



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

ADEME



AGENCE DE LA  
TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE

## PLAN DE TRANSITION SECTORIEL DE L'INDUSTRIE CIMENTIERE EN FRANCE



EXPERTISES

# CIMENT

## Rapport de synthèse

OCTOBRE  
2021



Avec la contribution  
du programme  
LIFE de l'Union  
Européenne



## **Ce document est édité par l'ADEME**

### **ADEME**

20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

**Référence Projet LIFE Finance ClimAct** : LIFE 18/IPC/FR/000010 (Action C71. Plans de Transition Sectoriels)

**Coordination technique - ADEME** : Elliot MARI, Sylvain SOURISSEAU, Alix BOUXIN

**Direction/Service** : Direction Entreprises et Transitions Industrielles/Service Industrie

### **L'ADEME tient à remercier tout particulièrement les acteurs de la filière cimentière pour leur participation et leur implication durant toute l'élaboration du Plan de Transition Sectoriel :**

Laure HÉLARD, Vincent PEGEOT, Nicolas MOUCHNINO (SFIC)  
Pierre BULTEZ, Sylvain CODRON (EQJOM)  
Éric BOURDON, Gilles du MANOIR (VICAT)  
Jean-François BRICAUD, Patrick MÉZIÈRE (CIMENTIS CALCIA)  
Florent DUBOIS, Maud TARNOT, Christophe BOUF (LAFARGEHOLCIM)

### **L'ADEME tient également à remercier l'ensemble des participants aux différents échanges bilatéraux et ateliers de travail, en particulier :**

Laurent IZORET (ATHIL) ; Laurent TRUCHON, François REDRON, Patrick GUIRAUD (CIMBÉTON) ; Jean-Marc POTIER (SNBPE), Christophe RODRIGUEZ (IFPEB) ; Christian CREMONA (BOUYGUES CONSTRUCTION) ; Vianney FULLHARDT, Rodrigue COYERE (EIFFAGE CONSTRUCTION) ; Bruno PAUL-DAUPHIN (VINCI CONSTRUCTION) ; Jean-Christophe VISIER (ADEME-CSTB) ; Frédéric MÉNARD (XMP CONSULT) ; Thierry RIESER (ENERTECH) ; Oliver SARTOR (AGORA ENERGIEWENDE) ; Isabelle DORGERET (FFTB) ; Dominique COTTINEAU (UICB) ; Martin CYR (INSA) ; Jean-Michel TORRENTI (UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL) ; Chris BATAILLE (IDDRI)

### **Ainsi que :**

Sylvain MATHONNET, Guillaume DAILL, Aïcha EL KHAMLICHI (ADEME)

### **CITATION DE CE RAPPORT**

ADEME. E. Mari, S. Sourisseau, A. Bouxin, C. Borde, S. Padilla, T. Gourdon, 2021. Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière en France : Rapport de synthèse. 40 pages.

**Cet ouvrage est disponible en ligne [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque)**

**Crédits photo** : couverture Shutterstock

**Création graphique** : seense • 829

**Impression** : Imprimé en France par Goubault Imprimeur, certifié ISO 14001 et Imprim'Vert  
Ce document est imprimé sur du papier 100% PEFC.

Brochure réf. 011544 - ISBN print : 979-10-297-1821-2 – ISBN web : 979-10-297-1822-9  
Dépôt légal : ©ADEME Éditions, octobre 2021

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

# Sommaire

<b>ÉDITO CROISÉ</b>	<b>4</b>
<b>1. CONTEXTE</b>	<b>5</b>
1.1 De la Stratégie Nationale Bas Carbone au Plan de Transition Sectoriel .....	5
1.2 L'industrie cimentière française en quelques chiffres .....	7
<b>2. RÉSUMÉ POUR DÉCIDEURS</b>	<b>8</b>
<b>3. LA DÉCARBONATION PAR LA PROJECTION DE L'EXISTANT : UN PREMIER SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE À 2050</b>	<b>16</b>
3.1 Le procédé de fabrication du ciment : essentiel à une première compréhension des enjeux de décarbonation de la filière.....	16
3.2 La construction du scénario de référence : itinéraire technologique et trajectoire de demande.....	17
3.3 Des solutions technologiques encore insuffisantes pour une décarbonation satisfaisante à horizon 2050 .....	20
3.4 Des investissements massifs à décider dès à présent, pas seulement pour développer des technologies innovantes ! .....	22
3.5 Des effets sur l'emploi direct limités mais hétérogènes selon les territoires.....	23
<b>4. VERS DES PROPOSITIONS DE SCÉNARIOS PLUS EXTRÊMES POUR ATTEINDRE L'OBJECTIF DE LA SNBC</b>	<b>24</b>
4.1 Deux contextes de transition pour atteindre l'objectif de -81% d'émissions de gaz à effet de serre de la SNBC.....	24
4.2 La décarbonation par la technologie : une transition guidée par un pari « <i>techno-push</i> » .....	26
4.3 La décarbonation par la sobriété : l'industrie cimentière face à un choc de marché.....	28
<b>5. SCÉNARIOS DE RÉFÉRENCE OU PLUS EXTRÊMES : DES ENSEIGNEMENTS ÉCONOMIQUES CONVERGENTS MALGRÉ DES NIVEAUX D'INVESTISSEMENTS TRÈS DIFFÉRENTS</b>	<b>30</b>
5.1 En moyenne, un ciment plus cher à produire et fortement dépendant du prix du CO <sub>2</sub> .....	30
5.2 ... pour un impact limité sur le prix final d'un bâtiment.....	32
<b>6. MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION</b>	<b>33</b>
6.1 Modélisation du parc cimentier français.....	33
6.2 Construction d'une trajectoire de décarbonation .....	34
6.3 Zoom sur le coût critique du CSC pour la décarbonation d'une usine .....	36
<b>INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES</b>	<b>38</b>
<b>SIGLES ET ACRONYMES</b>	<b>39</b>

# Édito croisé

## Arnaud LEROY Président de l'ADEME

Avec environ 1/5<sup>e</sup> des émissions de gaz à effet de serre de la France, l'industrie manufacturière occupe une place importante dans les débats sur la transition climatique, d'autant plus amplifiée par la crise Covid et le souhait de renouer avec une industrie française résiliente. En particulier, les secteurs énérgo-intensifs (ciment, acier, chimie...), qui représentent un nombre limité d'acteurs, mais qui pèsent pour l'essentiel des émissions, sont des acteurs-clés pour réussir cette transition. En France, la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) définit pour l'industrie manufacturière un objectif ambitieux de réduction de 81% des émissions de gaz à effet de serre entre 2015 et 2050.

C'est ce défi qui a mené l'ADEME à proposer, dans le cadre du projet Finance ClimAct financé par la Commission Européenne, l'élaboration de trajectoires de décarbonation pour les 9 principaux secteurs énérgo-intensifs en France. Ces Plans de Transition Sectoriels sont particulièrement stratégiques puisqu'ils permettent de concrétiser les objectifs de la SNBC à travers une démarche de co-construction avec les acteurs des filières de l'industrie lourde. L'ADEME remplit ainsi pleinement sa mission en tant qu'opérateur de l'Etat pour mettre à disposition son expertise et accompagner les industriels dans la mise en œuvre des politiques climatiques. La transition vers un modèle de production plus durable est d'autant plus nécessaire que l'industrie irrigue en matériaux les principaux secteurs de l'économie : bâtiment, transports, agriculture... Par ailleurs, en venant rudement tester la résilience de nos chaînes d'approvisionnements, la pandémie de Covid-19 a permis de replacer la question de la relocalisation et de la souveraineté industrielle au cœur des débats.

L'industrie lourde fait donc face à des défis techniques et économiques d'envergure pour réussir sa décarbonation, où l'approche par la substitution énergétique ne suffit pas toujours. C'est le cas de l'industrie cimentière pour qui les émissions non-énergétiques (2/3 des émissions totales) nécessitent d'innover et d'imaginer de nouveaux modèles économiques. L'industrie du ciment est le premier secteur qui nous a permis d'expérimenter la méthodologie des Plans de Transition Sectoriels, en étroite collaboration avec le Syndicat Français de l'Industrie Cimentière (SFIC) et les cimentiers. En tant que secteur pilote, nous souhaitons ici remercier l'ensemble des acteurs de la filière pour leur active participation à ce projet. Nous sommes convaincus que les conclusions de ce premier Plan de Transition Sectoriel permettront à l'industrie de gagner en résilience et contribueront à alimenter les réflexions et le débat public sur le sujet de la décarbonation de l'industrie. Il ne nous reste maintenant qu'à « transformer l'essai » et à poursuivre le travail sur d'autres secteurs, à commencer par l'acier, l'aluminium et la chimie.



## François PETRY Président du SFIC

La profession cimentière salue le travail réalisé par les équipes de l'ADEME dans cet exercice inédit de planification industrielle. Les enseignements sont nombreux et ils devront être intégrés dans les futures politiques publiques tant de la France que de l'Europe. D'autres solutions techniques que celles évoquées dans cette étude, telles que la capture du CO<sub>2</sub> et son utilisation dans des produits dérivés, permettront d'offrir d'autres scénarios favorables au maintien d'outils de production existants sur les territoires. Le soutien des pouvoirs publics sera aussi nécessaire pour ces solutions prometteuses.

Pour que l'atteinte de la neutralité carbone ne se fasse pas aux dépens du maintien de l'activité industrielle dans les territoires, il est plus que jamais essentiel d'accompagner nos entreprises dans cette transition vers le bas carbone :

- La rentabilité des investissements qui devront être consentis ne se fera pas sans un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières garantissant aux industriels européens une concurrence à armes égales avec les importations extra européennes. Le maintien des quotas gratuits est primordial pendant la phase de validation de ce mécanisme d'ajustement carbone aux frontières et son acceptation par les acteurs du commerce international.
- Sans visibilité sur les possibilités d'accès à une énergie décarbonée et compétitive, il ne sera pas possible de mobiliser les financements nécessaires pour réussir cette transition.
- Les technologies de rupture, captage, stockage et utilisation du carbone, sont incontournables pour atteindre les hauts niveaux de décarbonation. Elles doivent faire l'objet de programmes d'accompagnement et de financement dans le déploiement et la mutualisation des infrastructures nécessaires.

Le ciment, composant essentiel du béton, répond aux besoins de nos sociétés, se loger, se déplacer ; c'est également le matériau de la résilience face aux défis que pose le réchauffement climatique ; en réduisant son empreinte carbone, il continuera à accompagner les évolutions sociétales dans une économie bas carbone.



# 1. Contexte

## 1.1. De la Stratégie Nationale Bas Carbone au Plan de Transition Sectoriel ●

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) définit la trajectoire qu'entend prendre la France pour atteindre la neutralité carbone en 2050, engagement qu'elle a pris suite à la 21<sup>e</sup> conférence des parties (COP 21) de la convention cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC). Dans la SNBC révisée de 2020, pour l'industrie française, cette trajectoire se traduit par un objectif de diminution de 81% des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) par rapport à 2015. Même si quelques orientations sont mises en avant dans la littérature sur la décarbonation de l'industrie (ex. : privilégier les énergies décarbonées et l'économie circulaire), leurs contenus et leurs coûts sur le plan opérationnel ne sont pas détaillés. Pourtant, les industriels ont besoin d'une visibilité à moyen terme pour réaliser leurs investissements. En effet, comme les équipements de l'industrie ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années, les investissements d'aujourd'hui auront des conséquences jusqu'en 2050. C'est dans ce cadre temporel pour les industriels que s'inscrivent les Plans de Transition Sectoriels. Pour les pouvoirs publics, il s'agit également de pouvoir proposer des politiques d'accompagnement efficaces qui favorisent la prise de décision quant aux investissements nécessaires pour atteindre l'objectif de -81% d'émissions de GES à l'horizon 2050 dans l'industrie.

En co-construisant ces Plans de Transition Sectoriels (PTS) avec les acteurs-clés du secteur, **l'ADEME souhaite offrir de la visibilité à la fois aux industriels et aux investisseurs mais aussi aux pouvoirs publics pour atteindre l'objectif fixé dans la SNBC.** Le projet s'inscrit donc dans la continuité des travaux effectués pour la SNBC en divisant l'industrie lourde en 9 secteurs (représentés en Figure 1), afin de proposer des solutions de décarbonation spécifiques aux problématiques industrielles de chaque secteur.

À la différence de la grande majorité des travaux issus de la littérature nationale, européenne ou internationale qui aborde essentiellement la transition industrielle d'un point de vue technologique, le projet adopte une vision à 360° afin de considérer les aspects de marchés, coûts, financements et emplois. Intégrés dans un programme européen LIFE<sup>1</sup> intitulé Finance ClimAct<sup>2</sup>, ces plans de transition s'appuient sur une analyse croisée du déploiement des technologies de décarbonation, du coût que

Faisant suite à la publication du rapport de synthèse sur les premiers résultats technico-économiques, ce document résume l'ensemble des principaux résultats du Plan de Transition Sectoriel appliqué au secteur cimentier. Le rapport complet incluant une description plus approfondie de la filière cimentière, les hypothèses et les analyses des résultats liés à la modélisation, devrait être publié à l'automne 2021.

cela représente notamment pour anticiper les besoins de financement et les effets sur la compétitivité, et de l'impact de l'évolution du marché en termes de demande et de concurrence à horizon 2050. Les effets sur l'emploi et les éventuelles évolutions de compétences nécessaires pour s'adapter à la transition du secteur sont également discutés dans le cadre des PTS, de même que le sujet de l'ancrage territorial et du degré de dépendance d'un territoire vis-à-vis du secteur industriel étudié.

In fine, ce travail doit permettre la formulation de propositions d'actions « publiques-privées » pour accélérer la transition de ces secteurs clés.

Figure 1. Les 9 secteurs de l'industrie allant faire l'objet d'un PTS.



<sup>1</sup> Le programme LIFE est un programme de financement européen pour l'environnement et l'action pour le climat créé en 1992. La période 2014-2020 présentait un budget de 3,4 Mds EUR.

<sup>2</sup> <https://presse.ademe.fr/2019/12/finance-climact-mobilisation-pour-un-plan-daction-sur-la-finance-durable.html?hilite=%27FINANCE%27%2C%27CLIMACT%27>

Projet



avec le financement



30

personnes  
à temps plein  
sur le projet

18

millions d'euros  
de budget

5

ans

## Les objectifs

### Régulation & supervision

Plans français et européen  
sur la finance durable

CTH

Observatoire

Stress-tests

### Institutions financières

Prendre en compte le changement climatique dans le pilotage du secteur financier et sa supervision

Le projet outille les institutions financières et leurs superviseurs en vue d'intégrer le climat à la gestion des risques en favorisant la prise en compte du long terme (PACTA et Stress-Tests climatiques) et d'encourager la transparence en matière de contribution des institutions à la lutte contre le changement climatique et de leur résilience à ses conséquences (Plateforme de la transparence climatique et Observatoire de la finance durable).

PACTA

### Ménages

Faciliter les décisions de placements des épargnants sur la base d'objectifs environnementaux

Le projet facilite la compréhension et la prise en compte des attentes des épargnants en matière de durabilité (Préférences des épargnants) et met en place les outils leur permettant d'accéder à une information claire et crédible sur les produits financiers durables (Labels).

Préférences

### Industries

Favoriser l'investissement dans l'efficacité énergétique et l'économie bas-carbone, promu par la Stratégie Nationale Bas-Carbone et le Pacte Vert Européen.

Le projet vise à former et outiller les entreprises et leurs financeurs pour l'élaboration de stratégies bas-carbone (ACT) d'efficacité énergétique et permettre leur mise en œuvre via la concrétisation de projets bas-carbone dans les secteurs industriels les plus émissifs (INVEEST et Plans de transition sectoriels).

Plans de transition sectoriels



### Partenaires du projet

ACPR, AMF, Banque de France, Finance for Tomorrow, GreenFlex, Institute for Climate Economics, Ministère de la Transition écologique, 2° Investing Initiative

## 1.2. L'industrie cimentière française en quelques chiffres

# 16.5

millions de tonnes

**Production de ciment en 2018**

(-23% depuis 10 ans) soit environ 0,5% de la production mondiale et environ 9% de la production européenne, pour une consommation nationale d'environ 18,6 millions de tonnes (Mt).

**27 sites de production de clinker en 2018 et**

**5 groupes industriels :**

LafargeHolcim, Ciments Calcia, Eciom, Vicat et Imerys Aluminates (anciennement Kerneos qui produit du ciment alumineux pour des applications spécifiques).

**Entre 2010 et 2016, le chiffre d'affaires de l'industrie cimentière oscillait autour de 2.5 milliards d'euros courants (Mds EUR).**

**La consommation d'énergie représente dans ce secteur environ 30% du coût de production.**

**Les importations de clinker**

(produit intermédiaire entrant dans la composition du ciment et responsable de la totalité des émissions de CO<sub>2</sub> d'une cimenterie), à peu près constantes jusqu'en 2013,

**ONT ÉTÉ MULTIPLIÉES PAR 5 À 6 ENTRE 2013 ET 2018**

principalement en provenance d'Espagne et de pays d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. En 2018, le solde net d'importations de clinker représentait environ 5% du clinker utilisé en France métropolitaine.

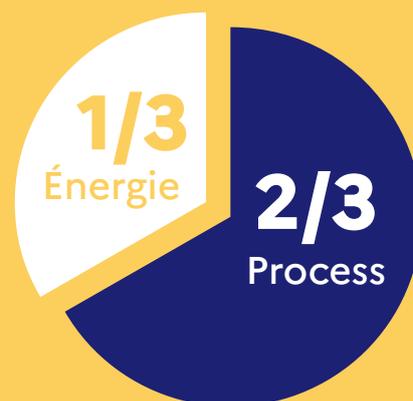
**Commerce extérieur de ciment**

la France importe presque 3 fois plus de ciment qu'elle n'en exporte. Le solde net d'importations, soit 1,9 Mt en 2018, représente environ 10% de la consommation nationale, valeur constante depuis 10 ans. Les échanges de ciment se font principalement avec des pays frontaliers comme l'Espagne, la Belgique ou l'Italie.

# 5 000

**emplois directs en moyenne depuis 2010** répartis sur l'ensemble du territoire, et environ 25 000 emplois indirects.

**Origine des émissions de l'industrie cimentière**



Un tiers des émissions de l'industrie cimentière est lié à la combustion d'énergie, le reste sont des émissions dites « de process » dues à la réaction de décarbonatation du calcaire.

# 63 %

**de la consommation de ciment**

provient du bâtiment et 37% des travaux publics.

Environ 10 millions de tonnes CO<sub>2</sub>eq émises chaque année, soit **12,5% DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE DE L'INDUSTRIE** et 2% des émissions totales en France.

## 2. Résumé pour décideurs

### Deux types de modélisation pour illustrer les futurs possibles ●

La modélisation de scénarios de transition pour la filière cimentière se décompose en deux volets de projection à horizon 2050 distincts :

• **Un exercice de *forecasting*** dont l'objectif fut de modéliser les leviers de décarbonation existants et ceux présentant un potentiel déjà bien identifié par les acteurs de la filière. Qualifié de scénario de « référence », cet exercice de prospective aboutit à une **réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 54% en 2050 par rapport à 2015, dans le meilleur des cas<sup>3</sup>**. L'objectif de la SNBC de -81% n'étant pas atteint, ce scénario met en lumière le **défi technique, organisationnel et économique que représente la décarbonation de l'industrie cimentière, et donc la nécessité d'envisager des trajectoires plus ambitieuses. Ce scénario de référence s'est construit et structuré en concertation avec la filière cimentière.**

• **Un exercice de *backcasting*** dont l'objectif fut de proposer deux scénarios atteignant l'objectif de -81%, l'un à partir d'un choc de marché à la baisse, l'autre d'un déploiement de nouvelles technologies. Si le travail de prospective laisse présager une multitude de possibilités, le choix a donc été fait de représenter deux visions extrêmes du monde qui peuvent s'opposer, telles qu'illustrées par la Figure 2. La raison d'être du **pari « techno-push »** et du **choc « sobriété low-tech »** n'est donc pas de faire des prédictions ni de démontrer que seules ces deux alternatives sont possibles, mais bien d'éclairer sur les conditions de réalisation nécessaires à la décarbonation de la filière quel que soit le futur qui se dessinera, afin d'apporter de la matière au débat public. Contrairement au scénario de référence, cet exercice volontairement caricatural a été réalisé en interne au sein de l'ADEME qui en assume la vision extrême pour apporter de nouveaux enseignements.

Figure 2. Cadrage méthodologique pour la construction des scénarios.



<sup>3</sup> Le scénario de « référence » présenté dans ce document est l'extension du scénario « SNBC-ADEME » inclut dans le rapport : « Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière en France : Premiers résultats technico-économiques – Rapport de synthèse » ; [https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4406-ciment-premiers-resultats-technico-economiques-9791029717161.html?search\\_query=ciment&results=13](https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4406-ciment-premiers-resultats-technico-economiques-9791029717161.html?search_query=ciment&results=13)

## Une analyse qui croise itinéraire technologique...

Quel que soit le scénario, la première étape du projet a été de construire un itinéraire technologique combinant différents leviers de décarbonation de façon cohérente et réaliste, tout en quantifiant les impacts sur la consommation énergétique, les émissions spécifiques du ciment et son coût de production. Les technologies de décarbonation ont fait l'objet d'une recherche approfondie et d'une modélisation, à commencer par les solutions matures et/ou identifiées à fort potentiel de décarbonation. Sur la base d'éléments existants dans la littérature et d'échanges avec les industriels, des solutions plus innovantes ont également été étudiées et incluses dans certains itinéraires technologiques en fonction de leur pertinence. Par ailleurs, dans le cadre de la démarche de co-construction du PTS ciment et en réponse aux premiers résultats intermédiaires, un atelier spécifiquement dédié aux innovations technologiques a été organisé à l'automne 2020 en présence d'industriels et d'experts techniques, ceci afin de qualifier et d'identifier de nouveaux leviers qui pourraient être inclus dans une trajectoire de décarbonation.

## ...et évolution de la demande en ciment...

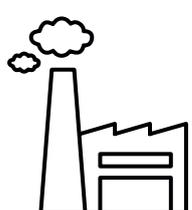
Pour évaluer le niveau des émissions totales du secteur, différents itinéraires technologiques ont été couplés à des trajectoires d'évolution de la production de ciment à horizon 2050 qui diffèrent selon le scénario considéré. Ces évolutions ont été obtenues avec PEPITO, un outil de modélisation permettant d'estimer les niveaux de demande des secteurs consommateurs (BTP, Transports...), et donc d'obtenir des trajectoires de production de matériaux<sup>4</sup> (clinker, acier, ...).

### Les trajectoires de demande ont été construites pour s'adapter aux contextes de transition de chaque scénario.

En particulier pour les deux nouveaux scénarios imaginés, la construction de la trajectoire de demande a été articulée avec le choix de l'itinéraire technologique de manière à décrire des univers cohérents et aussi crédibles que possible.

## ...pour en déduire les impacts CO<sub>2</sub>...

Tableau 1. Résumé des principaux résultats du Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière en France – niveaux de décarbonation et évolution de la demande



	Scénario choc «sobriété low-tech»	Scénario de référence	Scénario pari « techno-push »
Niveau de décarbonation atteint en 2050 par rapport à 2015	-81%	-54%	-83%
Évolution de la demande nationale de ciment en 2050 par rapport à 2015	-60%	-13%	-6%

Les chiffres d'évolution de la demande en ciment à horizon 2050 illustrent les univers totalement différents dans lesquels les deux scénarios «extrêmes» sont projetés. Si la logique de marché en matière d'offre et de demande de constructions neuves est pleinement en vigueur dans le pari « techno push », la réduction de 60% de la demande dans le choc de sobriété résulte d'un cadre réglementaire très contraignant afin de lutter contre l'artificialisation des sols, réduisant très fortement la construction neuve dans le bâtiment, secteur-clé de la demande en ciment.

<sup>4</sup> Le rapport « Transition industrielle - Prospective énergie matière : vers un outil de modélisation des niveaux de production » est disponible via ce lien : <https://www.ademe.fr/transition-industrielle-prospective-energie-matiere-vers-outil-modelisation-niveaux-production>. L'outil « Pepit0 » peut être mis à disposition gratuitement sur demande à l'adresse mail : [transition.industrie@ademe.fr](mailto:transition.industrie@ademe.fr)

## ...et les enjeux économiques corrélés au prix du CO<sub>2</sub>



CAPEX estimé	240 MEUR	4,4 Mds EUR	7,7 Mds EUR
Évolution du coût unitaire de production (en moyenne sur le parc)	+85%	+130%	+130%

Logiquement, l'estimation des montants d'investissements requis dépend fortement du niveau de déploiement des technologies : presque 8 milliards d'Euros semblent ainsi nécessaires pour envisager une décarbonation dans laquelle l'innovation tient une place prépondérante. Outre l'amortissement du capital, la prise en compte d'une trajectoire du prix du CO<sub>2</sub> aboutissant à 180 Euros en 2050 aboutit à une hausse du coût de production dans tous les scénarios. Sans aucun investissement dans la décarbonation, le coût de l'inaction viendrait tripler le coût de production du ciment ; alors qu'en investissant dans la décarbonation, cette hausse serait limitée à un doublement.

× 2

Ordre de grandeur de l'impact des scénarios de transition sur le coût de production

× 3

Ordre de grandeur de l'impact du prix du CO<sub>2</sub> sur le coût de production sans investissements dans la décarbonation

## Des hypothèses structurantes pour les scénarios extrêmes

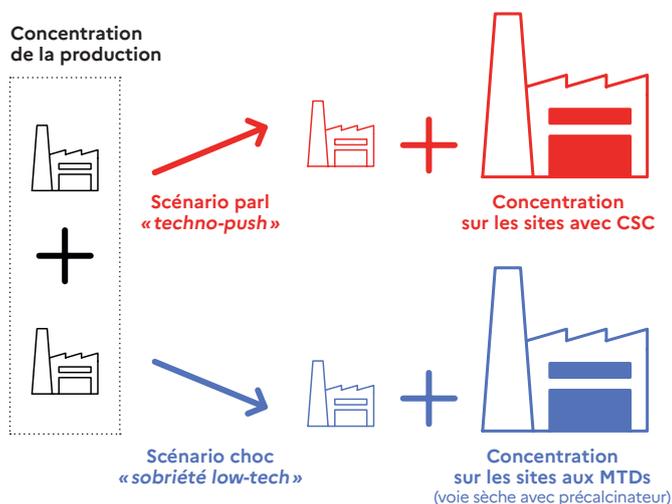
Si dans le scénario de référence la difficulté à aller plus loin dans la décarbonation se pose, notamment en raison des limites dans le déploiement du CSC et dans la disponibilité des substituts au clinker, des hypothèses fortes ont donc été nécessaires dans les scénarios extrêmes afin de lever les freins identifiés et atteindre l'objectif fixé par la SNBC.

### Parmi ces hypothèses, trois peuvent retenir l'attention (cf. partie 4 pour plus de détails) :

- Dans le cadre du pari « *techno-push* », une **nouvelle zone de stockage du CO<sub>2</sub> a été supposée** afin d'élargir le nombre de cimenteries « éligibles » au déploiement du CSC. En parallèle, il a été modélisé une **concentration de la production** sur les cimenteries localisées dans des zones CSC, ce qui signifie qu'en pratique, lors de l'opération d'*upgrading*, le four rotatif de ces cimenteries est remplacé par un nouvel outil plus efficace et de plus grande capacité.

- Dans le cadre du choc « *sobriété low-tech* », d'autres enjeux que ceux liés à la décarbonation ont été considérés afin de refléter des préoccupations sociétales plus larges. En l'occurrence, l'établissement d'un cadre réglementaire plus contraignant pour répondre à l'**objectif de zéro artificialisation nette des sols a été supposé**. Il se traduit par une **chute importante du nombre de constructions neuves** chaque année à partir de 2030. Cette hypothèse d'un marché beaucoup plus restreint pour les cimentiers tend également à refléter un environnement dans lequel **les ressources comme le sable et l'eau deviennent plus rares et donc plus chères**, ce qui limite les perspectives de construction, en particulier les résidences secondaires.

- Dans les deux scénarios alternatifs extrêmes, pour justifier un déploiement des leviers de décarbonation le plus réaliste et efficace possible, il a été nécessaire de faire **des hypothèses sur l'évolution de l'appareil productif sur le territoire**. Dans des contextes où la demande nationale de ciment diminue parallèlement à un besoin en nouveaux liants moins carbonés qui augmente, une reconversion de certaines cimenteries, soit en station de broyage de clinker soit pour la production d'argiles calcinées ou de nouveaux liants alternatifs, a été imaginée pour répondre à une hypothèse théorique de concentration de la production de clinker sur certains sites (éligibles au CSC ou déjà aux meilleures techniques disponibles). En réalité, ces choix relèvent des stratégies industrielles spécifiques à chaque major cimentière, en fonction de leurs critères propres de décision.



## Principales limites des exercices de scénarisation

L'ensemble des résultats présentés sont issus d'un exercice ambitieux de modélisation de trajectoires de décarbonation de l'industrie cimentière à horizon 2050 avec une méthodologie innovante mais aussi soumise à des limites notamment de périmètre ou d'accès à la donnée.

**C'est avec ce prisme que le lecteur doit appréhender ce document quant aux conclusions qu'il pourra en tirer, notamment en considérant les éléments suivants :**

- **Un objectif commun de réduction des émissions pour des secteurs industriels différents :** L'objectif de -81% de la SNBC pour l'industrie manufacturière a été décliné pour le sous-secteur de l'industrie cimentière comme une contrainte d'entrée à l'exercice de scénarisation. Ce choix présente l'avantage de définir un cadre commun à tous les secteurs couverts par un Plan de Transition Sectoriel. Toutefois, cette hypothèse ferme la porte à une allocation plus flexible des objectifs de réduction des émissions entre des secteurs industriels pour lesquels les potentiels d'abattement et les efforts de décarbonation associés peuvent être différents. L'étude de tous les secteurs pourrait permettre à terme de définir des objectifs plus adaptés.

- **Une vision élargie du secteur cimentier qui dépend donc fortement de facteurs exogènes :** Bien que centré sur la capacité du secteur cimentier à réduire ses émissions directes de carbone, cet exercice a pour vocation de donner une vision la plus large possible des déterminants de cette évolution. Il a donc été nécessaire de faire, directement ou indirectement, des hypothèses sur des paramètres exogènes au secteur cimentier, tels que le prix de l'énergie, du CO<sub>2</sub>, la démographie ou encore la disponibilité et le prix des matières premières comme le calcaire dans les carrières, le laitier de haut-fourneau ou les argiles activées.

- **Et pour autant, une approche qui pourra encore s'enrichir d'autres déterminants portés par d'autres acteurs économiques :** En effet, l'industrie cimentière constituant un nœud dans une économie complexe qui interagit avec des entités en amont et en aval, elles-mêmes en évolution, une approche systémique exhaustive de la décarbonation du secteur nécessiterait d'adopter une vision allant largement au-delà du périmètre de ce secteur, et donc, une multiplication des hypothèses sur les autres nœuds du système. C'est notamment l'ambition du projet plus global de l'ADEME, intitulé *Projet Prospective Energies-Ressources 2050*, qui sera publié d'ici fin 2021.



→ Photo de EQIOM/DUNKERQUE

- **En outre, comme dans tout exercice de prospective, le panel d'hypothèses et de combinaisons de celles-ci est infini et chaque scénario pourrait être encore plus « challengé » par les différents acteurs concernés :** Ainsi, sans lui donner de caractère prédictif, le scénario tendanciel a été construit dans le cadre d'une large concertation avec les acteurs – y compris pour stabiliser la méthodologie innovante proposée – alors que les scénarios extrêmes pari « *techno-push* » et choc « *sobriété low-tech* » sont le fruit d'un travail interne de l'ADEME et n'ont pas fait l'objet d'une démarche de concertation avec les acteurs de la filière. Pour autant, ces derniers reflètent deux univers techniquement plausibles, plus ou moins désirables, dans lesquels les choix des industriels et des politiques publiques seraient sensiblement différents de ceux du scénario de référence. D'autres univers pourraient très bien être explorés pour faire émerger de nouveaux enseignements, comme par exemple, étudier la faisabilité d'un scénario de décarbonation dans lequel un réseau national de transport de CO<sub>2</sub> relierait tous les sites industriels émetteurs à des zones de stockage et/ou un marché émergerait pour des produits à base de CO<sub>2</sub> capturé (« *Carbon Capture and Usage* »). Par la suite, il appartient à qui le souhaite de proposer des visions alternatives. Les outils de modélisation seront mis à disposition à l'instar de l'ensemble des sources bibliographiques et des hypothèses disponibles dans le rapport complet. Il s'agit ainsi d'aider les acteurs à s'emparer de l'exercice, avec la même exigence de transparence sur les hypothèses prises et les univers envisagés, tout en reconnaissant les limites de l'exercice.

Par ailleurs, le rapport complet qui accompagne cette synthèse apporte également des compléments sur le contexte des différents scénarios et la façon dont la transition pourrait se produire, sur l'emploi ou encore sur les potentielles stratégies industrielles. Il s'agit ainsi d'élargir le champ de la réflexion par rapport aux différents résultats de la synthèse. Ces éléments d'analyse, qui peuvent être qualifiés d'académiques, s'appuient sur de nombreuses recherches bibliographiques et sources d'information publiques, et se veulent le plus objectifs possible compte tenu du croisement de l'ensemble de ces sources par les auteurs.

# Les incontournables de la décarbonation de l'industrie cimentière !

Malgré ces limites, l'exercice prospectif de décarbonation de l'industrie cimentière a permis d'identifier un certain nombre de conditions de réalisation communes à tous les scénarios. Trois enseignements listés ci-dessous ressortent particulièrement.

Afin d'essayer de répondre à ces incontournables, plusieurs pistes d'actions ont été identifiées via une concertation multi-acteurs.

Figure 3. Les incontournables de la décarbonation de l'industrie cimentière.



## UNE CONCERTATION INDISPENSABLE POUR IDENTIFIER LES ACTIONS À METTRE EN ŒUVRE

À la suite de la publication des premiers résultats du PTS ciment, un processus de concertation a été engagé avec de nombreuses parties prenantes sous la forme d'entretiens bilatéraux. L'objectif était de formuler des pistes d'actions pour accélérer la décarbonation de la filière cimentière, qui seraient partagées par un large ensemble d'acteurs de la chaîne de valeur. Le but était également qu'au terme de cette consultation, chaque acteur puisse se saisir d'une ou plusieurs actions qu'il essaierait de mettre en œuvre à son échelle.

Une restitution synthétique des actions a été proposée pour discussion lors d'une réunion le 15 décembre 2020 avec l'ensemble des parties prenantes (industriels du ciment, entreprises de la construction, représentants de la filière béton, experts techniques du bâtiment, ONG, think-tanks, universitaires, représentants de matériaux concurrents). À la suite de cette restitution, plusieurs acteurs se sont positionnés sur certaines actions par une contribution écrite. L'ensemble des propositions d'actions figureront dans le rapport complet détaillé. Pour chaque « incontournable », un exemple de piste d'action est présenté à titre illustratif.



→ Photo de Bannafarsai\_Stock/Shutterstock.com



## Un fort besoin de visibilité à moyen et long terme pour les industriels

Dans la description des différents contextes de transition, le déploiement des solutions technologiques est conditionné par un certain niveau de confiance des industriels et des investisseurs quant à la durabilité de leurs actifs. En effet, comme beaucoup d'industries lourdes, les investissements dans le secteur cimentier sont très capitalistiques et la durée de vie des équipements se compte souvent en plusieurs dizaines d'années. **Le besoin de visibilité est donc indispensable pour déclencher des investissements importants** et, dans le narratif des scénarios, **cela concerne en particulier la trajectoire du prix du CO<sub>2</sub>, la disponibilité des ressources et les perspectives de marché** qui sont les trois grandes boussoles aiguillant les décisions des industriels.

La maîtrise de ces incertitudes permet aux entreprises de mieux estimer les gains en OPEX tandis que les coûts en CAPEX élevés des technologies sont souvent mis en avant, alors que ces technologies sont sources d'économies dans un contexte de hausse probable des coûts de l'énergie et du CO<sub>2</sub>. Dans un scénario pari « *techno-push* », cette visibilité est d'autant plus nécessaire que la trajectoire suppose une forme de planification en faveur de la rénovation de cimenteries, la réorganisation du parc industriel et le déploiement du CSC sur certaines zones spécifiques.



## Marchés publics : stimulation de la demande en bétons « bas carbone »

L'introduction de « clauses environnementales » dans les marchés publics se diffuse progressivement avec l'évolution du cadre juridique, la pression de la société civile et le partage des expériences auprès de réseaux d'acheteurs. En revanche, bien que les industriels lancent de nouveaux produits, la référence au contenu CO<sub>2</sub> des bétons reste très marginale. Il n'existe pas de définition d'un béton « bas carbone » à laquelle les acheteurs peuvent facilement se référer, et le contenu CO<sub>2</sub> peut varier significativement en fonction de l'usage. Or, avec plus de 200 000 acheteurs publics et donc potentiellement maîtres d'ouvrage, la force d'entraînement de la commande publique pour modifier les pratiques de marché est importante et peut permettre d'envoyer des signaux favorables pour faire émerger un marché de bétons « bas carbone ». Accompagner des « marchés pilotes » pour expérimenter l'intégration d'un critère carbone sur le béton et/ou d'un seuil d'incorporation de Granulats de Béton Recyclés (GBR) dans le béton utilisé dans les projets du secteur BTP, s'avère être un levier essentiel pour inciter à la décarbonation de la filière cimentière. À titre d'exemple, deux pistes pouvant se compléter peuvent être envisagées dans la rédaction des cahiers des charges :

- **Spécification technique** : conditionner l'accès au marché public par le respect d'un seuil de performance CO<sub>2</sub> du béton en fixant un % de réduction d'émissions de GES, avec comme référence les bétons de classe équivalente composé uniquement de CEM I, et/ou un % minimum d'intégration de GBR dans un m<sup>3</sup> de béton.

- **Critère d'attribution** : donner un poids plus important au critère de performance CO<sub>2</sub> du/des bétons et/ou du taux d'incorporation de GBR, puis l'indiquer dans l'appel d'offres. Cette pondération pourrait être plus importante sur des projets d'infrastructures où il n'existe pas de substituts au béton et où il n'y a pas de réglementation à l'image de la RE2020 pour le bâtiment.

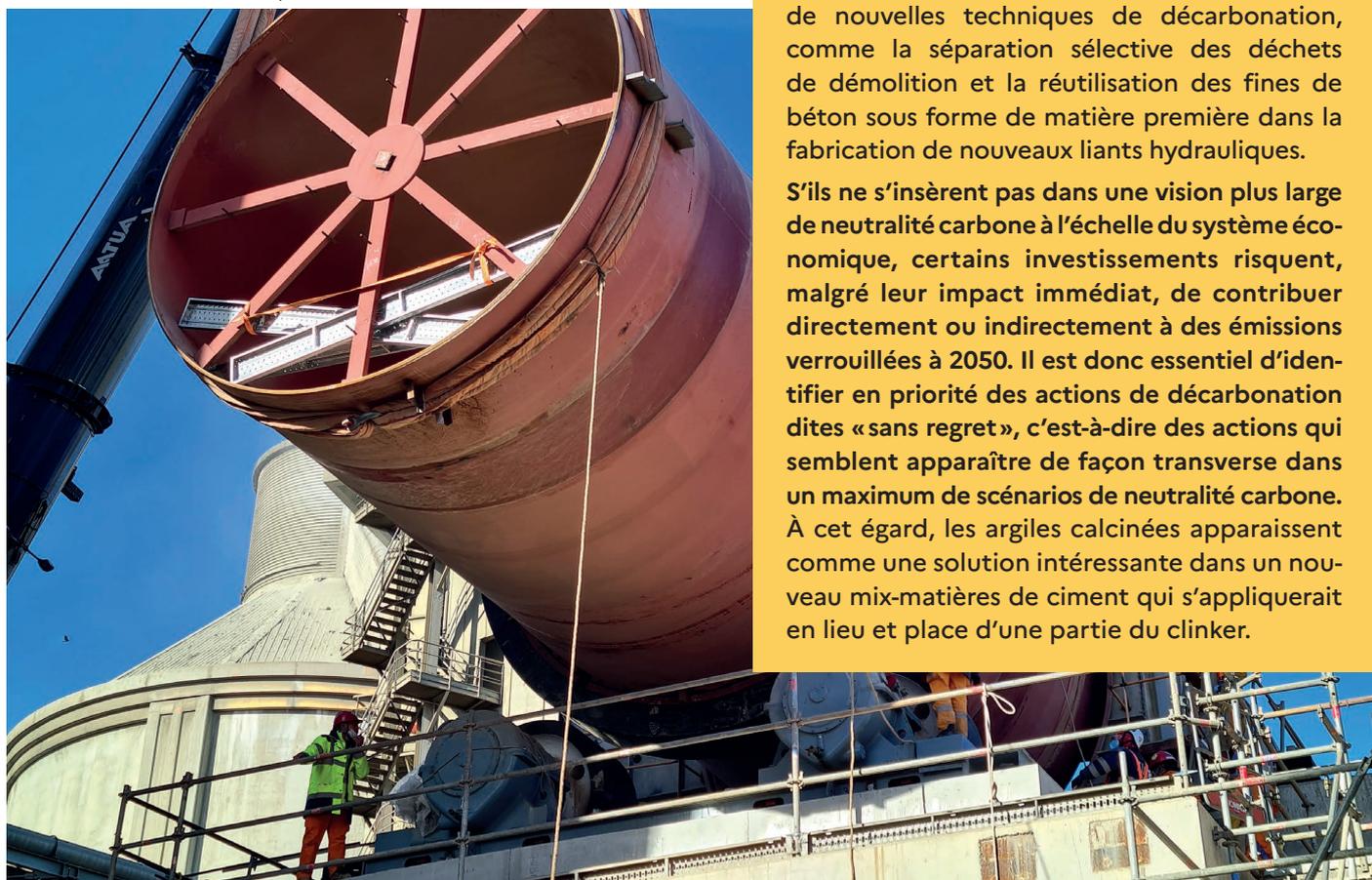
Outre cette nécessaire incorporation de clauses environnementales dans les marchés publics, l'incitation des collectivités pour le développement de ciments « bas carbone » passe également par la diffusion des retours d'expériences, via notamment les réseaux d'acheteurs régionaux.



## Une orientation des investissements vers les sites identifiés comme stratégiques

Compte tenu du coût d'investissement élevé de certaines technologies et de la difficulté de décarboner l'industrie cimentière, le risque d'actifs échoués et d'émissions verrouillées à horizon 2050 est important. Afin de Maîtriser au mieux ce risque, les différents scénarios se sont appuyés sur un fléchage des investissements vers les sites ayant le plus de chance de s'inscrire dans un univers neutre en carbone à très long terme. Cet aspect s'observe particulièrement dans les scénarios choc «sobriété low-tech» et pari «techno-push» dans lesquels il a été nécessaire de jouer sur une réorganisation de l'appareil de production pour atteindre les objectifs de la SNBC, d'où l'intérêt d'adopter une vision «parc». Néanmoins, les choix d'orientation des investissements seront du ressort des différents groupes cimentiers en fonction de leur stratégie industrielle et de décarbonation respective. À noter également que le fait d'assumer certains choix d'investissements impliquera nécessairement d'accompagner la reconversion des autres sites et emplois associés. Ce chiffrage-là n'a pas été réalisé mais devra être intégré dans l'ensemble des politiques publiques d'accompagnement des acteurs et territoires vers la neutralité carbone.

→ Photo de LAFARGEHOLCIM FRANCE/Martres travaux four 2



### Cimentiers : adaptation des stratégies d'innovation

Les enjeux autour des aspects technologiques résident en premier lieu dans la nécessité d'investir massivement dans des solutions matures, notamment dans la rénovation des cimenteries et l'intégration d'autres types de substituts au clinker. D'autre part, il semble indispensable d'amplifier la recherche de solutions innovantes sur la réduction des émissions de process. C'est en tout cas le pari fait dans le scénario «techno-push» où de nouvelles solutions innovantes ont été modélisées, comme la mise sur le marché de nouveaux ciments et clinkers alternatifs, ou la carbonatation accélérée de granulats de béton recyclés avant une réutilisation dans de nouveaux bétons. Cette dernière solution répond d'ailleurs également à un enjeu d'économie circulaire puisqu'elle implique le développement du recyclage des déchets du BTP, ce qui peut également amener à terme à de nouvelles techniques de décarbonation, comme la séparation sélective des déchets de démolition et la réutilisation des fines de béton sous forme de matière première dans la fabrication de nouveaux liants hydrauliques.

S'ils ne s'insèrent pas dans une vision plus large de neutralité carbone à l'échelle du système économique, certains investissements risquent, malgré leur impact immédiat, de contribuer directement ou indirectement à des émissions verrouillées à 2050. Il est donc essentiel d'identifier en priorité des actions de décarbonation dites «sans regret», c'est-à-dire des actions qui semblent apparaître de façon transverse dans un maximum de scénarios de neutralité carbone. À cet égard, les argiles calcinées apparaissent comme une solution intéressante dans un nouveau mix-matières de ciment qui s'appliquerait en lieu et place d'une partie du clinker.



## Un accompagnement «en rythme» des innovations par le cadre réglementaire et normatif



→ Photo de bogdanhoda/Shutterstock.com



### Acteurs de la construction : une nécessaire concertation et formation

Les différents échanges menés avec les acteurs en aval de la chaîne de valeur et les experts du secteur ont permis d'identifier un fort besoin de concertation entre les différents intervenants d'un projet de construction. Du maître d'ouvrage à l'architecte et en passant par le maître d'œuvre et l'entreprise d'exécution du marché, **une marge de manœuvre pour renforcer la coopération entre ces différents corps de métiers existe** afin que le projet de construction puisse répondre à des critères d'efficacité et d'optimisation de la matière, et notamment le béton. En parallèle, la réduction du taux de clinker dans le ciment identifié comme un levier de décarbonation majeur par la filière, modifie les propriétés du béton et appelle à une modification des pratiques sur l'application des bétons sur les chantiers. Il s'agit parfois d'un frein à l'adoption à large échelle de nouveaux produits innovants et par ricochet, à la demande de normalisation de ces produits. Ainsi, **former les opérateurs de l'exécution des marchés à l'utilisation de ces nouveaux produits semble indispensable** pour créer les conditions nécessaires au déploiement de ces nouveaux ciments et bétons «bas carbone» mais également pour optimiser la conception, donc faire mieux en utilisant moins et mieux le matériau béton.

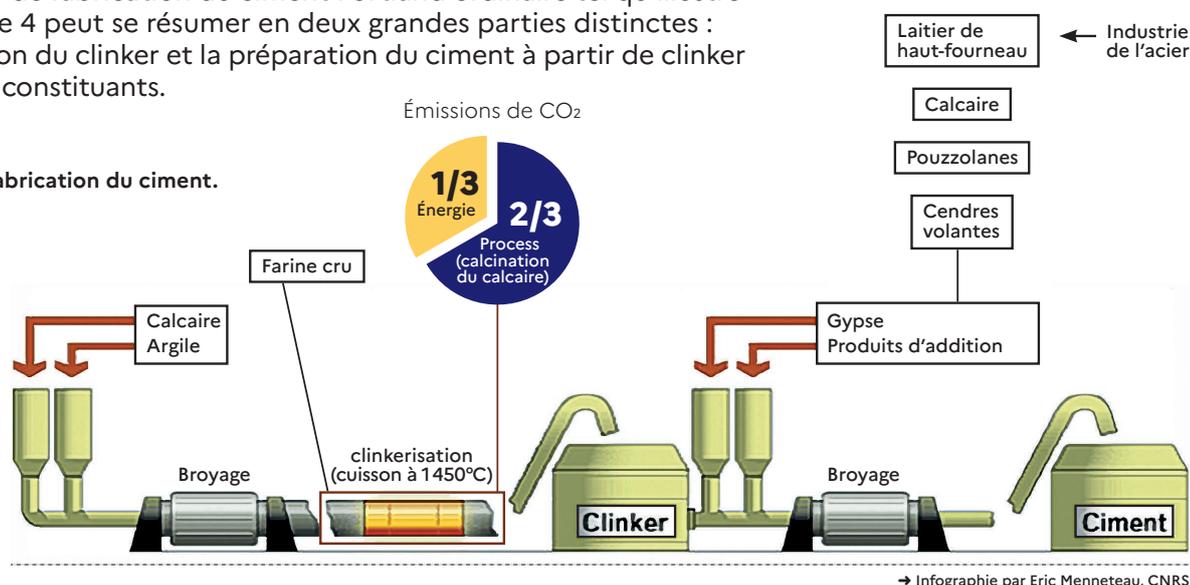
Le déploiement des leviers de décarbonation tel que présenté dans les scénarios présuppose l'absence de freins réglementaires ou normatifs. Or, en réalité, certaines solutions matures sur le plan technique souffrent parfois d'une inertie réglementaire et normative au niveau national et européen. Certains nouveaux liants moins carbonés ne sont même plus considérés comme une nouveauté sur le plan technique au moment où ils sont enfin adoptés par les acteurs de la construction. L'exemple de la mise en œuvre du CSC est également intéressant à cet égard avec plusieurs freins comme le stockage offshore qui nécessite une coordination internationale complexe, ou encore la comptabilisation des émissions négatives qui n'est pas reconnue au niveau européen ; freins qui peuvent donc faire perdre de l'intérêt à certaines technologies. De même, l'acceptabilité des nouveaux produits par les acteurs du marché n'a pas été remis en cause dans les différents scénarios alors qu'un enjeu lié au déploiement des ciments moins carbonés sur les chantiers existe et peut constituer un facteur limitant à la décarbonation de la filière cimentière. Autre exemple, les conditions de l'intégration du CCU dans la réglementation *EU ETS* seront essentielles car l'incertitude actuelle constitue un frein au financement des projets.

# 3. La décarbonation par la projection de l'existant : un premier scénario de référence à 2050

## 3.1. Le procédé de fabrication du ciment : essentiel à une première compréhension des enjeux de décarbonation de la filière

Le procédé de fabrication du ciment Portland ordinaire tel qu'illustré sur la Figure 4 peut se résumer en deux grandes parties distinctes : la fabrication du clinker et la préparation du ciment à partir de clinker et d'autres constituants.

Figure 4. Procédé de fabrication du ciment.



Le clinker est un constituant de couleur gris foncé qui peut être considéré comme le principe actif : c'est lui qui confère les propriétés de liant hydraulique au ciment, c'est-à-dire qui durcit au contact de l'eau. Le clinker est obtenu par cuisson d'un mélange préalablement broyé de calcaire (80%) et d'argile (20%) qui sont des matières premières relativement abondantes et bien réparties géographiquement. C'est d'ailleurs en partie la raison pour laquelle l'industrie cimentière est très localisée et le ciment est un produit qui voyage peu. La cuisson a lieu dans un four rotatif à 1450°C et représente la grande majorité de la consommation énergétique d'une cimenterie. C'est au niveau de cette étape qu'ont lieu les émissions d'une cimenterie : environ 1/3 sont dues à la consommation d'énergie thermique et 2/3 sont dues à la réaction chimique de calcination du calcaire au cours de laquelle le calcaire (de formule chimique  $\text{CaCO}_3$ ) est dissocié en chaux ( $\text{CaO}$ ) et en  $\text{CO}_2$ . Une fois le clinker formé, il est refroidi en sortie de four et la chaleur dégagée est réutilisée au niveau de la production du clinker en premier lieu puis ailleurs dans le procédé.

Une fois le clinker formé, celui-ci est broyé et mélangé avec d'autres constituants pour produire des ciments aux propriétés voulues. Ces constituants secondaires peuvent

être soit des coproduits industriels (comme le laitier de haut-fourneau qui est un sous-produit de l'industrie de l'acier ou les cendres volantes issues de centrales à charbon), soit des matériaux présents à l'état naturel (tel que le calcaire et la pouzzolane naturelle).

La préparation du ciment à partir de clinker peut être réalisée indépendamment sur des stations de broyage. Il s'agit d'ailleurs d'une tendance qui s'observe depuis quelques années : certains acteurs importent du clinker venu de l'étranger (notamment de pays d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient) et produisent du ciment pour le marché français dans des stations de broyage généralement situées près des zones portuaires. Cette pratique peut être manifestement considérée comme une forme de fuite de carbone. Il existe aussi une autre voie de production de ciment qui consiste à mélanger du CEM I constitué à environ 95% de clinker déjà broyé avec d'autres constituants secondaires comme du filler calcaire micronisé. Par ailleurs, la production de ciment dans des usines de mélange peut bénéficier de la certification NF Liants Hydrauliques depuis quelques années. Dans le cas des stations de broyage et des usines de mélange, ces sites de production ne présentent pas d'émissions directes puisque la production de clinker a lieu sur d'autres sites.

## 3.2. La construction du scénario de référence : itinéraire technologique et trajectoire de demande ●

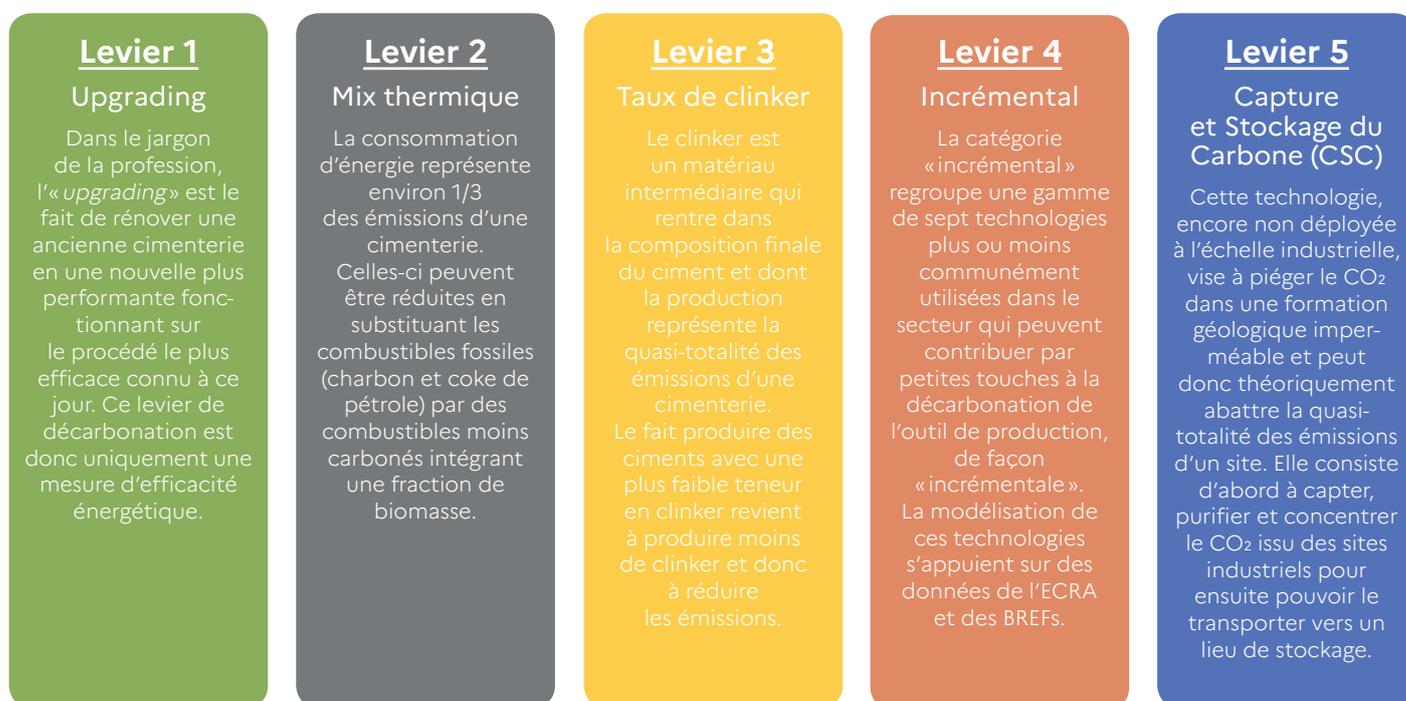
### Un itinéraire technologique basé sur des technologies matures...

Afin de proposer des trajectoires de décarbonation pour l'industrie cimentière française, il a été fait le choix de modéliser l'adoption de différentes technologies de transition avec pour but de construire un itinéraire technologique cohérent et réaliste. En concertation avec les acteurs concernés, cinq leviers de décarbonation applicables (et pour certains déjà partiellement appliqués) à l'industrie cimentière et bien connus de la profession, explicités sur la Figure 5, ont été identifiés et modélisés dans un outil Excel. Le montant des investissements nécessaires à la mise en place de ces leviers ainsi que leur impact sur le coût de production du ciment ont également été modélisés dans l'outil.

### ...couplé avec deux scénarios de demande en ciment

Avec 9,5 millions de tonnes de ciment consommées en 2014 en France, le secteur de la construction neuve représente 53% de la demande (18 Mt consommées en 2014 tous secteurs confondus). La Figure 6 présente les flux de matières entre l'extraction du calcaire et de l'argile nécessaires à la production de clinker et la consommation finale de béton selon les différents usages. Outre l'importance des constructions neuves pour la filière, c'est aussi et surtout la faible part du ciment dans le béton qui ressort, en comparaison des sables et granulats.

Figure 5. Principaux leviers de décarbonation de l'industrie cimentière<sup>5 6</sup>.



<sup>5</sup> ECRA (European Cement Research Academy) : [https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/CSI\\_ECRA\\_Technology\\_Papers\\_2017.pdf](https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf)

<sup>6</sup> BREF (Best Available Techniques Reference Document) : [https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive\\_ied/CLM\\_BREF\\_042013.pdf](https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive_ied/CLM_BREF_042013.pdf)



→ Photo de LAFARGEHOLCIM FRANCE/Martres travaux tour

### Outil PEPITO : Perspective d'Évolution de la Production Industrielle pour une Trajectoire 0 carbone

PEPITO<sup>10</sup> est un outil de modélisation Excel développé en partenariat avec l'ASSOCIATION NEGAWATT qui a pour but d'évaluer les niveaux de demande en matériaux issus des 9 secteurs industriels les plus énérgo-intensifs (acier, aluminium, ciment, verre, dichlore, ammoniac, éthylène, papier/carton et sucre) à partir de scénarios d'évolution des marchés consommateurs de ces matériaux (mécanique, électricité, textile, transport...). Ces scénarios sont obtenus à partir d'hypothèses faites sur un jeu de plus de 200 paramètres à horizon 2050 (démographique, taux de recyclage, consommation en biens d'équipement par habitant, nombre de kilomètres parcourus en véhicule...). L'outil PEPITO peut être mis à disposition gratuitement sur demande à l'adresse mail : [transition.industrie@ademe.fr](mailto:transition.industrie@ademe.fr)

L'évolution du rythme de constructions d'ici à 2050 constitue donc un enjeu important pour l'industrie cimentière. À titre illustratif, il a été estimé qu'une réduction de 10% du nombre de constructions neuves (maisons individuelles et logements collectifs) provoquerait une baisse d'environ 3% de la production de ciment (toutes choses égales par ailleurs, sans modification des systèmes constructifs et des pratiques actuelles). Au-delà du bâtiment, la projection de la demande a également consisté à prendre en compte l'évolution du nombre de kilomètres de routes et de capacités d'énergie renouvelable installées. **Dans le scénario de référence, une trajectoire d'évolution de la demande visant à décrire plus généralement un contexte de transition dans lequel s'appliquerait un itinéraire technologique, a été considéré et modélisé à l'aide de l'outil PEPITO** (voir encadré ci-contre). La méthode employée a été la même pour la construction des deux autres scénarios extrêmes choc « *sobriété low-tech* » et pari « *techno-push* ».

<sup>7</sup> Etude INSEE « 374.000 logements supplémentaires chaque année entre 2010 et 2015 » (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/3572689#titre-bloc-14>)

<sup>8</sup> L'étude de l'INSEE montre également que la part qu'occupent les résidences principales dans cette croissance du parc observée sur la dernière décennie a diminué au profit des logements vacants et des résidences secondaires.

<sup>9</sup> Les logements vacants représentaient en 2018 selon l'INSEE 8,4% des 36,3 millions de logements du parc immobilier en France métropolitaine (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/3676693?sommaire=3696937>)

<sup>10</sup> Transition industrielle - Prospective énergie matière : vers un outil de modélisation des niveaux de production (<https://www.ademe.fr/transition-industrielle-prospective-energie-matiere-vers-outil-modelisation-niveaux-production>)

**Au sein de ce scénario de référence, un volontarisme plus important que dans une évolution tendancielle de la part des pouvoirs publics est considéré.**

Il se traduit essentiellement par une contrainte réglementaire sur le nombre de constructions neuves et en particulier une baisse progressive du nombre de constructions de maisons individuelles pour atteindre -50% à horizon 2050 par rapport à 2014 (calcul ADEME issu de l'hypothèse SNBC). Cette hypothèse traduit une baisse du nombre de constructions chaque année (flux) et non du nombre de maisons individuelles (stock), et se justifie par le fait que sur la dernière décennie, selon l'INSEE<sup>7</sup>, le rythme de hausse du nombre de logements a augmenté environ deux fois plus rapidement que celui de la démographie. Pour faire face à la hausse de la démographie d'ici à 2050, les constructions supplémentaires devront par ailleurs être mieux fléchées sur de la résidence principale plutôt que sur de la résidence secondaire<sup>8</sup>. De la même manière, les logements dits « vacants »<sup>9</sup> seront identifiés et mobilisés pour une mise sur le marché. La part de marché du bois comme matériau alternatif dans la construction neuve est en hausse dans le tertiaire et le logement collectif (respectivement 10% et 20% en 2050) où il vient concurrencer le béton. Il est toutefois à noter que le béton devrait vraisemblablement demeurer un matériau de choix pour certains types de construction où la substitution

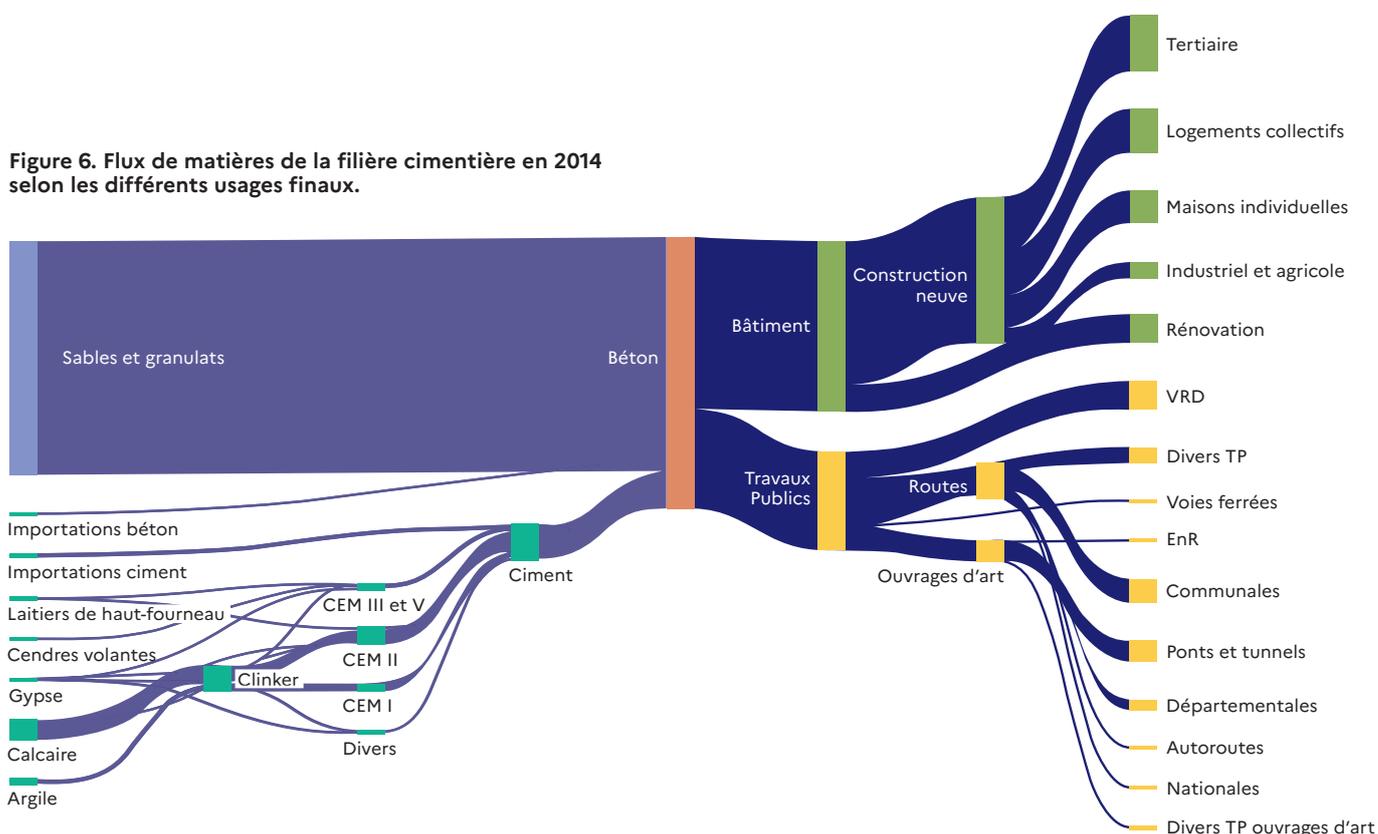


→ Photo de CIMENTS CALCIA/Clinker

est limitée. Compte tenu de leur part marginale dans la consommation de béton, le développement des énergies renouvelables, et notamment de l'éolien, ne suffit pas à compenser la diminution des besoins de béton, et donc de ciment.

Par ailleurs, bien que l'adaptation au changement climatique nécessiterait à priori, un recours plus important en matériaux de construction (ex. reconstruction d'infrastructures, digues, etc.), les besoins induits en ciment n'ont pas fait l'objet d'une quantification spécifique.

**Figure 6. Flux de matières de la filière cimentière en 2014 selon les différents usages finaux.**



### 3.3. Des solutions technologiques encore insuffisantes pour une décarbonation satisfaisante à horizon 2050 ●

#### Une trajectoire d'émissions du scénario de référence alignée avec les objectifs jusqu'à un décrochage post-2040

Dans le scénario de référence où la baisse de la demande est modélisée conformément aux hypothèses issues de la Stratégie Nationale Bas Carbone, les émissions totales du secteur du ciment devraient diminuer de presque 15% à travers cette unique hypothèse de baisse de la production. Si dans ce scénario l'ensemble des leviers de décarbonation identifiés étaient mis en œuvre (*upgrading*, changement de mix thermique, diminution du taux de clinker et améliorations incrémentales), cela engendrerait une baisse des émissions de l'ordre de 44% hors technologie de Captage et de Stockage de Carbone (CSC).

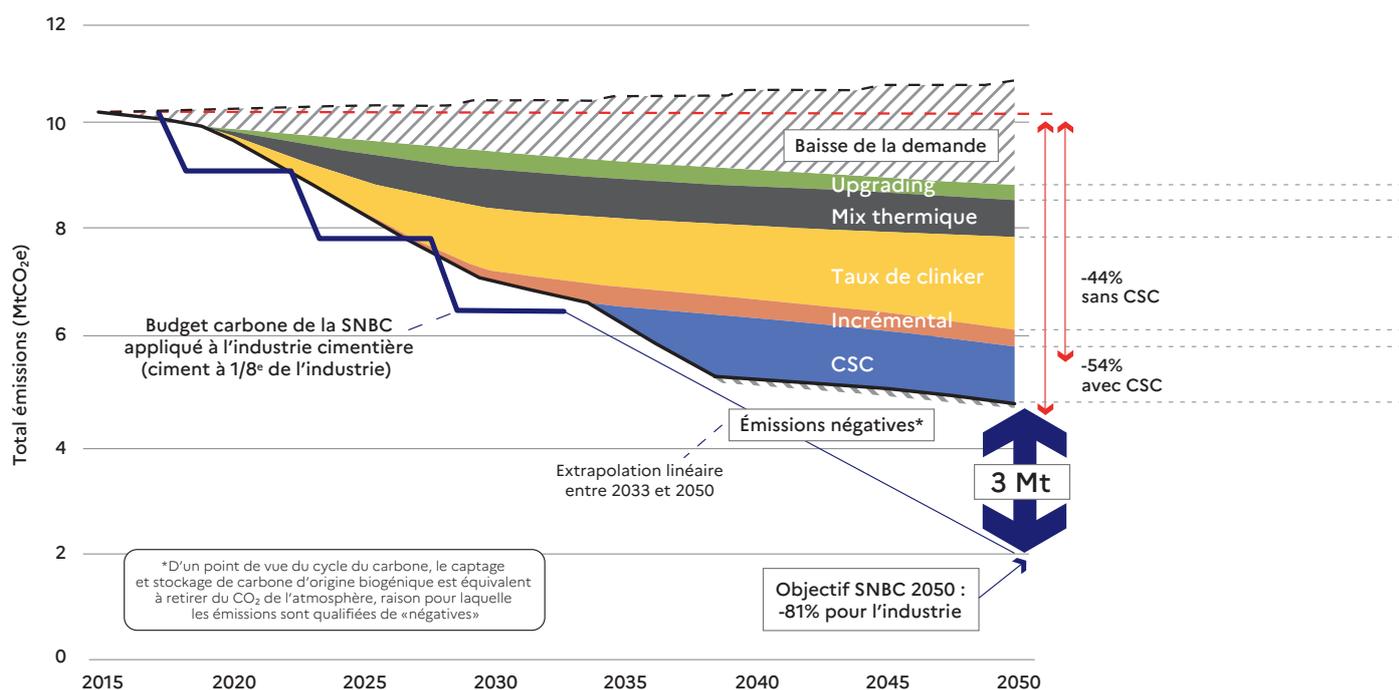
En cas d'inclusion de la technologie CSC qui ne pourrait être, selon l'ADEME, envisagé que sur 5 cimenteries dans le scénario de référence, hors CCU et hors infrastructures de transport de CO<sub>2</sub>, la baisse des émissions globale serait de 54% d'ici à 2050 par rapport à 2015 (Figure 7). Ainsi, seulement la moitié du chemin serait parcouru, puisqu'il resterait de l'ordre de 3 MtCO<sub>2</sub>e à abattre pour atteindre l'objectif de la SNBC en 2050. Dans ce cas, l'évolution des émissions du secteur est fidèlement alignée avec la trajectoire définie par la SNBC, jusqu'à 2040 où un décrochage apparaît du fait de l'absence de solutions technologiques supplémentaires. La SNBC donne un

objectif de réduction de 35% des émissions pour l'industrie entre 2015 et 2030. Le nouveau plan européen en matière d'énergie et de climat présenté en septembre 2020 par la Commission Européenne donne un objectif de réduction de 25% des émissions pour l'industrie entre 2015 et 2030 ce qui se traduit par des émissions annuelles de 7,7 MtCO<sub>2</sub>e en 2030 pour l'industrie cimentière. Cet objectif européen en 2030, moins ambitieux que celui de la SNBC pour l'industrie, est largement atteint et dépassé avec l'itinéraire technologique proposé.

Sur la Figure 7 sont également affichées, à titre indicatif, les émissions négatives liées au captage et stockage de la fraction biogénique du flux de CO<sub>2</sub> des cimenteries.

**Ainsi, si elles étaient comptabilisées, les émissions négatives ne contribueraient que très marginalement à la décarbonation du secteur, de l'ordre de 1 à 2%.** Ce faible effet des émissions négatives est dû au nombre limité de sites ayant accès au CSC ainsi qu'à la faible part de CO<sub>2</sub> biogénique dans les émissions de cimenteries. Même si le mix thermique d'une cimenterie était décarboné à 100% avec uniquement l'utilisation de combustibles biomasse, il resterait environ 2/3 de CO<sub>2</sub> fossile provenant de la calcination du calcaire.

Figure 7. Scénario de référence – Dynamique d'abattement des émissions de CO<sub>2</sub> de la filière et courbe de coûts d'abattements associée



# Un calcul dynamique du coût d'abattement sur la base du coût de production

Si l'objectif du coût d'abattement est bel et bien d'estimer le coût associé au déploiement d'une technologie pour abattre une tonne de CO<sub>2</sub>, les approches méthodologiques diffèrent et conditionnent à la fois l'évaluation de l'opportunité d'investir pour un industriel, mais aussi le dimensionnement d'une potentielle aide à l'investissement pour les pouvoirs publics. Dans le scénario de référence et les alternatives proposées en partie 4, le choix a été fait d'adopter une approche dynamique consistant à mesurer chaque année le coût ou gain associé au déploiement d'une technologie, en comparaison d'une situation de référence sans technologie (Équation 1). Cette méthodologie de calcul intitulé «coût d'abattement cumulé actualisé», a été prise en compte dans le scénario de référence et le scénario extrême pari «*techno-push*» en raison de l'importance du déploiement des technologies pour décarboner l'industrie cimentière, contrairement au scénario extrême choc «*sobriété low-tech*» (Figure 12). La disparition progressive des quotas gratuits entre 2025 et 2030 ainsi qu'une trajectoire de prix du CO<sub>2</sub> à horizon 2050 ont été considérées dans la modélisation (cf. partie 5 pour plus de détails).

Une approche purement «économique» de la décarbonation et une lecture purement «économique» de la courbe d'abattement tel que représentée sur la Figure 7 impliquerait un «*merit order*» des différents leviers par ordre croissant. Dans cette logique, déployer le levier «mix thermique» semblerait prioritaire compte tenu de la valeur du coût d'abattement associé de -303 EUR par

## Équation 1. Formule de calcul du coût d'abattement cumulé actualisé (cumac)

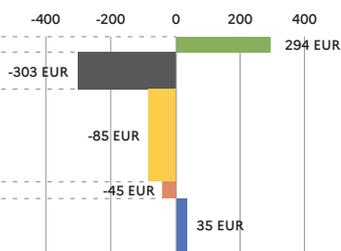
$$Ca_i = \frac{\text{Total des coûts}}{\text{Total des émissions de CO}_2 \text{ évitées}} \left[ \sum_{t=1}^{D_i} \frac{(CAPEX_{i,t} + \Delta OPEX_t \times Q_t)}{(1 + r^{act})^{t-1}} \right] \times \left[ \frac{1}{\sum_{t=1}^{D_i} Q_t \times (\Delta \text{intCO}_2)} \right]$$

avec  $D_i$  la durée de vie de la technologie  $i$ ,  $Q_t$  le niveau de production en année  $t$ ,  $r^{act}$  le taux d'actualisation et  $\Delta \text{intCO}_2$  la variation du niveau d'émissions de CO<sub>2</sub> par tonne de ciment suite au déploiement de la technologie

tonne de CO<sub>2</sub> évitée, reflétant une économie d'OPEX importante en comparaison de l'investissement consenti. Or, l'atteinte de ce niveau d'abattement n'est possible qu'avec un *upgrading* du parc dont le coût d'abattement élevé de 294 EUR par tonne de CO<sub>2</sub> évitée implique un besoin de financement important<sup>11</sup>. Ici est donc fait le choix d'une approche résolument technico-économique où des critères de faisabilité opérationnelle sont pris en compte dans les décisions de financement d'investissements, notamment de la part des pouvoirs publics pour un potentiel accompagnement. Concernant plus spécifiquement le CSC, seule l'étape de captage du CO<sub>2</sub> sur site et les OPEX liés au transport et au stockage sont modélisés.

**Cette hypothèse revient à considérer que le déploiement des infrastructures est pris en charge par les pouvoirs publics et sous-estime donc le coût d'abattement d'un point de vue sociétal.**

**Courbe de coûts d'abattement «cumac», en EUR/tCO<sub>2</sub> évitée**



### Comment interpréter la courbe de coût d'abattement ?

Plus le rectangle est haut (mesure de l'ordonnée), plus le levier permet d'abattre des émissions en volume. Par exemple, le levier incrémental offre moins de potentiel d'abattement que le CSC malgré un coût d'abattement plus faible.

Lorsque le coût d'abattement d'une technologie est négatif (mesure de l'abscisse), son déploiement permet des économies d'OPEX qui font plus que compenser l'investissement initial en CAPEX. Les plus faibles valeurs de coûts d'abattement présentés ici par rapport à des valeurs standards issues de la littérature, résultent essentiellement des hypothèses prises sur l'évolution de la demande et du prix du CO<sub>2</sub>.

Une trajectoire de prix du CO<sub>2</sub> plus ambitieuse ferait diminuer les valeurs de coût d'abattement. Les technologies deviendraient plus «rentables» car l'investissement initial (hors coût du capital) serait plus rapidement «amorti» par les économies d'OPEX générées.

<sup>11</sup> Les chiffres sont des moyennes sur le parc cimentier et peuvent masquer des situations différentes entre les usines de référence.

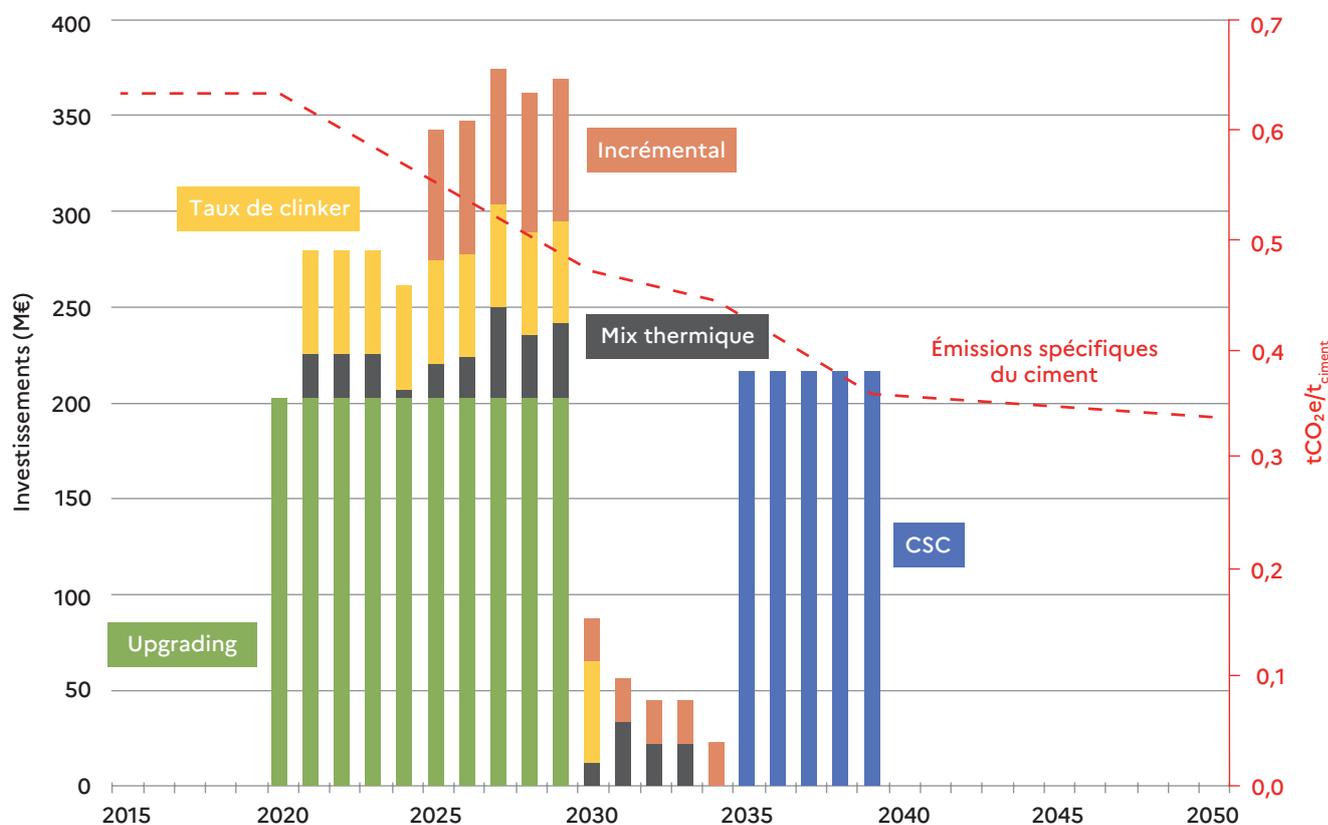
### 3.4. Des investissements massifs à décider dès à présent, pas seulement pour développer des technologies innovantes ! ●

Les investissements nécessaires pour mettre en place ces leviers de décarbonation ont été chiffrés à environ **3,3 Mds EUR sans CSC sur l'ensemble du parc cimentier français** (Figure 8). Sachant qu'environ 60% de ces investissements servent à la remise à niveau des cimenteries (par la mise en place de nouveaux fours à « état de l'art » dont les performances sont proches de celles attendues d'après les standards MTDs<sup>12</sup>) et qu'il s'agit d'un levier mature techniquement déployable à court terme, la chronique d'investissement est très concentrée au début de la décarbonation de la filière c'est-à-dire à partir de 2020. Par ailleurs, si les investissements nécessaires à la mise en place du CSC sont ajoutés (uniquement la partie captage pour les usines « éligibles » et non les parties transport et stockage), le montant total des investissements est estimé à hauteur d'environ **4,4 Mds EUR**. En attendant le déploiement du CSC à partir de 2035, la période 2030-2035 présente donc un « creux » ou un ralentissement des investissements.

Pour mettre ces chiffres en perspective, les investissements corporels bruts moyens sur la période 2013-2017 du secteur de la fabrication de ciment, chaux et plâtre (code NAF 23.5) s'élèvent à 172 MEUR/an<sup>13</sup> soit environ 5,2 Mds EUR en cumulé sur 30 ans. Ainsi, en faisant l'hypothèse que le secteur du ciment capture l'essentiel des investissements du secteur de la fabrication de ciment, chaux et plâtre, il apparaît que l'itinéraire modélisé est cohérent avec l'ampleur des investissements de l'industrie du ciment.

Les deux enjeux majeurs, en première approche, seraient de maintenir l'ampleur des investissements tout en accélérant ces derniers sur une période de 10 ans et non 30 ans.

Figure 8. Chronique d'investissements sur le parc cimentier et évolution des émissions spécifiques avec CSC (hors coût du capital).



<sup>12</sup> Meilleurs techniques disponibles (MTD) identifiés au sein des documents européens BREF : [https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive\\_ied/CLM\\_BREF\\_042013.pdf](https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive_ied/CLM_BREF_042013.pdf)

<sup>13</sup> Estimé sur la base de données INSEE : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4226063?sommaire=4226092>

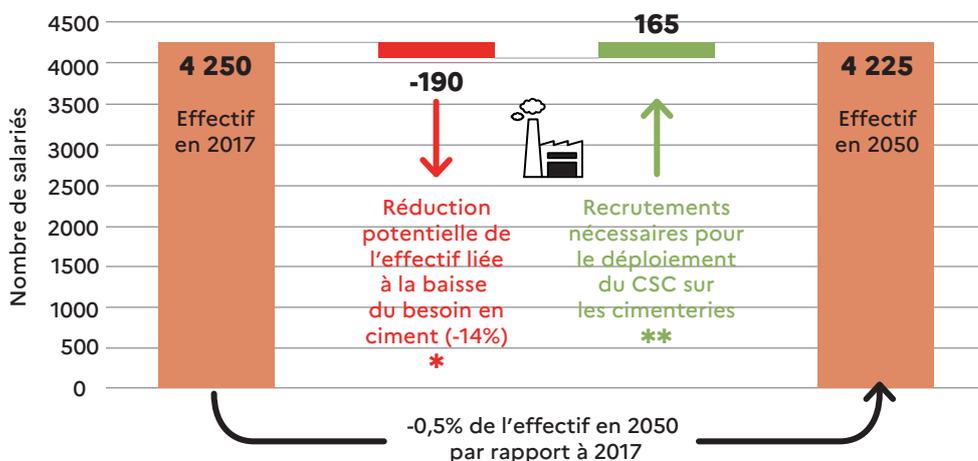
### 3.5. Des effets sur l'emploi direct limités mais hétérogènes selon les territoires ●

Avec en moyenne 4500 salariés sur la période 2007-2017, les emplois de la filière cimentière représentent environ 0,2% des emplois totaux de l'industrie manufacturière selon les années. Le ralentissement de l'activité du BTP suite à la crise économique de 2007 explique en partie la **réduction d'environ 10,5% des effectifs de la filière cimentière sur 10 ans**<sup>18</sup>. Cette tendance historique à la baisse peut être comparée avec l'estimation à horizon 2050 illustré par la Figure 9. L'exercice de projection du scénario référence met en lumière **un effet sur le « volume net d'emplois » à priori très peu significatif (-0,5%)**, en raison de la « compensation » de la réduction d'effectif liée à la baisse des besoins en ciment, par des recrutements nécessaires pour le déploiement du CSC sur les sites concernés.

En amont, le ratio de 1 emploi direct pour 5 emplois indirects localisés dans la fourniture de consommations intermédiaires a été estimé, alors qu'en aval, à **un emploi direct dans la filière cimentière correspond 7 emplois en aval dans la production de béton**<sup>19</sup>. En termes de projection à 2050, ces ratios permettent d'estimer une perte d'environ 950 et 1300 emplois respectivement pour les emplois indirects et les emplois aval. Concernant plus spécifiquement ces derniers, toute chose égale par ailleurs, cela correspond à environ 4,5% du total des emplois associés à la production de béton, alors qu'entre 2007-2017, une chute d'environ 15%, soit environ 5 000

emplois, a été observée en raison, notamment, de la baisse de la demande de ciment du secteur du BTP. En parallèle, **un enjeu de formation et d'évolution des compétences a été remonté à plusieurs reprises par les acteurs de la filière aval**, afin que les nouveaux produits développés par les cimentiers puissent être appliqués par les opérateurs de la construction. Cette approche « filière », et les estimations qui y sont associées, ne présagent pas des évolutions de répartition des effectifs entre les cimentiers et entre leurs différents sites. Les stratégies des entreprises pour s'adapter au marché et à la production de ciment « bas-carbone » peuvent en effet fortement diverger en raison, par exemple, d'un accès aux financements plus ou moins facilité et de l'intensité de la concurrence régionale/locale. **Des disparités territoriales sembleraient également apparaître.** Certains territoires pourraient en effet profiter de leur localisation sur des zones CSC ou d'une disponibilité en CSR plus importante qu'ailleurs et ainsi renforcer leur attractivité pour que l'activité cimentière soit pérennisée et éventuellement développée. À l'inverse, la dépendance de certains territoires à l'activité de la cimenterie pourrait les rendre « vulnérables » en cas de réduction significative de la demande<sup>20</sup>. À cet égard, une attention particulière serait à porter par les pouvoirs publics sur ces territoires et l'emploi qui y est attaché.

Figure 9. Estimation de l'évolution de l'effectif total de l'industrie cimentière en 2050 sur la base du Plan de Transition Sectoriel (scénario de référence)

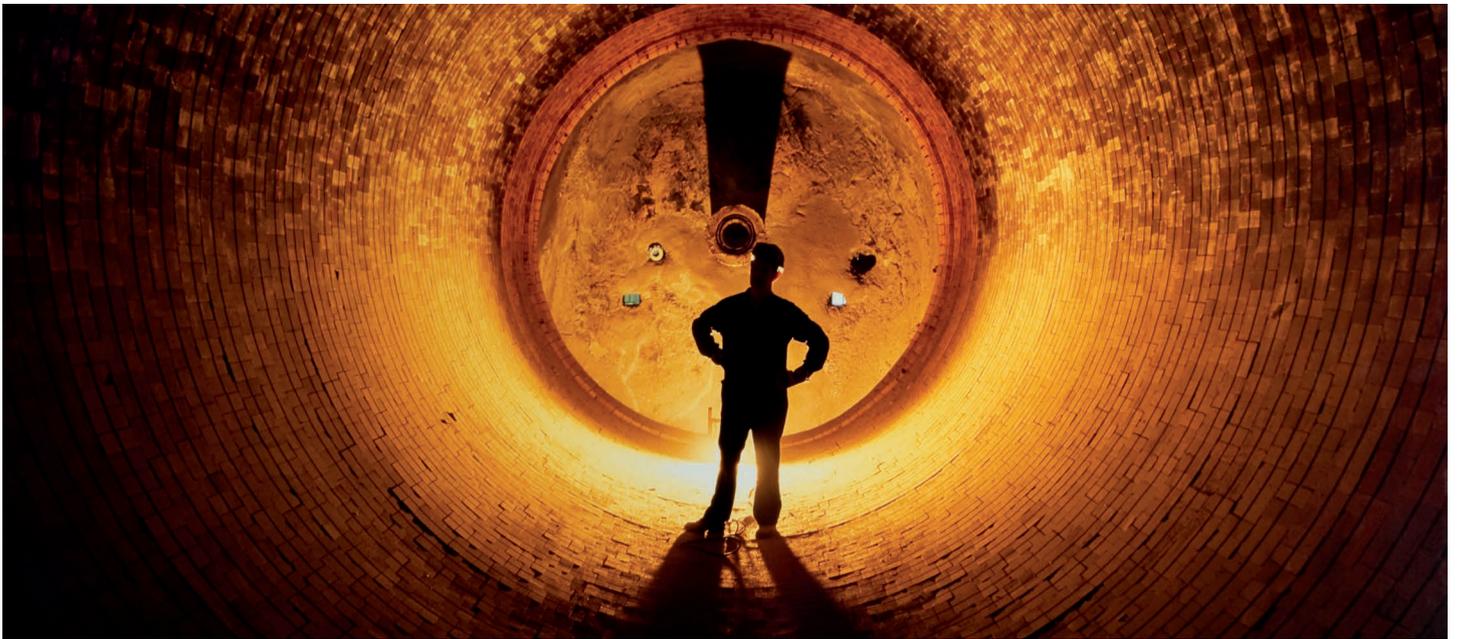


**Note méthodologique :**  
 estimé sur la base de l'élasticité du facteur travail par rapport à la production sur 2006-2018 et d'une productivité constante (calcul ADEME avec données ACOSS-Ursaff)  
 \*\* estimé sur la base des articles de Roussanaly et al., 2017 et De Lena et al., 2019

<sup>14</sup> Source : ACOSS-Ursaff

<sup>15</sup> Source : Infociments (2013) pour le ratio des « emplois indirects » et estimation faite du ratio « emplois aval » sur la base des données ACOSS-Ursaff. Pour information, l'industrie des matériaux regroupe plus de 65 000 emplois parmi lesquels 35 000 sont directement liés aux sites de fabrication de béton.

<sup>16</sup> En moyenne l'effectif d'une cimenterie représente 19% du nombre d'emplois total sur la commune d'implantation du site. Pour certaines communes ce taux est supérieur à 60%.



→ Photo de VICAT/Créchy-Intérieur four

## 4. Vers des propositions de scénarios plus extrêmes pour atteindre l'objectif de la SNBC

### 4.1 Deux contextes de transition pour atteindre l'objectif de -81% d'émissions de gaz à effet de serre de la SNBC ●

Dans la partie précédente, la trajectoire de décarbonation de l'industrie cimentière était guidée par une réflexion sur le prolongement et l'amélioration technologique de l'appareil de production existant, co-construite avec les industriels cimentiers. Cette trajectoire ne parvenant pas à aboutir à l'objectif de la SNBC pour l'industrie, deux autres scénarios plus extrêmes permettant de répondre à cet objectif, et dont la philosophie est de mettre en parallèle des univers diamétralement opposés, ont été imaginés.

**Chaque scénario proposé repose sur deux piliers que sont : le niveau de production et l'itinéraire technologique.**

Contrairement aux deux scénarios alternatifs extrêmes, le scénario de référence présenté jusqu'à maintenant n'a pas fait l'objet d'une obligation de résultat mais d'une obligation de moyens. En effet, la vocation principale de la construction de ce scénario de référence a été de modéliser les leviers de décarbonation existants et/ou

dont le potentiel est identifié, sur la base d'échanges et de concertations avec les industriels cimentiers et les autres parties prenantes. Ce travail de co-construction n'a pas été conditionné par la nécessité d'atteindre un volume d'émissions de CO<sub>2</sub> spécifique en 2050.

La philosophie des scénarios alternatifs extrêmes choc « *sobriété low-tech* » et pari « *techno-push* » est en revanche de considérer que l'objectif de -81% d'émissions de CO<sub>2</sub> fixé dans la SNBC, est atteint. Ce postulat de base s'apparente à une obligation de résultat conditionnant les leviers appliqués dans chacun des scénarios. En l'occurrence, un important déploiement technologique est privilégié dans le scénario extrême pari « *techno-push* » alors qu'un choc de demande est simulé dans le scénario extrême choc « *sobriété low-tech* ». Le Tableau 2 résume les principaux éléments de contexte caractéristiques de chaque scénario. La comparaison de ces trois « univers » met en exergue des moyens de décarboner qui diffèrent fortement, de même que les conséquences en termes de rythme de baisse d'émissions de CO<sub>2</sub> et de répercussions économiques.

Tableau 2. Résumé des principaux éléments de contexte de chaque scénario.

	Scénario extrême choc «sobriété low-tech»	Scénario de référence	Scénario extrême pari « techno-push »
Accès aux financements	<p>★ ★ ★</p> <p>Les perspectives de croissance du marché de la construction sont faibles et les financements privés sont donc difficiles à mobiliser. Les aides publiques sont plutôt destinées à l'accompagnement des sites «en transition».</p>	<p>★ ★ ★</p> <p>Les faibles perspectives de marché rendent difficiles l'accès aux financements pour le déploiement de technologies innovantes. Un soutien de l'état est néanmoins présent notamment pour le déploiement des zones CSC.</p>	<p>★ ★ ★</p> <p>Les industriels bénéficient d'importantes aides à l'investissement et pour la R&amp;D, stimulant ainsi le déploiement de certaines technologies innovantes. Ce soutien est de nature à rassurer les investisseurs qui accordent plus volontiers des financements.</p>
Niveau de contrainte réglementaire	<p>★ ★ ★</p> <p>L'objectif de Zéro Artificialisation Nette des sols à partir de 2030 se traduit par un durcissement des règles d'urbanisme et de construction au niveau des territoires.</p>	<p>★ ★ ★</p> <p>La SNBC n'est pas directement contraignante mais divers mécanismes incitatifs mis en place au niveau territorial influencent les Plans Locaux d'Urbanisme en matière de constructions neuves.</p>	<p>★ ★ ★</p> <p>Le rythme de construction dépend des déterminants de marché (prix des matériaux de construction, prix relatif du foncier, etc.). La RE2020 n'a que marginalement impacté les parts de marché des matériaux de construction.</p>
Évolution de la demande en ciment	<p>★ ★ ★</p> <p>Réduction importante des volumes de ciment liée à la baisse de l'activité de construction. En parallèle, la demande pour des ciments bas-carbone se renforce.</p>	<p>★ ★ ★</p> <p>Augmentation de la part du marché du bois sous l'impulsion de la RE2020 malgré un ralentissement à partir de 2030 en raison d'une limite sur la disponibilité en bois.</p>	<p>★ ★ ★</p> <p>La demande en béton pour les infrastructures augmente tandis que celle pour les bâtiments diminue.</p>
Technologies de décarbonation	<p>★ ★ ★</p> <p>Le manque de moyens fait que les entreprises recourent à la substitution de combustibles et la baisse du taux de clinker, les leviers les plus simples techniquement et les moins capitalistiques à mettre en œuvre.</p>	<p>★ ★ ★</p> <p>La décarbonation de l'industrie cimentière repose essentiellement sur la substitution de combustibles, la baisse du taux de clinker et le déploiement du CSC là où il est aujourd'hui identifié comme techniquement envisageable.</p>	<p>★ ★ ★</p> <p>En plus de la substitution de combustibles et de la baisse du taux de clinker, la décarbonation de l'industrie cimentière repose en bonne partie sur le CSC, le développement de ciments et clinker alternatifs et à la minéralisation.</p>
Évolution de l'appareil de production	<p>★ ★ ★</p> <p>La production de clinker est concentrée sur les sites les plus efficaces (voies sèches avec précalcinateur) et pouvant par ailleurs intégrer une grande part de combustibles de substitution pour un effort capitalistique moindre. Le clinker est ensuite transporté dans les territoires pour préparation du ciment au plus proche du marché. Les autres sites se reconvertissent en stations de broyage de clinker et pour la production d'argiles calcinées.</p>	<p>★ ★ ★</p> <p>Toutes les cimenteries passent plus ou moins par la même transformation (upgrading, baisse du taux de clinker...) à l'exception de celles situées sur les zones CSC. Il n'y a pas de réorganisation particulière de l'appareil de production et toutes les cimenteries subissent de façon homogène les fluctuations de la demande nationale.</p>	<p>★ ★ ★</p> <p>La production de clinker se concentre sur les zones CSC et est ensuite transportée dans les territoires pour préparation du ciment au plus proche du marché. Les autres sites se reconvertissent en des plateformes de distribution de ciment, pour la production d'argiles calcinées et pour la production de nouveaux ciments et clinkers alternatifs.</p>

## 4.2 La décarbonation par la technologie : une transition guidée par un pari « techno-push » ●

Dans ce scénario extrême, la production nationale de ciment diminue de presque 10% avec un fléchage plus important sur les travaux publics dont la demande augmente. Les émissions annuelles du secteur deviennent inférieures au budget carbone défini par la SNBC appliqué à l'industrie cimentière, au moment de la montée en puissance du CSC et de la minéralisation (Figure 10). La moitié des cimenteries du parc sont rénovées avec une mise à niveau selon les Meilleures Techniques Disponibles (conversion en voie sèche avec précalcinateur). En particulier, les cimenteries localisées sur des zones CSC sont également massifiées lors de l'opération d'*upgrading* ce qui signifie en pratique que l'atelier de cuisson est modifié de manière substantielle pour une meilleure efficacité et une capacité potentiellement accrue. **La cible de -81% des émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 est atteinte et même dépassée grâce à la séquestration de CO<sub>2</sub> d'origine biogénique.** La séquestration permanente d'émissions de CO<sub>2</sub> d'origine biogénique (dans un stockage géologique pour le CSC ou sous forme de roche recarbonatée pour la minéralisation) permet en effet d'agir comme un puit carbone d'un point de vue climatique. L'opération est équivalente à absorber du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.

Dans un premier temps et dans la lignée des tendances passées, les groupes cimentiers poursuivent leurs mesures actuelles de décarbonation à travers, de préférence, la modification du mix thermique et la baisse du taux de clinker moyen, qui sont les deux leviers les plus simples et les moins chers à mettre en œuvre lorsque le contexte réglementaire et le marché le permettent. Le recours à la production d'argiles calcinées est motivé par des politiques de soutien à l'investissement, par la perspective de la disparition des quotas gratuits et par des incitations à l'utilisation de ciments moins carbonés par les acteurs du marché. **Sur la décennie 2020-2030**, l'effort de décarbonation est porté principalement par les acteurs en aval (accompagnés par les cimentiers) qui adaptent leurs pratiques constructives pour intégrer de nouveaux produits à plus faibles taux de clinker («**la demande se transforme**») tandis que la période 2030-2050 est marquée par un effort de réorganisation de l'appareil industriel autour de cette demande qui agit comme un pivot («**la production se transforme**»). Sur la **période 2020-2030**, les entreprises cimentières investissent ainsi largement dans des fours de calcination flash pour produire des argiles calcinées sur leurs cimenteries, pour répondre à la demande en même temps qu'elles poursuivent la production de clinker.

Figure 10. Scénario extrême pari « techno-push » – Dynamique d'abattement des émissions de CO<sub>2</sub> de la filière et courbe de coûts d'abattements associée

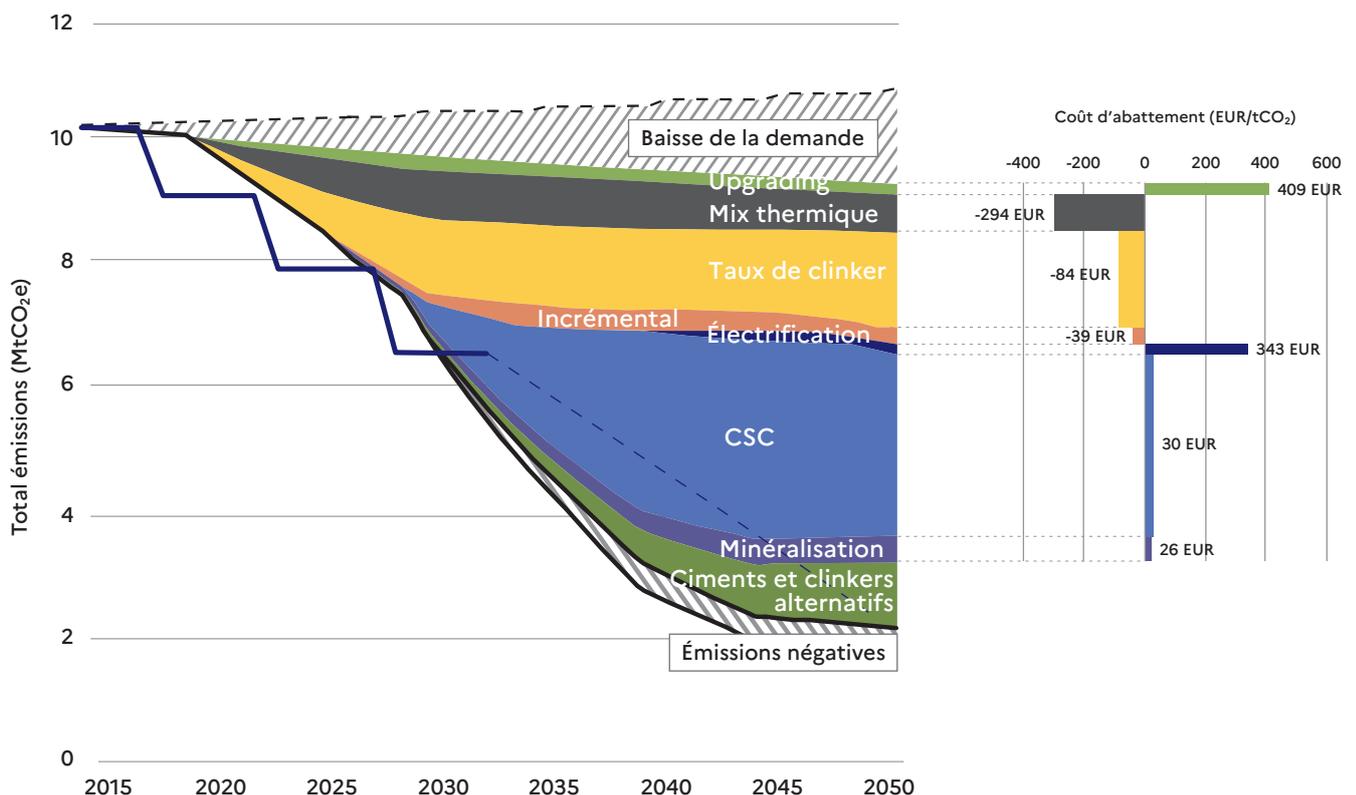
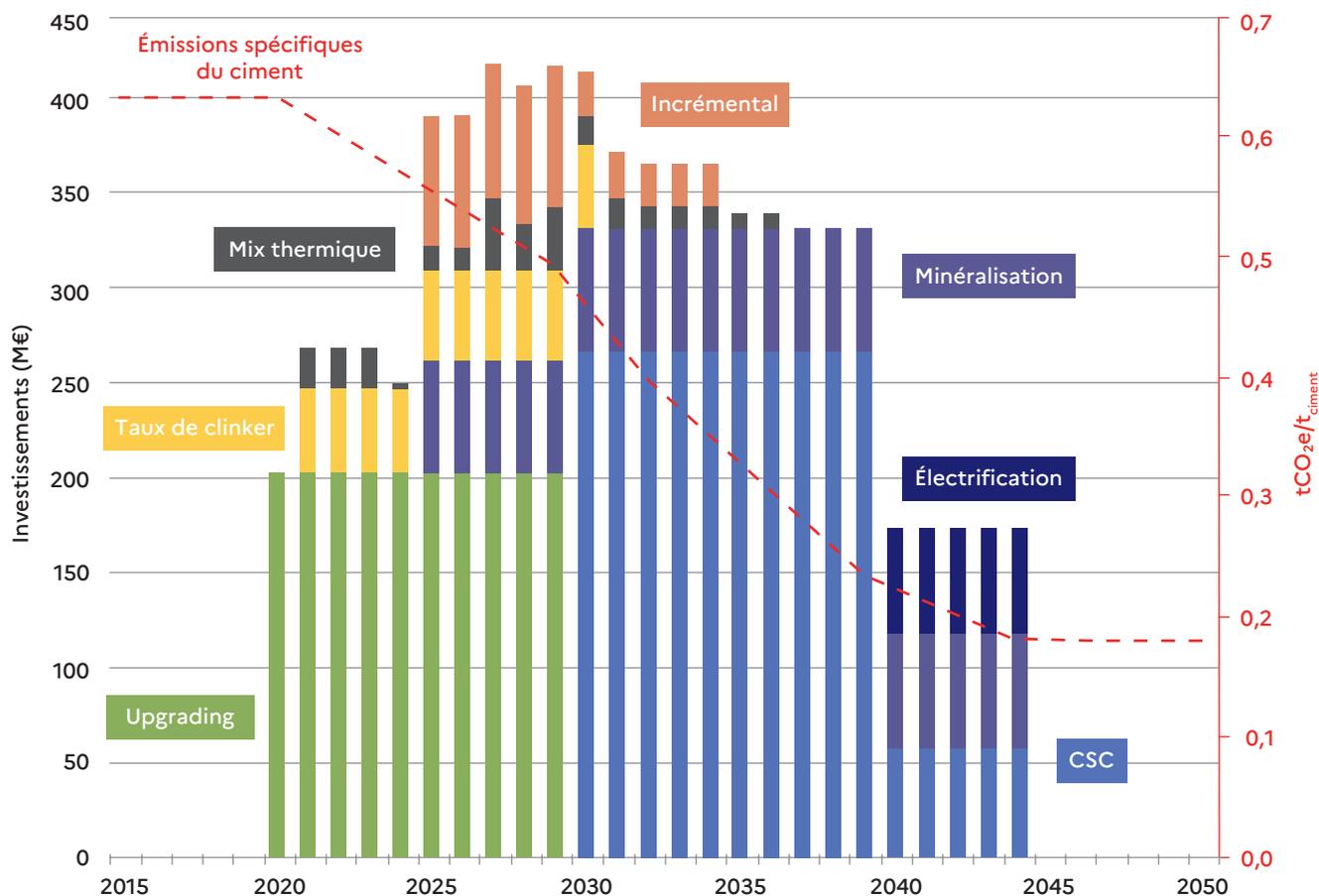


Figure 11. Scénario extrême pari « techno-push » – Chronique d'investissements sur le parc cimentier et évolution des émissions spécifiques (hors coût du capital).



La Figure 10 fait également apparaître des coûts par tonne de CO<sub>2</sub> évitée pouvant être élevés, notamment pour l'électrification (343 EUR/tCO<sub>2</sub>). Dans ce cas, ce coût d'abattement très élevé se justifie par la concentration du CO<sub>2</sub> que permet l'électrification au niveau du précalcinateur, rendant possible le captage du CO<sub>2</sub> en sortie. **L'électrification est donc une technologie à considérer comme associée au captage du carbone.**

Le montant total des investissements nécessaires (Figure 11) se chiffre à environ **7,7 Mds EUR**, dont une grande partie est liée à la rénovation et la massification des sites stratégiques et au déploiement du CSC et de la minéralisation. Par ailleurs, la chronique d'investissements permet de mettre en lumière un autre enjeu que celui du montant total de la facture. Afin de lisser au mieux les investissements sur les trois prochaines décennies et éviter un rythme annuel de décaissement trop important (au risque d'être confronté à des limites sur le flux annuel d'investissements), il est nécessaire pour la réalisation de ce scénario d'éviter un recoupement entre les investissements liés à l'*upgrading* dans un premier temps et ceux liés au déploiement du CSC dans un second temps. En pratique, **cela signifie qu'il est primordial, pour les acteurs industriels, d'identifier rapidement (au cours de la prochaine décennie) les sites stratégiques qui subiront une opération d'*upgrading*, en particulier en prévision d'un futur déploiement du CSC déjà planifié.**



→ Photo de CEMENTS CALCIA/Réparation

## 4.3 La décarbonation par la sobriété : l'industrie cimentière face à un choc de marché ●

Dans le scénario extrême choc « *sobriété low-tech* », sur les -81% d'émissions de CO<sub>2</sub> en moins en 2050 par rapport à 2015, 55% provient de la baisse de la production, qui s'avère donc, de loin, la première cause de baisse des émissions. La baisse du taux de clinker, la décarbonation du mix thermique ainsi que l'utilisation de liants alcali-activés au laitier viennent combler le restant de la trajectoire (Figure 12). Dans ce scénario, la chute de la demande est si rapide qu'aux alentours de 2030, les émissions annuelles du secteur sont inférieures au budget carbone défini par la SNBC appliqué à l'industrie cimentière. En appliquant une trajectoire carbone linéaire entre 2033 et 2050, cette avance annuelle sur le budget se poursuit jusqu'à l'atteinte des -81% en 2050.

Dans la Figure 12, l'impact de baisse de la production de ciment sur les émissions du secteur est décomposé selon les principales causes de baisse par rapport à un scénario de demande tendanciel. Ainsi la baisse de la demande pour le bâtiment est la première cause de baisse de production à 2050 (46%) suivi des travaux publics (29%), de l'optimisation de l'usage de ciment (25%) puis enfin

plus marginalement la substitution du béton par du bois dans les ouvrages restants (1%). La production de ciment est aussi légèrement impactée par une très faible différence dans le commerce extérieur en 2050 par rapport à 2015 (moins d'importations) mais cet effet marginal n'a pas été illustré sur la figure.

Le volume de laitier de haut-fourneau nécessaire pour la production de liants demeure inchangé entre 2015 et 2050, à environ 1,5 Mt/an. Toutefois, en 2050, son utilisation est partagée entre la production de ciments conventionnels (plus particulièrement les CEM III, CEM V, CEM II/C-M et CEM VI) et la production de liants activés au laitier. Avec une forte diminution de la production de ciment et parallèlement une stagnation de la production d'acier, la tension sur la demande en laitier de haut-fourneau s'apaise peu à peu, libérant ainsi de la disponibilité sur la ressource. L'industrie cimentière se saisit de cette offre plus abondante pour proposer des liants alcali-activés composés à 80% de laitier de haut-fourneau. **Au-delà du choix de ce produit en particulier, l'utilisation de liants alcali-activés au laitier dans ce scénario permet**

Figure 12. Scénario extrême choc « *sobriété low-tech* » – Dynamique d'abattement des émissions de CO<sub>2</sub> de la filière.

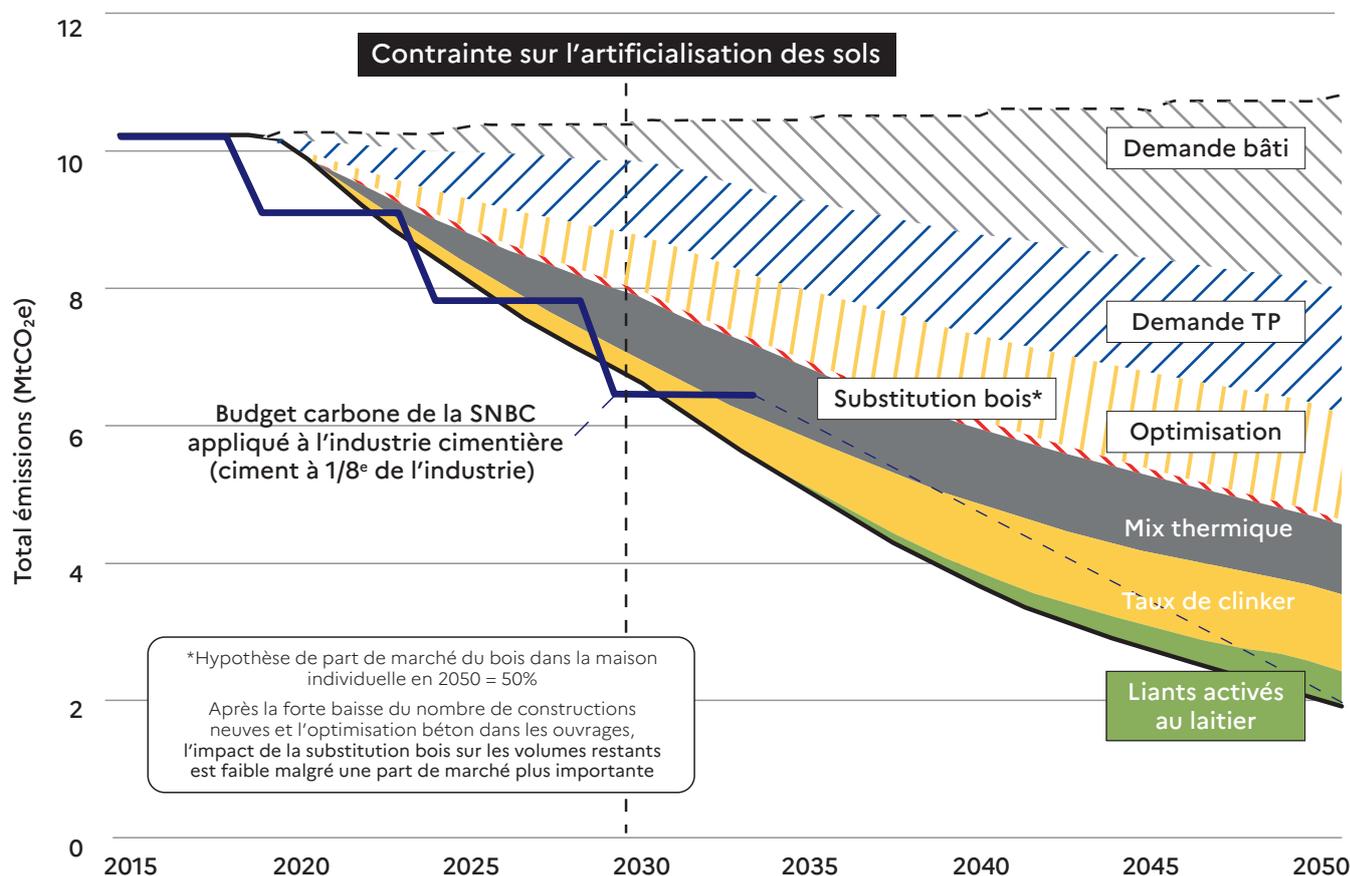
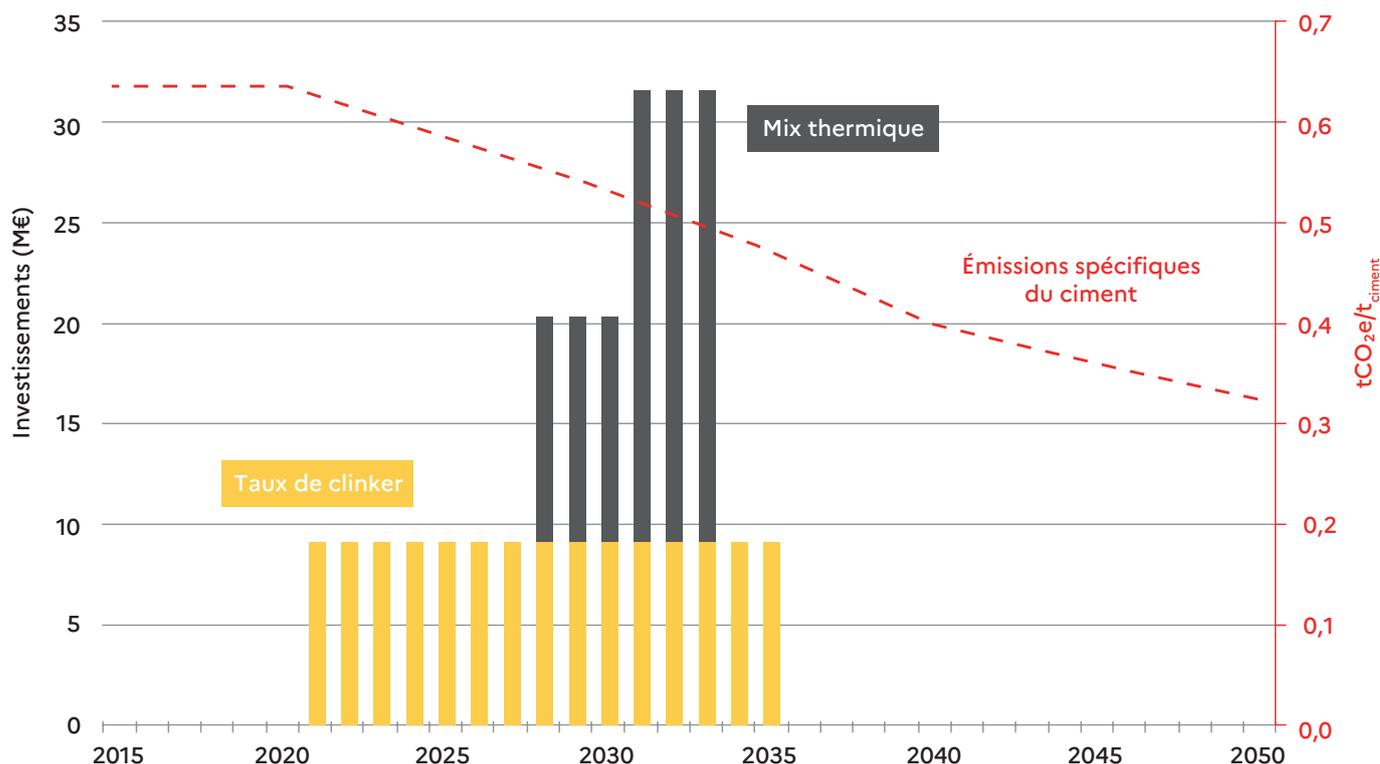


Figure 13. Scénario extrême choc « sobriété low-tech » – Chronique d'investissements sur le parc cimentier et évolution des émissions spécifiques (hors coût du capital).



surtout d'illustrer le fait que la tension d'approvisionnement sur le laitier peut potentiellement se desserrer dans ce type d'univers<sup>17</sup>. Le laitier devenu davantage disponible pourrait, de façon équivalente, servir à une plus grande production de CEM III/C qui peuvent contenir jusqu'à 95% de laitier de haut-fourneau.

Le montant total des investissements nécessaires est estimé à environ 240 MEUR sur la période 2020-2050 (Figure 13). Ce montant représente l'équivalent de moins de deux ans « d'investissements corporels bruts moyens » du secteur de la fabrication de ciment, chaux et plâtre (code NAF 23.5). Pour le mix thermique, les investissements servent à l'augmentation de capacité de consommation et à la préparation de combustibles de substitution (ex. : silos de stockage, convoyeurs, ateliers de préparation). Concernant le taux de clinker, l'estimation du besoin global en investissements s'est faite sur le postulat qu'une partie des fours rotatifs définissant les capacités actuelles de production de clinker sont convertis pour la production d'argiles calcinées. Dans ce cas, l'hypothèse de CAPEX

qui a été retenue est de 10 MEUR par conversion et la consommation thermique spécifique est de 3,1 GJ/t<sub>argile</sub>, contre respectivement 20 MEUR et 2,7 GJ/t<sub>argile</sub> pour un nouveau four de calcination flash (utilisé dans les autres scénarios)<sup>18</sup>. Dans la mesure où il s'agit de leviers matures et techniquement maîtrisés, la chronique d'investissements est concentrée sur la période 2020-2035 avec un pic annuel centré autour de 2032. Les mesures technologiques permettent de réduire l'empreinte carbone moyenne du ciment d'environ 55%.

**Dans ce scénario extrême, l'objectif de « zéro artificialisation nette des sols » (ZAN) inscrit dans le plan biodiversité en 2018 et pour lequel un observatoire a été créé en juillet 2019 a été érigé en priorité en raison des co-bénéfices qu'il porte : lutte contre le changement climatique (potentielle absorption du CO<sub>2</sub> et absence d'émissions liées à un usage alternatif), refuge de biodiversité et atténuation des risques d'inondation.**

<sup>17</sup> Plus d'informations sur l'articulation entre les filières ciment et acier seront disponibles dans le rapport complet PTS ciment et ainsi que dans les travaux sur le PTS acier.

<sup>18</sup> S. Sanchez Berriel et al., « Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba », Journal of Cleaner Production, vol. 124, pp. 361-369, 2016. À noter qu'à ce jour, des acteurs cimentiers constatent des coûts d'investissements plus élevés pour la mise en place de ce type de technologie.

# 5. Scénarios de référence ou plus extrêmes : des enseignements économiques convergents malgré des niveaux d'investissements très différents

## 5.1 En moyenne, un ciment plus cher à produire et fortement dépendant du prix du CO<sub>2</sub> ●

En raison de l'hétérogénéité des itinéraires technologiques possibles, tant du point de vue du type de technologie que de l'année d'application sur un site et la vitesse de déploiement sur le parc, il existe une multitude d'impacts potentiels de la décarbonation de la filière cimentière sur la dynamique du coût de production. Dans les trois scénarios, **des trajectoires à la hausse du prix de l'énergie et du prix du CO<sub>2</sub> ont été modélisées sur la période 2020-2050** (Figure 14). L'objectif n'est pas de prévoir les évolutions de ces prix soumis à de nombreux aléas mais de refléter l'impact de ces différents OPEX (*i.e.* OPEX énergie et OPEX CO<sub>2</sub>) dans le coût du ciment, dont l'évolution dépend des prix unitaires et des intensités en énergie et en CO<sub>2</sub> de la production.

Concernant plus spécifiquement le CO<sub>2</sub>, si les cimentiers bénéficient de quotas gratuits sur le marché *EU ETS* depuis le début de son instauration, **la disparition progressive d'ici à 2030 de ces quotas attribués gratuitement a notamment été modélisée dans les trois scénarios**<sup>19</sup>. Le relèvement des objectifs climatiques de l'Union Européenne et de la France permet de justifier une potentielle hausse importante du prix à la tonne de CO<sub>2</sub> à hauteur de 181 EUR en 2050. **La trajectoire retenue est celle de la Banque de France dans un scénario « transition ordonnée »**<sup>20</sup>. La même source a été mobilisée pour la trajectoire du prix de l'énergie fossile alors qu'une étude de l'ADEME sur le mix électrique a permis de construire une trajectoire d'évolution à la hausse du prix de l'électricité d'ici à 2050<sup>21</sup>.

Figure 14. Hypothèses sur les trajectoires des prix du CO<sub>2</sub> et de l'énergie

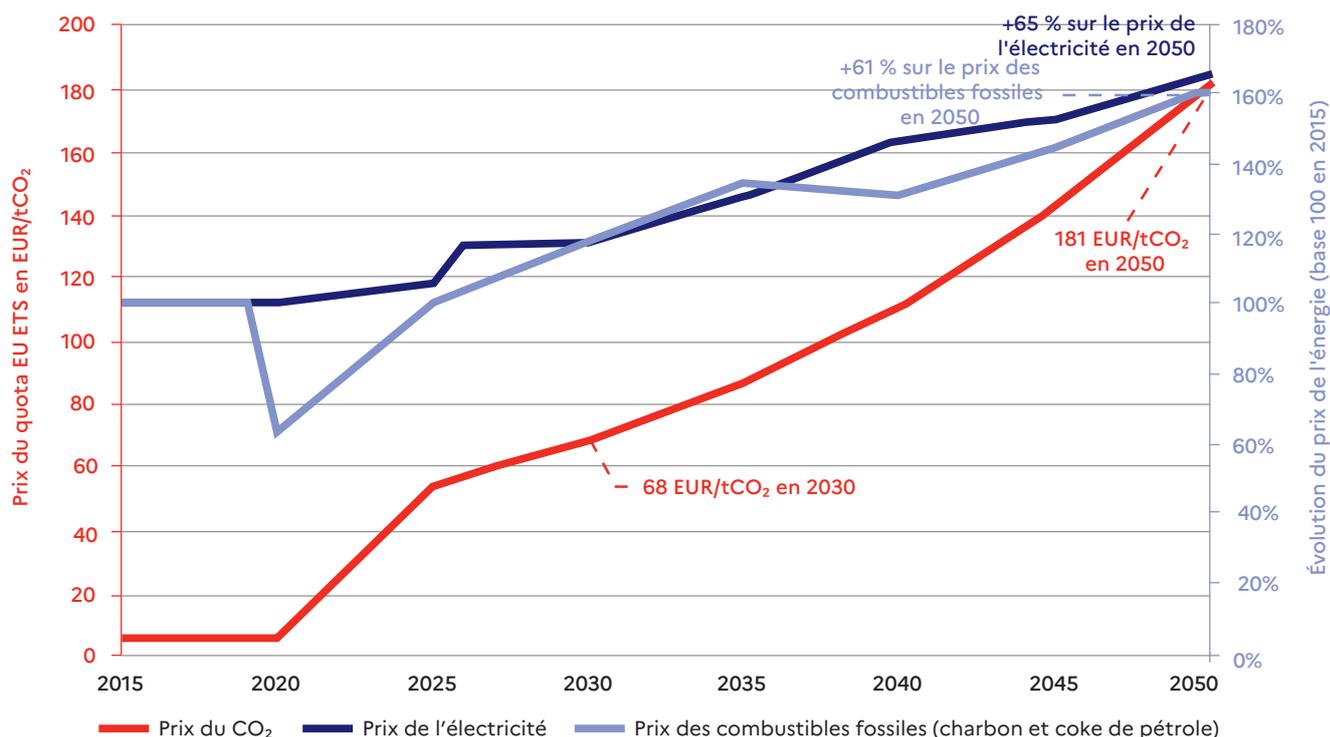
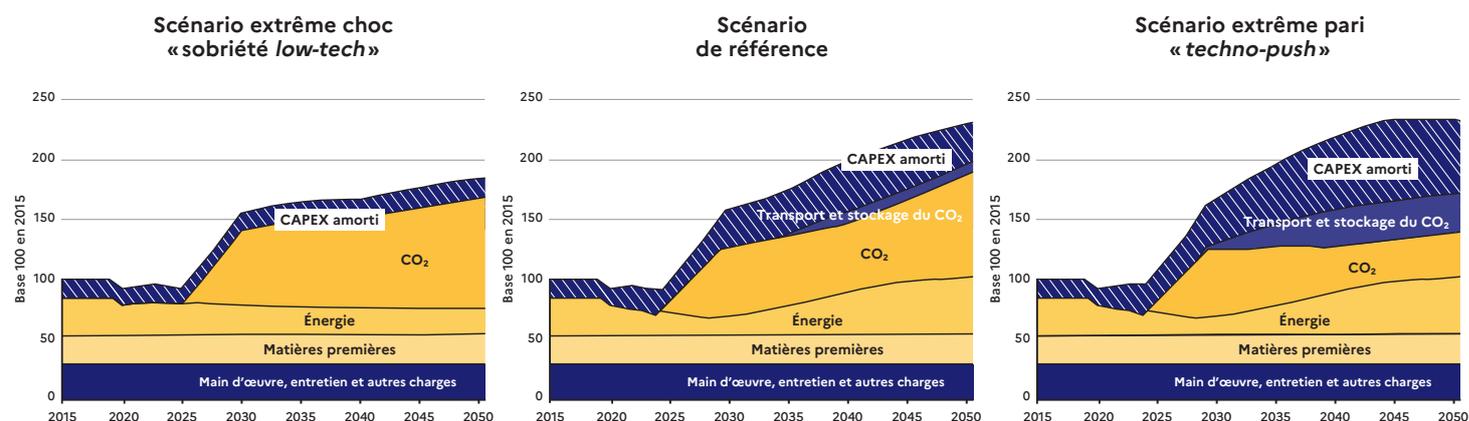


Figure 15. Évolution de la structure de coûts pour la production d'une tonne de ciment entre 2015 et 2050 (indice base 100 en 2015)



La Figure 15 montre les résultats de l'impact de la transition sur le coût de production moyen du parc cimentier français à horizon 2050, selon les différents scénarios. Outre l'amortissement du capital, la prise en compte d'une trajectoire du prix du CO<sub>2</sub> aboutissant à 181 Euros en 2050 aboutit à une **hausse du coût de production dans tous les scénarios. Sans aucun investissement dans la décarbonation, le coût de l'inaction viendrait tripler le coût de production du ciment ; alors qu'en investissant dans la décarbonation, cette hausse serait limitée à un doublement.**

L'atteinte de l'objectif de -81% d'émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 par rapport à 2015 dans les scénarios extrêmes alternatifs ne semble pas générer un coût de production plus important que dans le scénario de référence, où la réduction n'atteint que -54%. **Atteindre l'objectif de la SNBC, que ce soit au travers d'un déploiement massif des technologies ou bien d'une baisse significative de la demande provoque une hausse du coût unitaire de production de respectivement 130% et 85%, contre 130% pour le scénario référence.** En observant la structure de coûts, il s'avère que la prise en compte d'un coût du CO<sub>2</sub> croissant et la disparition progressive des quotas gratuits à horizon 2030, installent la composante carbone comme élément majeur du coût de production d'une tonne de ciment dans le scénario sobriété (Figure 15). Bien que le volume de production soit fortement réduit, l'intensité CO<sub>2</sub> reste élevée et chaque tonne émise est donc payée par l'industriel à travers l'achat de quotas CO<sub>2</sub> sur le marché EU ETS. Le faible niveau de production

**× 2**

**Ordre de grandeur de l'impact des scénarios de transition sur le coût de production**

**× 3**

**Ordre de grandeur de l'impact du prix du CO<sub>2</sub> sur le coût de production sans investissements dans la décarbonation**

permet néanmoins aux industriels dans ce contexte de diminuer la part du poste « énergie », alors que les dépenses en CAPEX n'augmentent que très légèrement, à la différence du pari « techno-push ». En effet, l'intensité CO<sub>2</sub> est fortement réduite dans ce dernier grâce au déploiement de technologies innovantes, mais dont le coût fixe est élevé, en particulier la technologie CSC qui vient rajouter des coûts énergétiques ainsi que des coûts de transport et stockage du CO<sub>2</sub>, en plus du CAPEX amorti nécessaire. **Ainsi, l'amortissement du CAPEX en 2050 dans le scénario sobriété n'est augmenté que de 19% alors qu'il est multiplié par 4 dans un scénario de décarbonation impulsé par la technologie.**

<sup>19</sup> Cette éventualité a été mise en avant à plusieurs reprises par les instances européennes dans le cadre des travaux sur le Mécanisme d'Inclusion Carbone aux Frontières. Les autorités françaises se sont par ailleurs positionnées en faveur d'une disparition progressive des quotas gratuits, dans le cas où un MACF était instauré (Conférence Internationale sur le MACF organisée par la France, 23 mars 2021). Par ailleurs, des discussions sont en cours autour de la révision de plusieurs directives dont celle concernant l'ETS (i.e. package « Fit for 55 »).

<sup>20</sup> ACPR, « Analyse et supervision du risque climatique – Scénarios et hypothèses principales » 2020.

<sup>21</sup> ADEME, « Trajectoires d'évolution du mix électrique 2020-2060 », 2019. Cette trajectoire ne tient pas compte de l'impact des investissements sur les infrastructures réseau.

## 5.2 ...pour un impact limité sur le prix final d'un bâtiment ●

La diffusion de la hausse du coût de production de la tonne de ciment sur le prix final d'un bâtiment résulte d'une succession d'étapes tout au long de la chaîne de valeur, où chaque acteur économique répercute plus ou moins fortement l'impact de cette hausse sur le prix de vente de son produit. Si la place du coût du ciment dans la structure de coûts de l'entreprise est un premier facteur d'explication, la politique commerciale vis-à-vis du client, le comportement stratégique des concurrents ou encore l'évolution du prix des produits substitués sont d'autres facteurs qui peuvent expliquer la manière dont la hausse du prix d'une matière première est répercutée sur le prix de vente. En revanche, ces derniers éléments étant difficiles à appréhender, une approche « filière » a été retenue sur la base de données publiques contenues dans la littérature et d'un raisonnement toute chose égale par ailleurs. Ainsi, les valeurs calculées ont uniquement pour objectif de donner un ordre de grandeur de l'effet de la transition de la filière cimentière sur le prix d'une construction, indépendamment de l'évolution d'autres variables explicatives comme le prix du sable, le coût de la main d'œuvre, etc. La Figure 16 montre ainsi que le doublement du coût unitaire de production du ciment, tel qu'il est modélisé pour le scénario référence et le pari « techno-push », a peu d'effet sur le prix d'un logement. Ceci s'explique par

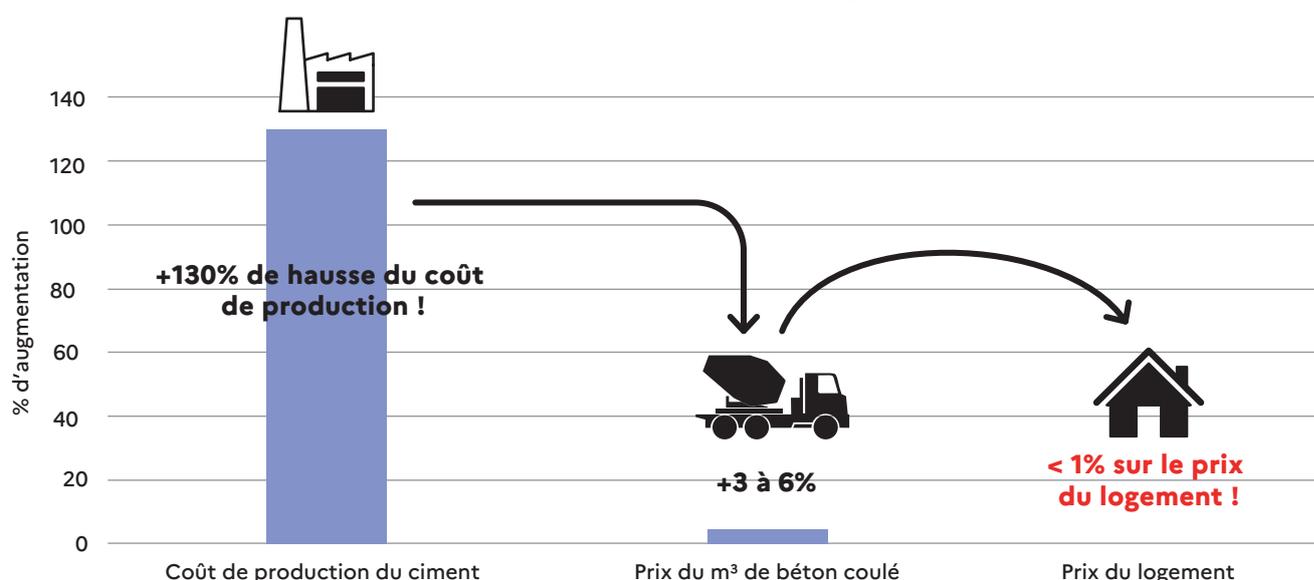
le faible poids du coût du ciment par rapport aux autres postes de coûts dans la production de béton, et *in fine* dans la construction.

Pour mesurer la diffusion de la hausse du coût de production de la tonne de ciment sur la chaîne de valeur, compte tenu de l'importance des potentiels investissements à réaliser, le choix a été fait que l'ensemble de la variation du coût de production soit répercuté sur l'aval, et non le seul coût variable, tel que :

$$\Delta P_{\text{bâti}} = \Delta \text{Coût production}_{\text{cim}} \times CPT \times S_{\text{béton}} \times S_{\text{bâti}}$$

avec  $\Delta P_{\text{bâti}}$  la variation du prix du bâtiment,  $\Delta \text{Coût production}_{\text{cim}}$  la variation du coût de production du ciment tel qu'il est mesuré pour chaque scénario de transition, CPT le cost pass-through de l'industrie cimentière issu d'une étude de la Commission Européenne de 2015<sup>23</sup>,  $S_{\text{béton}}$  la part du coût du ciment dans le prix du béton calculée par l'ADEME sur la base des prix unitaires des autres matières premières, puis de la répartition massique des composants du béton et de la structure de coût pour un m<sup>3</sup> de béton coulé indiquées dans une étude de l'Ifpeb (2020)<sup>24</sup>. Enfin,  $S_{\text{bâti}}$  est la part du coût du béton dans le bâtiment estimée sur la base d'un article de Rootzén et Jonhsson de 2017<sup>25</sup>.

Figure 16. Effet de la hausse du coût de production du ciment sur le prix d'un logement (exemple du scénario de référence)<sup>22</sup>.



<sup>22</sup> Ces estimations ne prennent pas en compte les éventuelles stratégies de prix des acteurs de la filière et de la concurrence des autres matériaux. Elles se basent sur la littérature publique, seules données mises à disposition. Pour certains industriels l'impact sur le prix final d'un logement serait ainsi plus élevé.

<sup>23</sup> Commission Européenne, « Ex-post investigation of cost pass-through in the EU ETS : an analysis for six sectors », 2015. Cost Pass-through : répercussion de l'augmentation du coût de production sur le prix de vente du ciment.

<sup>24</sup> Ifpeb, « Brief filière béton – les messages clés », 2020

<sup>25</sup> Rootzén et Jonhsson, « Managing the costs of CO2 abatement in the cement industry », Climate Policy, vol. 17, p.781-800, 2017

# 6. Méthodologie de modélisation

## 6.1 Modélisation du parc cimentier français ●

Sur la base de la structure du parc cimentier actuel, majoritairement représenté par trois grandes voies de fabrication du clinker, trois usines de références ont été modélisées (Figure 17). Ces usines virtuelles illustrent les trois procédés de fabrication du ciment les plus couramment employés en France : une usine de fabrication en **voie sèche avec précalcinateur**, une usine de fabrication en **voie sèche sans précalcinateur** et une usine de fabrication en **voie semi-sèche**.

La construction des usines de référence s'est faite à partir de l'exploitation des données des cimenteries françaises (source : audits énergétiques et plans de performance énergétique des sites).

Chaque usine de référence est décrite par ses équipements, ses grandes phases de préparation du ciment, ses consommations spécifiques d'énergie (thermique et électrique) et son mix thermique.

Le troisième diagramme en barre de la Figure 17 représente le parc cimentier français tel qu'il a été modélisé en première approximation. À partir des consommations et émissions spécifiques et de la production totale de clinker, les émissions et la consommation totale d'énergie du parc peuvent être déduites : les valeurs ainsi obtenues sont relativement proches des valeurs réelles de 2015, année sur laquelle la modélisation a été faite (Tableau 3), ce qui permet de valider la représentation du parc cimentier français retenue.



→ Photo de EQIOM/Carrière de Bayel

Figure 17. Nombre de cimenteries et émissions liées à la production de clinker par voie de fabrication en 2015

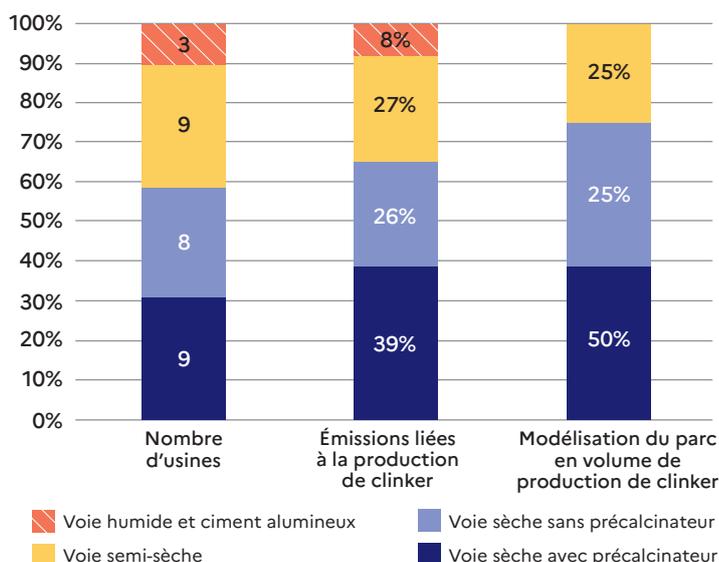


Tableau 3. Comparaison des valeurs réelles et modélisées du parc cimentier français

	Modélisation	Valeurs 2015 <sup>26</sup>	% différence
Production de clinker (Mt)	12,5	12,5	0%
Émissions liées à la production de clinker (MtCO <sub>2e</sub> )	10,2	10,3	1%
Consommation totale d'énergie thermique (GWht)	13 190	13 110	1%
Consommation totale d'électricité (GWhe)	1 960	1 810	8%

<sup>26</sup> Sources : SFIC, données GERE et EU-ETS.

## 6.2 Construction d'une trajectoire de décarbonation ●

Les technologies de décarbonation ont fait l'objet d'une recherche bibliographique approfondie qui a permis de quantifier leurs impacts sur les usines de référence dans la modélisation. L'étape suivante a consisté à élaborer une trajectoire de décarbonation en ligne avec l'esprit du scénario par la formulation d'hypothèses sur le déploiement temporel des leviers technologiques. **La construction détaillée du scénario de référence est présentée dans cette partie à titre d'exemple** mais ce processus a été identique pour les autres scénarios. L'ensemble des hypothèses de modélisation seront fournies dans le rapport complet du PTS ciment.

Ainsi dans le scénario de référence, une hypothèse sur le déploiement temporel de chaque levier de décarbonation a été faite. Ces hypothèses ont été synthétisées dans le Tableau 4. À part pour le CSC où l'hypothèse d'un taux de pénétration maximal de 20% a été faite et pour l'*upgrading* qui est uniquement appliqué aux usines en voie sèche sans précalcinateur et en voie semi-sèche<sup>27</sup>, tous les autres leviers de décarbonation sont appliqués à l'ensemble des émissions du parc cimentier français et ceux-ci seraient intégralement déployés avant 2050.

C'est la raison pour laquelle le scénario de référence peut être qualifié de prolongement technologique de l'appareil de production existant.

Il convient d'apporter quelques considérations générales relatives au choix des leviers de décarbonation et à leurs hypothèses de déploiement temporel, qui sont le fruit de recherches bibliographiques et d'échanges avec les industriels. Les leviers de décarbonation présentés peuvent être considérés comme des actions matures du fait qu'elles sont déjà historiquement pratiquées par la profession ou techniquement envisageables dans les 30 prochaines années, car bénéficiant d'un solide degré de confiance. Les hypothèses associées à leur vitesse de déploiement dans le temps suivent une logique du type «au plus vite, au mieux» avec en particulier un accent mis sur la baisse du taux du clinker et donc sur le développement de nouveaux produits. Dans la perspective d'aligner au mieux l'itinéraire avec les objectifs de réduction des émissions en 2030 comme point de passage (tels que formulés dans la SNBC ou dans la nouvelle feuille de route européenne), tous les leviers considérés comme techniquement matures ou proches de la maturité sont concentrés sur la période 2020-2030.

Tableau 4. Scénario de référence – Déploiement des leviers de décarbonation à l'échelle du parc cimentier français

Levier	Description	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<i>Upgrading</i>	Rénovation des usines en voies sèche avec précalcinateur proche du niveau de performance des MTDs.		50%			100%			
Mix thermique	Taux de substitution moyen de <b>95% dont 45% de biomasse (objectif SFIC)</b> . Hypothèse : taux atteint en 2035.		Taux de substitution moyen ≈ 40%					Taux de substitution moyen ≈ 95%	
Taux de clinker	Baisse du taux de clinker moyen de 78% à <b>66% en 2030 et à 58% en 2050</b> .		Taux de clinker : 78%			Taux de clinker : 66%			Taux de clinker : 58%
Incrémental	Gamme de technologies, «petites» améliorations de l'efficacité énergétique et des émissions spécifiques.		0%	100%					
Scénario CCS	Début en 2035 sur une durée de déploiement de 5 ans, <b>taux de pénétration maximum de 20%</b> .					0%		20%	



→ Photo de VICAT/Brésil-CIPLAN-Cimenterie

Il y a d'abord une différence majeure dans l'itinéraire technologique selon que l'usine fonctionne déjà sur un procédé de type voie sèche avec précalcinateur ou non : il est supposé dans la modélisation que seules les usines en voie sèche sans précalcinateur et en voie semi-sèche subissent une opération de *upgrading* et de conversion en voie sèche avec précalcinateur, qui correspond au standard des Meilleures Techniques Disponibles pour une nouvelle cimenterie. Cette opération d'*upgrading* est, avec le CSC, la plus intensive en capital de tous les leviers de décarbonation et permet un double gain : cette conversion permet un gain en efficacité énergétique de l'ordre de 20% et elle permet d'envisager un taux de substitution et donc une décarbonation du mix thermique plus importante. L'usine en voie sèche avec précalcinateur pouvant déjà intégrer une fraction importante de combustibles de substitution dans le mix thermique et étant déjà relativement efficace par rapport aux Meilleures Techniques Disponibles, elle ne fait pas l'objet d'une rénovation dans l'itinéraire proposé. Tous les autres leviers de décarbonation sont appliqués de la même manière quelle que soit l'usine de référence.

Le passage du taux de clinker moyen de 78 à 66% en 2030 représente un objectif plus ambitieux que celui proposé actuellement par la profession. Cela nécessitera d'accompagner le marché de la construction dans l'adoption de nouveaux produits voire de changer certaines pratiques,

de faire évoluer la réglementation (nationale et européenne) ainsi que le contenu des appels d'offre des marchés publics ou encore de mener des études pour caractériser des gisements d'argiles de qualité suffisante.

**Il n'en reste pas moins que cet objectif est techniquement envisageable et de plus en plus de produits moins carbonés semblent être proches de la commercialisation.**

Un taux de clinker de 66% correspond par ailleurs à l'objectif visé par l'AIE pour l'Europe dans son scénario 2DS (« 2 Degrees Scenario »)<sup>28</sup>. Après 2030, la tendance de baisse se poursuit jusqu'à atteindre 58% en 2050. Le rythme de baisse est malgré tout moins important entre 2030 et 2050, ceci pour tenir compte du fait que, tout comme l'efficacité énergétique, les principaux gains sont plus facilement réalisables au début de la démarche. En ce qui concerne les ciments courants, il semble aujourd'hui techniquement compliqué d'aller bien en-deçà de 50% de clinker dans la formulation sans recourir à de grandes proportions de laitier de haut-fourneau. Le clinker restant l'élément qui confère la propriété d'hydraulicité aux ciments courants, il sera toujours nécessaire dans une certaine quantité de manière à toujours assurer la fonction de « colle ».

<sup>27</sup> Voir l'avis ADEME sur le Captage et Stockage du Carbone en France : <https://www.ademe.fr/avis-lademe-captage-stockage-geologique-co2-csc-france>

<sup>28</sup> IEA (2018), Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry, IEA, Paris

## 6.3 Zoom sur le coût critique du CSC pour la décarbonation d'une usine ●

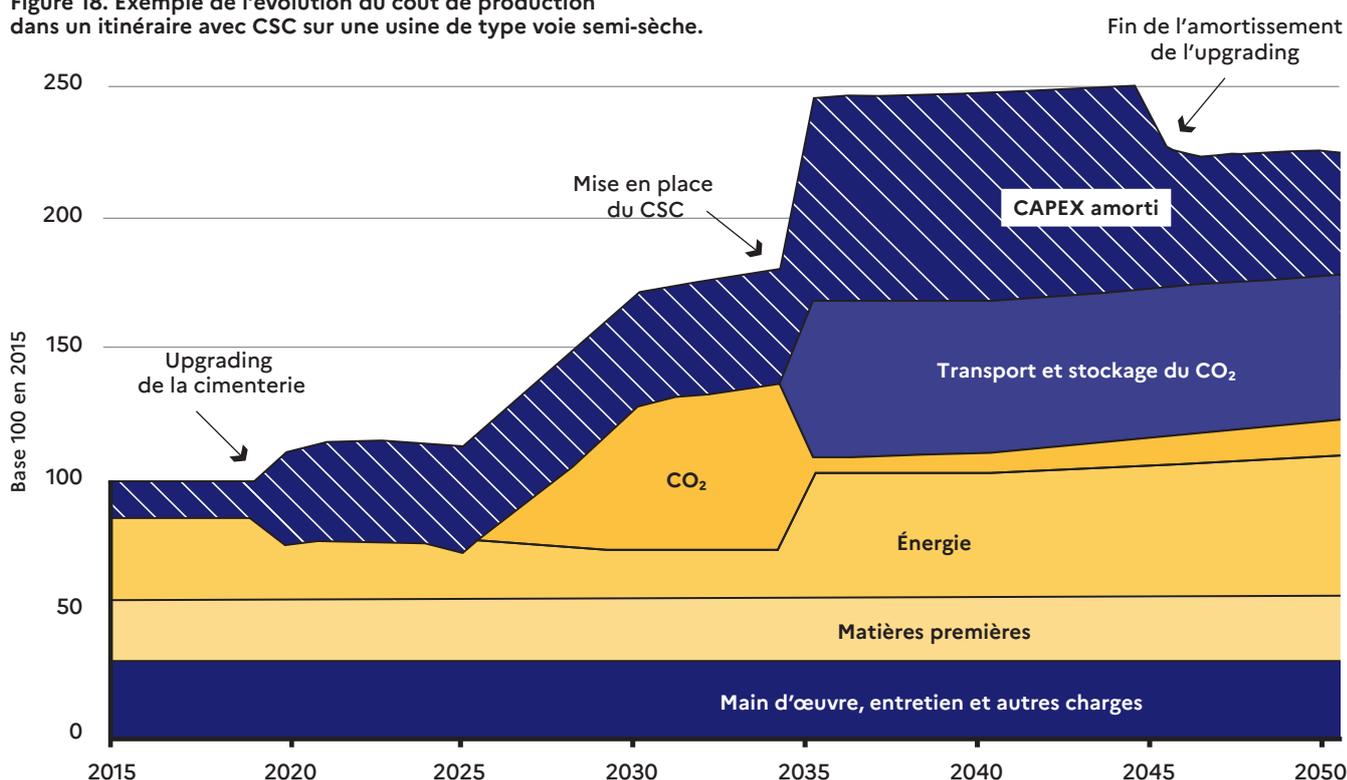
Les résultats présentés dans chacun des scénarios ont été obtenus à partir de la modélisation de trois usines de référence qui représentent les trois voies de fabrication du clinker les plus couramment employées en France (voie sèche avec précalcinateur, voie sèche sans précalcinateur et voie semi-sèche). La décarbonation du parc cimentier correspond ainsi à l'extrapolation et au lissage des résultats obtenus pour chacune de ces usines de référence. Le Tableau 5 résume les principaux résultats obtenus au niveau des usines de référence dans le cas de la mise en place d'une technologie de capture du CO<sub>2</sub> pour un transport et stockage en offshore par bateau pour un hub CSC semblable à celui de Dunkerque.

Le coût d'investissement supplémentaire lié au CSC correspond uniquement à la partie « captage » de la technologie et n'inclut pas l'impact du transport et du stockage du CO<sub>2</sub>. Le surcoût pour la partie captage a été estimé aux alentours de 60 EUR/tCO<sub>2</sub> dans la modélisation. Les coûts liés au transport et stockage du CO<sub>2</sub> ont été modélisés à partir des estimations fournies dans l'avis ADEME sur le CSC pour les régions Hauts-de-France (hub de Dunkerque), Normandie (hub du Havre) et Nouvelle-Aquitaine (stockage onshore par canalisation). Pour les cimenteries connectées au hub CSC de Fos-sur-Mer dans le scénario extrême pari « *techno-push* », le coût du transport et stockage du CO<sub>2</sub> a été pris égal à celui

du hub de Dunkerque, dans l'hypothèse d'un stockage offshore en Méditerranée par bateau. Du point de vue des cimenteries, ce coût est traité comme un poste OPEX, ce qui revient en pratique à supposer que l'industrie paie un service réseau à une entreprise extérieure. Ainsi, même si le transport et le stockage nécessitent des investissements matériels, ils n'apparaissent pas dans la chronique d'investissements de l'industrie cimentière. Les coûts retenus dans la modélisation sont compris entre 50 et 60 EUR/tCO<sub>2</sub> pour le stockage offshore par bateau et de 18 EUR/tCO<sub>2</sub> pour le stockage onshore par canalisation en Nouvelle-Aquitaine<sup>29</sup>.

**Dans le cas du stockage offshore, le captage ne représenterait donc qu'environ la moitié du chemin à parcourir pour une chaîne CSC complète.** Ces estimations restent à prendre avec précaution car elles peuvent dépendre grandement de la distance entre l'émetteur et le puits, du type d'environnement dans lequel les infrastructures de transport se déploient (onshore ou offshore, plat ou montagneux, urbain ou rural...) et du volume annuel d'émissions qui y transite. Par exemple, pour un tuyau d'une certaine capacité, le coût à la tonne de CO<sub>2</sub> sera d'autant plus faible que la quantité transportée annuellement sera grande, d'où l'importance de mutualiser et d'optimiser ces infrastructures entre plusieurs sites émetteurs afin de réaliser des économies d'échelle.

**Figure 18. Exemple de l'évolution du coût de production dans un itinéraire avec CSC sur une usine de type voie semi-sèche.**



**Tableau 5. Principaux résultats obtenus pour chaque usine de référence avec CSC pour un transport et stockage en offshore par bateau.**

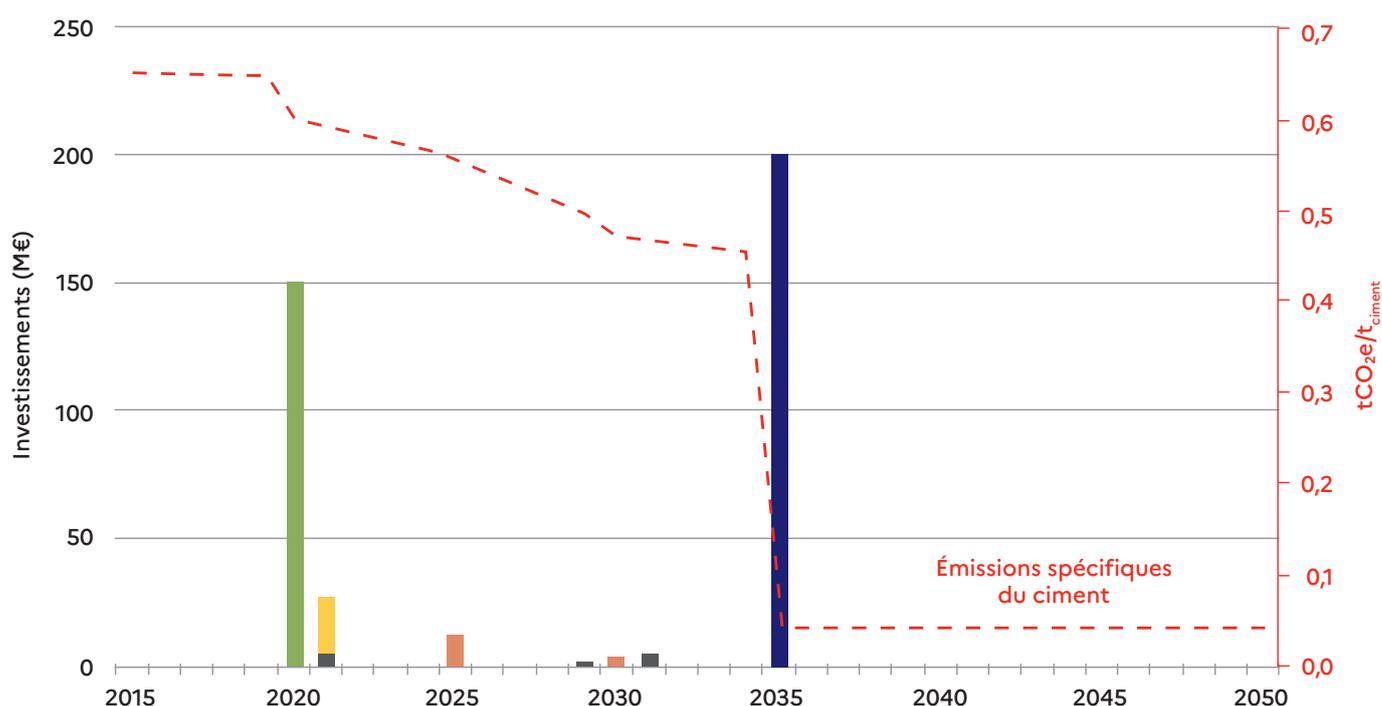
Usine de référence	% de décarbonation entre 2015 et 2050	Investissement total/usine	Dont % <i>upgrading</i>	Dont % CSC	% d'augmentation du coût de production
Voie sèche avec précalcinateur	-94%	≈ 245 M EUR	0%	≈ 80%	≈ +140%
Voie sèche sans précalcinateur	-94%	≈ 405 M EUR	≈ 35%	≈ 50%	≈ +140%
Voie semi-sèche	-94%	≈ 400 M EUR	≈ 35%	≈ 50%	≈ +150%

Les investissements dans la technologie de captage ont été estimés à 200 MEUR pour une cimenterie en croisant différentes sources bibliographiques, ce qui contraste nettement dans la chronique d'investissements de l'usine : lorsque la cimenterie est éligible, le CSC devient la solution la plus gourmande en capitaux devant l'*upgrading* (voir Figure 18 et Figure 19 qui représentent les effets de la trajectoire de décarbonation sur l'usine de référence en voie semi-sèche). À noter que les figures suivantes représentent les investissements et les émissions spécifiques à l'échelle d'une cimenterie qui subit une opération d'*upgrading*. La cimenterie modélisée est « volontariste » : par rapport au Tableau 4, les leviers de décarbonation sont déployés au plus tôt par la cimenterie modélisée (ex. : *upgrading* en 2020, incrémental en 2025, CSC en 2035, etc.) ce qui concentre les investissements sur 2020-2035. Une cimenterie moins volontariste pourrait avoir une chronique d'investissements plus étalée dans le temps (ex. : *upgrading* en 2035, incrémental en 2030,

CSC en 2045) ce qui aurait pour effet de concentrer les investissements sur 2035-2045 et de réduire plus tardivement les émissions, avec toutefois un montant identique pour le total des investissements.

Sur la Figure 18, l'opération d'*upgrading* est visible sur l'évolution du coût de production sous la forme d'un effet « marche d'escalier » en 2020 dans le poste CAPEX amorti. À partir de 2025, un poste CO<sub>2</sub> apparaît correspondant à la disparition des quotas gratuits et à l'augmentation du prix du CO<sub>2</sub> payé par les industriels. Néanmoins ce poste est rapidement étouffé à partir de 2035 avec le déploiement du CSC sur l'usine, permettant de réduire instantanément les émissions de presque 95%. Dès lors, le poste CO<sub>2</sub> est remplacé par des nouveaux coûts induits par le CSC : (1) des nouveaux investissements matériels à amortir, (2) un coût opératoire pour le transport et le stockage du CO<sub>2</sub> et (3) une pénalité énergétique à couvrir dans un contexte où par ailleurs, les prix de l'énergie (électricité et combustibles fossiles) augmentent.

**Figure 19. Emissions spécifiques et investissements avec CSC pour une usine de type voie semi-sèche.**



# Index des tableaux et figures

## TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Résumé des principaux résultats du plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière en France – niveaux de décarbonation et évolution de la demande.....	9
<b>Tableau 2</b> : Résumé des principaux éléments de contexte de chaque scénario.....	25
<b>Tableau 3</b> : Comparaison des valeurs réelles et modélisées du parc cimentier français.....	35
<b>Tableau 4</b> : Scénario de référence – déploiement des leviers de décarbonation à l'échelle du parc cimentier français..	36
<b>Tableau 5</b> : Principaux résultats obtenus pour chaque usine de référence avec CSC pour un transport et stockage en offshore par bateau.....	38

## FIGURES

<b>Figure 1</b> : Les 9 secteurs de l'industrie allant faire l'objet d'un PTS .....	5
<b>Figure 2</b> : Cadrage méthodologique pour la construction des scénarios.....	8
<b>Figure 3</b> : Les incontournables de la décarbonation de l'industrie cimentière.....	12
<b>Figure 4</b> : Procédé de fabrication du ciment.....	15
<b>Figure 5</b> : Principaux leviers de décarbonation de l'industrie cimentière.....	16
<b>Figure 6</b> : Flux de matières de la filière cimentière en 2014 selon les différents usages finaux.....	17
<b>Figure 7</b> : Scénario de référence – dynamique d'abattement des émissions de CO <sub>2</sub> de la filière et courbe de coûts d'abattements associée .....	21
<b>Figure 8</b> : Scénario de référence – chronique d'investissements sur le parc cimentier et évolution des émissions spécifiques avec CSC (hors coût du capital) .....	22
<b>Figure 9</b> : Estimation de l'évolution de l'effectif total de l'industrie cimentière en 2050 sur la base du plan de transition sectoriel (scénario de référence).....	23
<b>Figure 10</b> : Scénario extrême pari « <i>techno-push</i> » – dynamique d'abattement des émissions de CO <sub>2</sub> de la filière et courbe de coûts d'abattements associée .....	27
<b>Figure 11</b> : Scénario extrême pari « <i>techno-push</i> » – chronique d'investissements sur le parc cimentier et évolution des émissions spécifiques (hors coût du capital).....	28
<b>Figure 12</b> : Scénario extrême choc « <i>sobriété low-tech</i> » – dynamique d'abattement des émissions de CO <sub>2</sub> de la filière.....	30
<b>Figure 13</b> : Scénario extrême choc « <i>sobriété low-tech</i> » – chronique d'investissements sur le parc cimentier et évolution des émissions spécifiques (hors coût du capital).....	30
<b>Figure 14</b> : Hypothèses sur les trajectoires des prix du CO <sub>2</sub> et de l'Énergie .....	31
<b>Figure 15</b> : Évolution de la structure de coûts pour la production d'une tonne de ciment entre 2015 et 2050 (indice base 100 en 2015).....	33
<b>Figure 16</b> : Effet de la hausse du coût de production du ciment sur le prix d'un logement (exemple du scénario de référence).....	34
<b>Figure 17</b> : Nombre de cimenteries et émissions liées à la production de clinker par voie de fabrication en 2015 .....	35
<b>Figure 18</b> : Exemple de l'évolution du coût de production dans un itinéraire avec CSC sur une usine de type voie semi-sèche .....	39
<b>Figure 19</b> : Émissions spécifiques et investissements avec CSC pour une usine de type voie semi-sèche .....	39

# Sigles et acronymes

**ADEME** - Agence de la Transition Écologique

**DIB** - Déchets Industriels Banaux

**AIE** - Agence Internationale de l'Énergie

**ECRA** - European Cement Research Academy

**BAU** - Business As Usual

**MTDs** - Meilleures Techniques Disponibles

**BTP** - Bâtiments Travaux Publics

**PTS** - Plan de Transition Sectoriel

**CSC** - Capture et Stockage du Carbone

**SNBC** - Stratégie Nationale Bas Carbone

**CSR** - Combustibles Solides de Récupération

**VRD** - Voiries et Réseaux Divers

## L'ADEME EN BREF

À l'ADEME – l'Agence de la transition écologique – nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

**Sur tous les fronts**, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

**Dans tous les domaines** – énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

**À tous les niveaux**, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

### Les collections de l'ADEME



#### ILS L'ONT FAIT

**L'ADEME catalyseur** : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

**L'ADEME expert** : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



#### FAITS ET CHIFFRES

**L'ADEME référent** : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

**L'ADEME facilitateur** : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



#### HORIZONS

**L'ADEME tournée vers l'avenir** : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

## CIMENT

### Rapport de synthèse

L'industrie cimentière fait face à de forts enjeux technologiques et économiques pour atteindre les objectifs de décarbonation de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) – qui fixe une réduction de -81% des émissions de gaz à effet de serre en 2050 par rapport à 2015 pour l'ensemble de l'industrie française. Le procédé de fabrication du matériau est intensif en énergie et générateur d'émissions de gaz à effet de serre difficilement abattables. Avec la modélisation effectuée et sur la base des technologies identifiées, une réduction de 54% des émissions de gaz à effet de serre est atteignable dans le meilleur des cas. D'autres solutions devront donc émerger si le secteur doit respecter l'objectif de -81% de décarbonation fixé par la SNBC pour l'industrie, surtout pour la période 2030-2050. La décarbonation nécessitera des investissements massifs dans l'outil productif, dans l'innovation et dans les infrastructures sur le territoire. Pour tenir une trajectoire de décarbonation en ligne avec les accords de Paris, la réglementation doit accompagner l'évolution du parc industriel et donner une stratégie à moyen terme pour assurer la viabilité des investissements à plus long terme et amplifier la participation des institutions financières.

**Le projet Finance ClimAct contribue à la mise en oeuvre de la Stratégie Nationale Bas Carbone de la France et du Plan d'action finance durable de l'Union Européenne. Il vise à développer les outils, méthodes et connaissances nouvelles permettant (1) aux épargnants d'intégrer les objectifs environnementaux dans leurs choix de placements, et (2) aux institutions financières et à leurs superviseurs d'intégrer les questions climatiques dans leurs processus de décision et d'aligner les flux financiers sur les objectifs énergie-climat.**

**Le consortium coordonné par l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, comprend également le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, l'Autorité des marchés financiers, l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution, 2° Investing Initiative, Institut de l'Economie pour le Climat, Finance for Tomorrow et GreenFlex.**

Finance ClimAct est un programme inédit d'un budget total de 18 millions d'euros et doté de 10 millions de financement par la Commission Européenne.

**Durée : 2019-2024**



Avec la contribution du programme LIFE de l'Union Européenne. La Commission européenne n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'il contient.

This Work reflects only the views of ADEME. Other members of the Finance ClimAct Consortium are not responsible for any use that may be made of the information it contains.

011544

