût d'abattement⁴. Il convient donc d'abord de rétablir la VAN dans sa formule la plus générale, considérant l'investissement technique non seulement sur sa seule durée de vie normative, mais le prolongeant à l'infini, en y agrégeant les éventuels ré-investissements, représentés dans les coûts annuels C ⁵ :

$$VAN = VSC_0 \sum_0^{\infty} E_t - \sum_0^{\infty} \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

¹ Pour autant, ces investissements ne sont pas nécessairement sans lien avec des actifs « fossiles » – par exemple, une action de décarbonation qui crée des actifs échoués relève le plus souvent de la présente catégorie, en ce qu'elle arrive « par-dessus » et ne parvient pas à s'inscrire dans un cycle d'actif préexistant.

² Pour simplifier les expressions, on s'est placé ici dans le cas d'une valeur du carbone suivant la règle de Hotelling – mais le développement qui suit est en fait valable quelle que soit l'allure de la trajectoire de valeur du carbone. Par convention, les réductions d'émissions nettes E permises par l'investissement sont ici notées positivement.

³ En d'autres termes, on calcule la dérivée de la VAN par rapport à sa date de mise en service.

⁴ Ce dernier étant défini comme la valeur de VSC_0 qui annule la (différence de) VAN.

⁵ Bien entendu les coûts réels deviennent incertains aux horizons lointains. Pour les besoins du calcul, on pourra reproduire à l'infini la chronique de coûts des N années de vie normative du projet, l'essentiel étant que le projet ne s'arrête pas abruptement en fin de cette durée de vie – alternativement, l'introduction d'une valeur résiduelle sert le même objectif.

La différence de VAN entre l'investissement réalisée une année (année 0) et le même investissement réalisé l'année suivante (année 1) prendra une forme synthétique dès lors qu'on suppose que les coûts annuels ne dépendent que de la durée écoulée depuis le démarrage de l'investissement¹, et que, une fois l'investissement monté en charge, les réductions d'émissions annuelles ne dépendent pas de l'année de mise en service². En effet, il vient alors³ :

$$\Delta VAN = VSC_0 \sum_0^{\infty} E_t - VSC_0 \sum_1^{\infty} E_t - \sum_0^{\infty} \frac{C_t}{(1+r)^t} + \sum_1^{\infty} \frac{C_{t-1}}{(1+r)^t}$$

C'est-à-dire, en notant E_{Ann} les économies d'émissions annuelles permises par l'investissement dans la période succédant à sa montée en charge :

$$\Delta VAN = VSC_0 \cdot E_{Ann} - \sum_0^{\infty} \frac{C_t}{(1+r)^t} + \sum_0^{\infty} \frac{C_t}{(1+r)^{t+1}}$$

$$\Delta VAN = VSC_0 \cdot E_{Ann} - \frac{r}{1+r} \sum_0^{\infty} \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

Cette expression peut être simplifiée en introduisant la constante C_{Ann} , le coût annualisé du projet, qui se définit comme tel que :

$$\sum_0^{\infty} \frac{C_{Ann}}{(1+r)^t} = \sum_0^{\infty} \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

D'où il vient que :

$$C_{Ann} = \frac{\sum_0^{\infty} \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_0^{\infty} \frac{1}{(1+r)^t}} = \frac{\sum_0^{\infty} \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\frac{1+r}{(1+r)-1}} = \frac{r}{1+r} \sum_0^{\infty} \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

¹ C'est-à-dire que les coûts encourus en 2030 si on a investi en 2024 sont les mêmes que ceux encourus en 2031 si on a investi en 2025.

² C'est-à-dire que les émissions évitées durant l'année 2030 sont les mêmes, que l'investissement ait été fait en 2024 ou 2025. Pour plus de généralité, on pourrait supposer que les coûts annuels sont la somme d'une chronique ne dépendant que de la durée depuis le démarrage de l'investissement, et d'une chronique qui, comme les réductions d'émissions, ne dépend que de l'année en cours. Cette seconde composante « traverse » alors les calculs ci-dessous de la même manière que la chronique d'émissions évitées, et contribue ainsi au résultat (voir ci-après) sous la forme de sa valeur après montée en charge.

³ N.B. Tous les termes issus des deux projets sont bien actualisés à l'année 0, pour les rendre comparables.

Ainsi :

$$\Delta VAN = VSC_0 \cdot E_{Ann} - C_{Ann}$$

On en déduit le coût d'abattement en annulant ΔVAN :

$$CA_{Invest\ suppl} = \frac{C_{Ann}}{E_{Ann}}$$

Ceci correspond à la « formule 3 » du rapport *Méthodologie* précédemment cité.

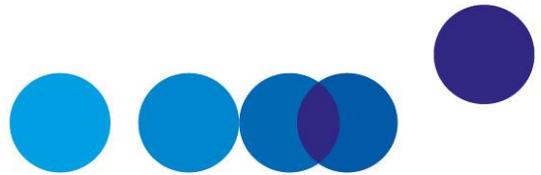
Ainsi la théorie rejoint, dans le cas des investissements de décarbonation « supplémentaires », non contraints dans leur temporalité par des cycles industriels préexistants, la pratique qui consiste à calculer un coût d'abattement en divisant simplement les coûts annualisés d'un projet par les économies nettes annuelles d'émissions qu'il engendre¹.

Synthèse

Puisque les deux actions de décarbonation du ciment qui donnent lieu à calcul dans le présent rapport sont essentiellement « à date flexible », les calculs correspondants sont présentés en « formule 3 ». C'était le cas aussi du calcul conduit dans le rapport *Électricité*, et de deux des trois calculs conduits dans le rapport *Hydrogène*.

La « formule 1 » peut être interprétée comme « autorisant » à faire plus tôt certains investissements, quand l'occasion de les faire ne se représentera pas prochainement. L'un des calculs du rapport *Hydrogène*, où des options décarbonées étaient en concurrence avec l'investissement dans des infrastructures de production d'hydrogène « gris », relevait de ce cas. Enfin, la « formule 2 » fournit une variante de la « formule 1 », adaptée à la forme particulière de la VAC retenue en France. C'est pourquoi ses résultats sont dépendants de la date de mise en service, et moins généraux que ceux de la « formule 1 ».

¹ Il se trouve en outre que diviser les coûts actualisés par les émissions actualisées donne le même résultat – mais puisqu'il n'y a pas de sens à actualiser des émissions (pour les raisons qui conduisent à vouloir les valoriser selon une trajectoire proche de la règle de Hotelling), on recourra de préférence à la formulation qui s'appuie sur les coûts annualisés et les économies d'émissions annuelles.



Directeur de la publication

Gilles de Margerie, commissaire général

Directeur de la rédaction

Cédric Audenis, commissaire général adjoint

Secrétaires de rédaction

Gladys Caré, Valérie Senné

Contact presse

Matthias Le Fur, directeur du service Édition/Communication/Événements

01 42 75 61 37, matthias.lefur@strategie.gouv.fr

RETROUVEZ LES DERNIÈRES ACTUALITÉS DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



www.strategie.gouv.fr



[@strategie_Gouv](https://twitter.com/strategie_Gouv)



[france-strategie](https://www.linkedin.com/company/france-strategie)



[francestrategie](https://www.facebook.com/francestrategie)



[@FranceStrategie_](https://www.instagram.com/FranceStrategie_)



[StrategieGouv](https://www.youtube.com/StrategieGouv)

Les opinions exprimées dans ce rapport engagent leurs auteurs et n'ont pas vocation à refléter la position du gouvernement



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

Institution autonome placée auprès de la Première ministre, France Stratégie contribue à l'action publique par ses analyses et ses propositions. Elle anime le débat public et éclaire les choix collectifs sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Elle produit également des évaluations de politiques publiques à la demande du gouvernement. Les résultats de ses travaux s'adressent aux pouvoirs publics, à la société civile et aux citoyens.