

# Investissements pour décarboner l'industrie lourde en France : quoi, combien et quand ?

Etude sur l'acier, le ciment, l'ammoniac et les alcènes et aromatiques

Paris,  
Mai 2023

Auteurs : Solène **Metayer** | Erwann **Kerrand** | Hadrien **Hainaut** | Louise **Kessler**

Soutenu par



---

## REMERCIEMENTS

Le rapport a été préparé avec le soutien de l'ADEME et de la Fondation européenne pour le climat.



Soutenu par



Les auteurs de ce rapport tiennent à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à ce rapport, par leur interview ou leur relecture et en particulier : **Cyrielle Borde, Antoine Deswaziere, Michelle Hougbe, Elliot Mari, Quentin Minier, Sylvain Sourisseau (ADEME) ; Gabriel Jacqmin, Philipp Niessen (ECF) ; Eric Bergé, Maxime Efoui-Hess (The Shift Project) ; Laure Helard, Nicolas Mouchnino (SFIC) ; Muriel Gagnebin, Oliver Sartor, Wido Witecka (AgoraEnergiewende) ; José Noldin (GravitHY) ; Damien Demailly, Vivian Depoues, Maxime Ledez, Thomas Pellerin-Carlin, Lucile Rogissart, Charlotte Vailles (I4CE).**

Les informations et opinions exposées dans ce rapport n'engagent que la responsabilité des auteurs.

---

# RÉSUMÉ EXÉCUTIF

## Industrie : relocalisation et décarbonation au cœur des débats

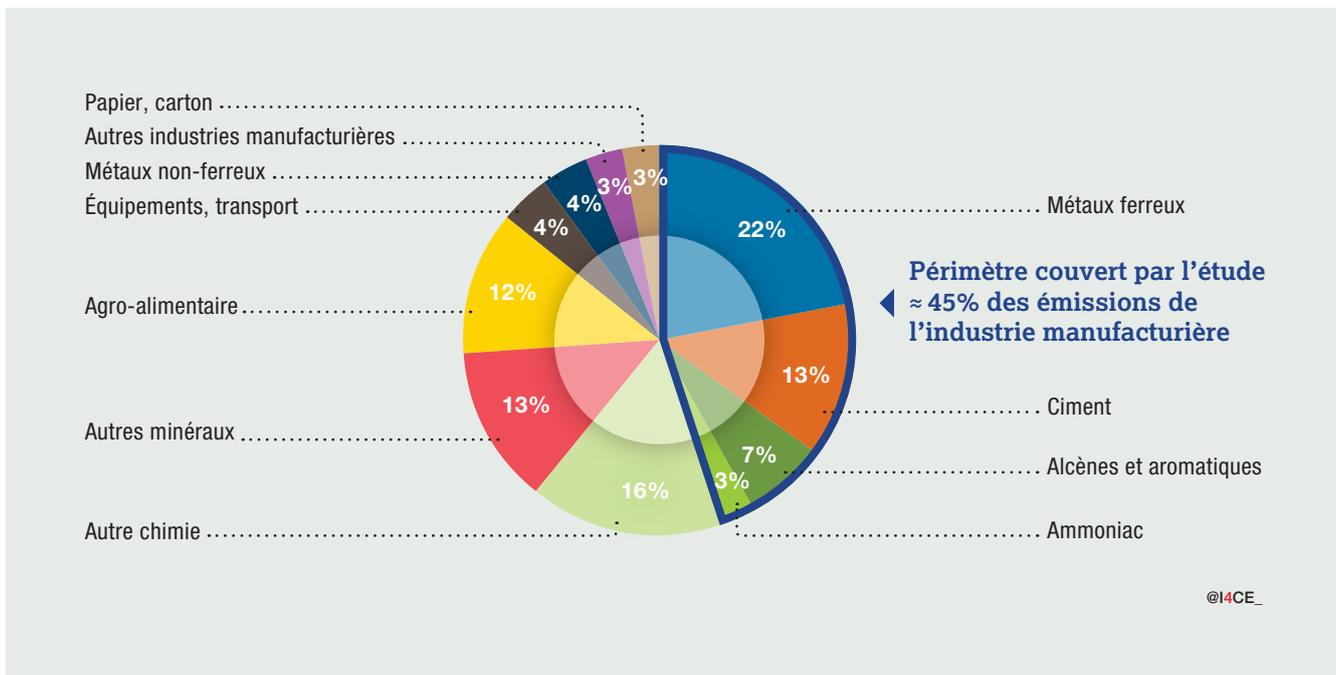
La récente succession de crises (sanitaire, énergétique, géopolitique) et une concurrence internationale accrue ont conduit la France à vouloir renforcer sa souveraineté industrielle et énergétique. Un défi qui s'ajoute à celui de la décarbonation de son industrie. Dans ce contexte, la politique industrielle se développe en France et en Europe avec ces deux objectifs – relocalisation et décarbonation – et avec de nouveaux outils comme le plan France 2030 ou le Net Zero Industry Act au niveau européen. Une politique qui cible à la fois l'industrie « historique », comme l'acier ou le ciment, et l'industrie des nouvelles technologies propres, du solaire aux batteries.

L'industrie est un secteur très émetteur. Elle représente 20 % du total des émissions territoriales de gaz à effet de serre, et devra les réduire de 81 % selon l'objectif de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), pour l'atteinte de la neutralité carbone en 2050. Une part importante des émissions industrielles est concentrée dans l'industrie dite « lourde » : la chimie, la métallurgie et l'industrie des minéraux et matériaux de construction (Figure A). Située en amont de la chaîne de production, l'industrie lourde se caractérise par un nombre réduit de sites de production

et des émissions liées à la fois à l'énergie utilisée et aux procédés de production eux-mêmes. Cette industrie devra se transformer en profondeur, à travers une évolution de la production liée aux mutations des autres activités économiques (exemple : moins de constructions neuves à l'horizon 2050 engendrant moins de besoins en ciment), ou, par le déploiement de nouvelles technologies pour réduire les émissions. La SNBC actuellement en vigueur fixe un cap de décarbonation pour l'industrie mais détaille très peu les technologies et politiques publiques qui seront nécessaires.

Dans cette étude, nous avons voulu estimer les besoins d'investissements à réaliser sur les sites de quatre branches de l'industrie lourde : l'acier, le ciment, les alcènes et aromatiques, et l'ammoniac, qui représentent ensemble environ la moitié des émissions industrielles. Il s'agit d'une information clé : le montant et le rythme de déploiement des investissements permettent notamment d'identifier les besoins de financement et de calibrer les besoins de soutien public aux industriels. Les quelques estimations existantes sont en l'état peu comparables à la fois par les méthodes qu'elles suivent et par les scénarios retenus.

FIGURE A. RÉPARTITION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE DANS L'INDUSTRIE EN FRANCE EN 2019



Source : Calculs des auteurs d'après les données du rapport *Secten éd. 2022* du Citepa et les *mémos des Plans de Transition Sectoriels* de l'ADEME.

## Une méthode pour estimer les besoins d'investissements selon divers scénarios de décarbonation

Afin d'éclairer la question des investissements nécessaires pour décarboner l'industrie, nous avons développé une méthode proposant une première estimation des besoins d'investissements, sur site, pour les quatre branches industrielles retenues. Et selon différents scénarios : nous utilisons quatre scénarios contrastés permettant d'atteindre la neutralité carbone, développés par l'ADEME au sein du projet Transitions(s) 2050.

Les estimations des besoins d'investissements correspondent au cumul des investissements nécessaires pour transformer le parc industriel existant d'ici 2050. Les investissements couvrent à la fois des opérations de

maintien et de décarbonation des équipements existants, et le déploiement de nouvelles technologies sur les sites de production. Nous ne couvrons pas les coûts d'exploitation des équipements. Nos estimations excluent également les mesures liées à l'adaptation au changement climatique, sujet encore peu documenté pour l'industrie.

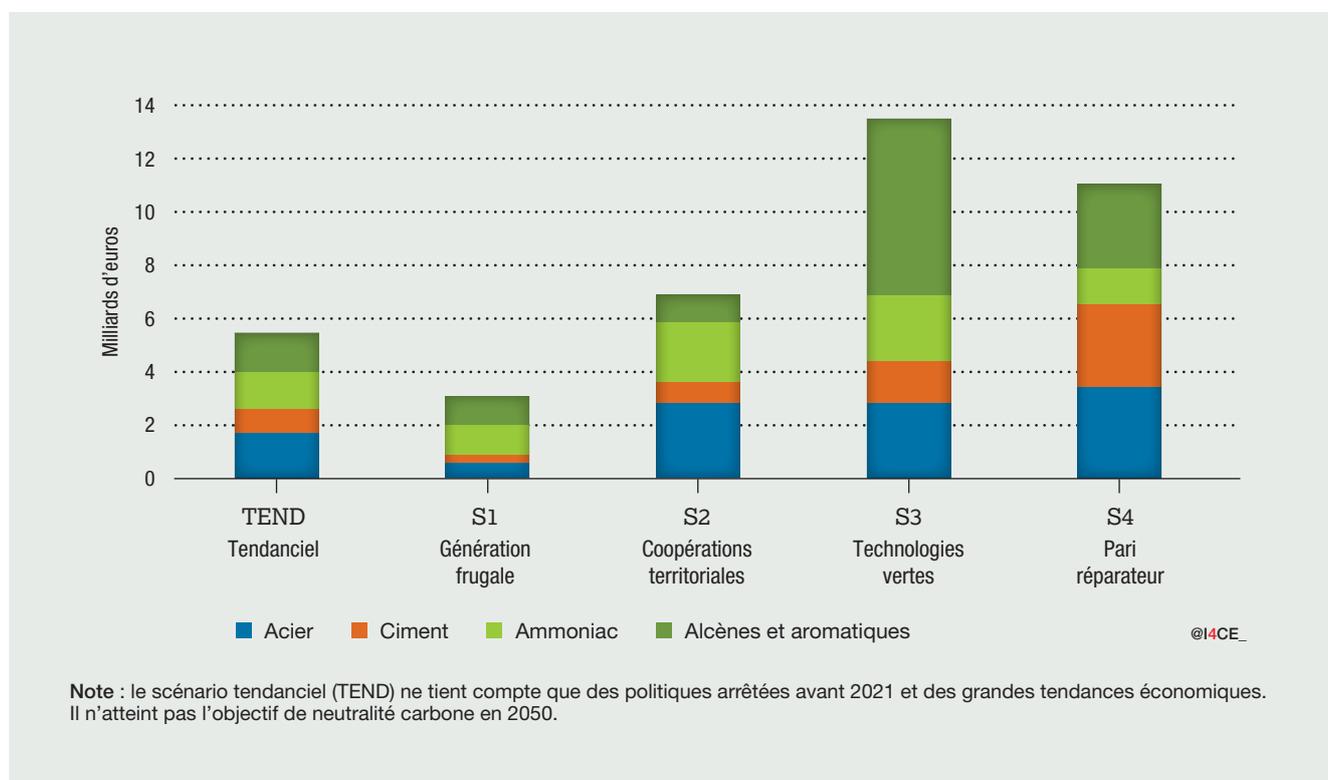
En estimant les besoins d'investissements sur les sites mêmes de production, nous mettons de côté les investissements nécessaires ailleurs pour décarboner l'industrie : les infrastructures de production et transport d'énergie bas-carbone, de transport d'hydrogène ou encore de transport et stockage de CO<sub>2</sub>.

## De 3 à 14 milliards d'euros d'investissements : quelle industrie pour demain ?

Les besoins d'investissements pour décarboner les productions d'acier, de ciment, d'alcènes et aromatiques, et d'ammoniac sont compris entre 3 milliards d'euros pour le

scénario S1 « Génération frugale » de l'ADEME, et 14 milliards d'euros pour le scénario S3 « Technologies vertes ».

**FIGURE B. BESOINS D'INVESTISSEMENTS CUMULÉS À L'HORIZON 2050 DANS QUATRE BRANCHES INDUSTRIELLES**



Le résultat qui frappe d'abord est l'ampleur de l'écart entre les besoins d'investissements selon les différents scénarios. Cet écart reflète essentiellement deux caractéristiques interdépendantes des scénarios de décarbonation : le niveau de production industrielle et les technologies de

production employées. Les scénarios qui prévoient le plus de besoins de matériaux issus de l'industrie (ciment, acier, plastiques...) impliquent d'importants investissements pour remplacer les procédés existants par d'autres moins émetteurs. A l'inverse, les scénarios qui reposent sur des

mutations des autres activités économiques, devenant moins dépendantes de matériaux (par exemple, moins de constructions neuves dans le secteur du bâtiment, ou davantage de recyclage et de réemploi), peuvent conserver des technologies existantes, qui nécessitent moins de nouveaux investissements. Selon le scénario de

décarbonation étudié, les besoins d'investissements sur les sites de production varient ainsi fortement. Il est nécessaire de clarifier la stratégie de décarbonation pour adapter les outils d'accompagnement de la transition et donner plus de visibilité aux investisseurs privés. Nous allons y revenir.

## Des investissements à réaliser rapidement

Après l'écart entre les besoins d'investissements selon les scénarios, ce qui frappe également est une apparente faiblesse des montants estimés : 14 milliards d'euros pour le scénario le plus intensif en investissements d'ici 2050. Il faut bien garder en tête que ces estimations portent sur un peu moins de la moitié des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie et sur des branches dont la production est concentrée sur un nombre réduit de sites. Décarboner l'ensemble de l'industrie demandera donc bien plus d'investissements. De plus, ces besoins d'investissements se limitent aux sites de production, sans chiffrer les investissements nécessaires dans les infrastructures dont ils dépendent (infrastructures de transport de l'hydrogène, de transport et de stockage du CO<sub>2</sub>).

Surtout, bien que l'objectif de neutralité carbone soit pour 2050, les investissements vont devoir être faits dans les prochaines années. Les cibles de décarbonation à l'horizon 2030 et la fin des quotas gratuits au sein du système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne incitent à investir rapidement dans la décarbonation de l'industrie.

Nous avons construit des chroniques de déploiement des investissements qui reflètent ces incitations et intègrent également plusieurs contraintes sectorielles ou technologiques, comme les cycles de renouvellement des équipements et le temps de déploiement de certaines technologies. Selon les scénarios, entre 55 % et 80 % des investissements sont déployés avant 2035.

## Mieux planifier la transition de l'industrie

Pour déployer rapidement les investissements de décarbonation de l'industrie, l'État doit mieux planifier les transformations à réaliser. Les scénarios possibles sont multiples. Cette incertitude est logique, après tout nous ne savons et ne pouvons pas savoir précisément à quoi ressembleront l'économie et les technologies de demain. Mais un tel niveau d'incertitude pose problème. Il pose problème aux acteurs privés : les industries que nous avons étudiées vont-elles devoir investir 3 ou 14 milliards d'euros ? Il pose problème à l'État et plus généralement aux acteurs publics : quelles aides et quelle enveloppe budgétaire allouer à la décarbonation de l'industrie ? L'État et les industriels vont devoir préciser davantage la stratégie de décarbonation de l'industrie, en y incluant le développement des infrastructures nécessaires, et s'assurer qu'elle s'inscrive dans une cohérence d'ensemble au niveau national avec la décarbonation des autres secteurs.

Il est intéressant de noter néanmoins que, au regard des nouveaux outils de politique industrielle récemment déployés par l'État (le plan France 2030, le processus des 50 sites les plus émetteurs) et de plusieurs projets annoncés par les industriels, le scénario qui se dessine semble plutôt être un scénario de type « Technologies vertes », misant sur un quasi-maintien des niveaux de production de l'industrie lourde actuels et le recours à de nouvelles technologies bas-carbone. Un scénario qui se dessine et pour lequel les besoins d'investissements seront importants sur les sites de production mais aussi dans les infrastructures hors sites (électricité bas-carbone, transport d'hydrogène, ainsi que transport et stockage de CO<sub>2</sub>). L'État devra jouer un rôle actif pour coordonner les acteurs privés, éventuellement partager une partie du risque, et clarifier le modèle de financement des infrastructures.

# SOMMAIRE

<b>1. RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE DE L'INDUSTRIE LOURDE : UN ENJEU D'INVESTISSEMENT</b>	<b>5</b>
Pour atteindre l'objectif de neutralité carbone, il faut accélérer la réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie	5
Il n'existe pas aujourd'hui de consensus sur les besoins d'investissements pour transformer en profondeur l'industrie	6
<b>2. ESTIMER LES BESOINS D'INVESTISSEMENTS : UNE MÉTHODE TRANSPARENTE POUR ILLUSTRER LES ENJEUX DE LA TRANSFORMATION PROFONDE DE L'INDUSTRIE</b>	<b>9</b>
Quelle industrie en 2050 ?	9
Périmètre : les investissements liés à des procédés très émetteurs dans quatre branches de l'industrie lourde	10
Modéliser les besoins d'investissements à partir des scénarios de décarbonation	12
<b>3. ACIER, CIMENT, ALCÈNES ET AROMATIQUES, ET AMMONIAC : DES BESOINS D'INVESTISSEMENTS DÉPENDANTS DU SCÉNARIO DE TRANSITION</b>	<b>15</b>
De 3 à 14 milliards d'euros d'investissements d'ici 2050 selon le scénario	15
La décarbonation de la production d'acier	17
La décarbonation de la production de ciment	20
La décarbonation de la production d'alcènes et aromatiques	23
La décarbonation de la production d'ammoniac	26
<b>4. DE L'IDENTIFICATION DES BESOINS D'INVESTISSEMENTS À LEUR MISE EN ŒUVRE</b>	<b>29</b>
Comparaison des annonces des industriels aux besoins d'investissements identifiés : quelle transformation s'amorce ?	29
L'État a récemment mis en place des dispositifs prometteurs pour accompagner la transformation en profondeur de l'industrie lourde	31
Un agenda politique propice à accélérer davantage la transformation de l'industrie	33
<b>CONCLUSION</b>	<b>34</b>
<b>LISTE DES FIGURES ET ENCADRÉS</b>	<b>35</b>

# 1. RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE DE L'INDUSTRIE LOURDE : UN ENJEU D'INVESTISSEMENT

## Pour atteindre l'objectif de neutralité carbone, il faut accélérer la réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie

### Le rythme de réduction des émissions industrielles doit passer de 1 % à 4 % par an d'ici 2030

En France, le secteur industriel réduit ses émissions de gaz à effet de serre (GES) à un rythme insuffisant pour atteindre les objectifs climatiques. De 2015 à 2021, les émissions sont passées de 84 à 78 Mt équivalent CO<sub>2</sub>, soit une baisse annuelle de 1,1 %. Pour atteindre l'objectif de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) actuellement en vigueur, soit un niveau d'émissions de 53 MteqCO<sub>2</sub> en 2030, il faut sur la période 2021-2030 réduire les émissions de 4 % par an. Cet objectif pourrait être prochainement rehaussé avec la transposition du Pacte Vert européen. En effet, la cible européenne pourrait se traduire pour l'industrie par une baisse de 45 % des émissions en 2030 par rapport à 2015 (soit un niveau d'émissions de 46 MteqCO<sub>2</sub>), ce qui correspond à une baisse de 5 % par an entre 2021 et 2030.

### L'atteinte de la neutralité carbone à 2050 nécessite une transformation profonde

Au-delà de la question du rythme de décarbonation, l'objectif français de neutralité carbone à l'horizon 2050 signifie que l'industrie et notamment l'industrie lourde doivent subir une transformation profonde<sup>1</sup>. En France, l'émergence de cette nécessité de transformer l'industrie en profondeur s'observe en comparant les deux éditions de la SNBC. Dans l'édition de 2015, les gains d'efficacité énergétique sont le principal levier, mentionné à la fois pour le court et le moyen terme (2030). En 2020, la stratégie nationale révisée, qui intègre les objectifs de l'accord de Paris, appelle à « une transformation en profondeur de l'industrie, car les transformations incrémentales ne

suffiront pas »<sup>2</sup>. Cette nouvelle stratégie prend acte du fait qu'améliorer à la marge les procédés industriels actuels et émetteurs ne suffira pas : il faut les remplacer par de nouveaux procédés beaucoup moins émetteurs et recourir à des technologies de rupture. Le document insiste en outre sur la nécessité d'anticiper le déploiement de ces solutions en tenant compte de leur délai de mise en œuvre.

Cet enjeu de transformation en profondeur est particulièrement marqué pour l'industrie lourde, qui produit des matériaux bruts utilisés dans le reste de la chaîne de production, et mobilise des procédés très émetteurs. Trois secteurs concentrent ainsi près de trois quarts des émissions de l'industrie manufacturière en France : i) les minéraux non-métalliques et matériaux de construction, et en particulier la production de ciment, ii) la chimie et iii) la métallurgie des métaux ferreux. Contrairement au reste de l'industrie, ces secteurs comptent relativement peu de sites de production, ce qui permet de concentrer les efforts de décarbonation<sup>3</sup>. A titre illustratif, les récentes annonces d'investissements sur deux sites de production d'acier en France devraient permettre à elles-seules de réduire de 9 % les émissions de gaz à effet de serre de l'industrie en France d'ici 2030<sup>4</sup>.

1 Nilsson *et al.* « An Industrial Policy Framework for Transforming Energy and Emissions Intensive Industries towards Zero Emissions ». Climate Policy 21, n°8 (14 septembre 2021).

2 Outre les mesures d'efficacité énergétique, sont mentionnés notamment le recours à des technologies de rupture et des ressources décarbonées, le recours à des technologies de captage, stockage ou réutilisation des gaz à effet de serre émis par les procédés industriels pour compenser les émissions résiduelles et l'intensification en aval, du recyclage, de la réutilisation et la récupération d'énergie.

3 Quatre sites de production pour l'ammoniac, six vapocraqueurs pour les alcènes et aromatiques, trois sites de hauts fourneaux pour la production d'acier primaire, une vingtaine d'aciéries électriques recyclant de la ferraille et près d'une trentaine de sites de production pour le ciment.

4 ArcelorMittal. « 1,7 milliard d'investissements pour accélérer la décarbonation d'ArcelorMittal en France ». 3 février 2022.

## Il n'existe pas aujourd'hui de consensus sur les besoins d'investissements pour transformer en profondeur l'industrie

### Un essor récent des travaux prospectifs sur la décarbonation de l'industrie

L'adoption d'objectifs nationaux de décarbonation ambitieux a été suivie, autour de 2020, par un certain nombre de publications proposant des scénarios de décarbonation de l'industrie. Plusieurs de ces scénarios, comme la SNBC, couvrent l'ensemble des activités économiques, dont l'industrie<sup>5</sup>. Les transformations proposées pour l'industrie sont cohérentes avec les évolutions attendues d'autres secteurs : quelle production d'électricité, quelle concurrence avec d'autres secteurs sur l'usage de ressources, quelle évolution de la demande des produits de l'industrie ? Ces travaux ne proposent pas toujours une approche granulaire de l'industrie<sup>6</sup> mais sont complétés par des publications portant sur des branches industrielles spécifiques<sup>7</sup>. Ces dernières, souvent réalisées en concertation avec les industriels, proposent une description plus précise des leviers technologiques à mobiliser pour chaque branche.

Ces deux types de publications se complètent et proposent des scénarios de plus en plus détaillés. Ils mettent en avant deux paramètres-clés pour une transformation profonde de l'industrie : le niveau de production industrielle et le type de technologies à déployer. Alors que certains scénarios tablent sur un maintien des capacités industrielles existantes, voire une réindustrialisation verte, d'autres tablent sur une baisse du niveau de production pour réduire les émissions de GES de l'industrie. Pour de nombreux secteurs, il existe plusieurs technologies, parfois complémentaires, parfois concurrentes, qui permettent de décarboner les procédés. Le recours à ces différents leviers varie d'un scénario à l'autre, selon des arbitrages portant sur leur maturité, leur coût et leurs implications pour le reste de l'économie.

### Les besoins d'investissements, une composante clé pour la mise en œuvre d'une politique industrielle

L'estimation des besoins d'investissements fournit une information utile à la mise en œuvre d'une politique industrielle. En amont, connaître le montant et le cycle de déploiement des investissements nécessaires permet de calibrer les dispositifs d'accompagnement à déployer. Ces informations, complémentaires de celles sur les coûts de production et la rentabilité des activités, permettent de déployer et calibrer les outils les plus pertinents (subvention, prix du carbone, développement de la demande via les marchés publics, évolution de la fiscalité ou autres formes de réglementation...). *In itinere*, une chronique de besoins

d'investissements constitue un point de repère en proposant des jalons pour le suivi de la transition. Cela permet le cas échéant d'ajuster les dispositifs d'accompagnement.

### La question des investissements associés aux scénarios de décarbonation de l'industrie est encore peu documentée

Seules quelques études (ADEME, Institut Rousseau, Rexecode) proposent une estimation des investissements à déployer pour décarboner l'industrie, et celles-ci suivent des approches différentes sur plusieurs paramètres structurants : les périmètres sectoriels et les leviers pris en compte ne sont pas les mêmes suivant les études, et le chiffrage des investissements porte, selon les cas, sur l'ensemble des investissements, ou sur le surcoût par rapport à un scénario tendanciel.

La faible comparabilité de ces études, et le fait que cette littérature n'est pas encore finalisée à l'échelle de toutes les branches industrielles, ne permettent pas d'en déduire le montant des investissements à déployer pour décarboner l'industrie. Une première revue des travaux existants est présentée ci-dessous.

#### ADEME, 2022 (ciment), 2023 (aluminium) et autres parutions à venir : Plans de transition sectoriels (voir Encadré n°1)

- **Périmètre** : l'ADEME propose dans ses Plans de Transition Sectoriels (PTS) des estimations des besoins d'investissements pour les branches de l'industrie les plus consommatrices d'énergie (ciment, aluminium...) avec un ensemble détaillé de leviers mobilisés selon plusieurs scénarios.
- **Chiffrage** : l'ADEME propose un chiffrage de l'ensemble des coûts des équipements à déployer à l'horizon 2050. Par exemple pour le ciment : 240 millions d'euros pour un scénario « sobriété low-tech » et 8 milliards d'euros pour un scénario « techno-push ».
- **Déploiement des investissements dans le temps** : les PTS de l'ADEME présentent l'approche la plus détaillée concernant le calendrier de déploiement des investissements. Ils proposent une chronique annuelle, qui tient compte notamment de la situation du parc existant, du temps de déploiement et du niveau de maturité des technologies envisagées. La comparaison des deux scénarios présentés dans le PTS Ciment illustre l'importance de la maturité des technologies à déployer sur le calendrier. Le scénario « sobriété low-tech », qui repose

5 Par exemple « Transition(s) 2050 » de l'ADEME, « Futurs énergétiques 2050 » de RTE, dont le scénario central table sur une augmentation de la production industrielle nationale, le scénario « négaWatt 2022 » de l'Association négaWatt, « Plan de transformation de l'économie française » du Shift Project.

6 Par exemple la SNBC détaille peu les objectifs de décarbonation des différentes branches de l'industrie et encore moins les leviers à déployer pour les atteindre.

7 Feuilles de route de décarbonation réalisées sous l'égide du Conseil national de l'industrie, Plans de Transition Sectoriels de l'ADEME, publications spécifiques du Shift Project, ou de la Commission européenne sur l'acier.

sur des technologies existantes, prévoit un déploiement de l'ensemble des investissements avant 2035, tandis que le scénario « techno-push » présente un déploiement plus échelonné dans le temps avec des besoins d'investissements beaucoup plus conséquents.

### Rexecode, 2022 « Les enjeux économiques de la décarbonation de la France – Une évaluation des investissements nécessaires »

- **Périmètre** : l'étude de Rexecode propose un chiffrage des besoins d'investissements pour l'industrie manufacturière dans son ensemble et considère cinq leviers de décarbonation<sup>8</sup> déployés jusqu'à 2050 pour respecter la trajectoire d'émissions de la SNBC.
- **Chiffrage** : l'étude de Rexecode propose une estimation du surplus d'investissement par rapport à un scénario d'investissement tendanciel. Selon cette méthode, le montant des investissements additionnels de l'industrie manufacturière augmente progressivement, de +1,8 milliard d'euros par an en 2023 à +7,9 milliards d'euros par an en 2050. Ce chiffrage équivaut sur l'ensemble de la période 2023-2050 à un surplus d'investissement de l'ordre de 130 milliards d'euros.
- **Déploiement des investissements dans le temps** : l'étude propose une chronique de déploiement annuelle estimée sur la base d'une quantité d'émissions à abattre et qui reflète principalement la trajectoire attendue de réduction des émissions prévue par la SNBC<sup>9</sup>.

### Institut Rousseau, 2022, « 2 % pour 2°C : les investissements publics et privés nécessaires pour atteindre la neutralité carbone de la France en 2050 »

- **Périmètre** : l'Institut Rousseau propose un chiffrage des besoins d'investissements pour l'ensemble de l'industrie, avec une approche centrée sur les industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE)<sup>10</sup>, et considère un ensemble divers de mesures de décarbonation<sup>11</sup>.
- **Chiffrage** : le chiffrage porte sur l'ensemble des coûts des équipements à déployer : la décarbonation de l'industrie manufacturière nécessiterait un cumul de 48 milliards d'euros d'investissement d'ici 2050<sup>12</sup>. L'Institut Rousseau estime que sur ce montant, 26 milliards d'euros d'investissement seraient des investissements additionnels<sup>13</sup>.
- **Déploiement des investissements dans le temps** : l'Institut Rousseau distingue deux périodes pour les investissements liés à la transformation des processus de production, avant et après 2030. La plupart des besoins d'investissements<sup>14</sup> sont attendus au cours de la seconde période.

Notre travail vise à compléter cette littérature sur les besoins d'investissements en documentant de manière transparente comment ils varient selon le scénario de transformation profonde retenue. Nous proposons une approche simplifiée permettant de documenter plusieurs scénarios différents, issus de l'étude prospective de l'ADEME Transition(s) 2050. Elle tient compte de l'évolution du niveau de production et des routes de production<sup>15</sup> à déployer et documente leur calendrier de déploiement d'ici 2050. Ces travaux visent à mieux identifier les enjeux d'investissements pour la transformation profonde de l'industrie afin de faciliter leur déploiement.

8 Substitution d'hydrogène bas-carbone pour les usages actuels d'hydrogène produit à partir d'énergie fossile ; nouveaux usages d'hydrogène ; captage et valorisation du CO<sub>2</sub> ; électrification de la production de chaleur basse température ; biogaz en lieu et place de gaz naturel.

9 Avec pour hypothèse *ad hoc* : investissements déployables immédiatement avec effet immédiat sur l'abattement des émissions.

10 Le chiffrage proposé pour le reste de l'industrie est réalisé en extrapolant les résultats des IGCE et en considérant que les investissements pour le reste de l'industrie seraient strictement proportionnels à leur part dans les émissions totales du secteur.

11 La transformation des processus de production (efficacité énergétique comprise) ; le recyclage et la valorisation thermique des déchets ; la décarbonation des sources d'énergie utilisées par l'industrie, notamment en substituant le gaz fossile et l'hydrogène « gris » actuellement utilisés par des gaz « verts » ; la baisse de la production via un effort de sobriété, de réutilisation et de durabilité des produits.

12 Pour les industries grandes consommatrices d'énergie les investissements sont estimés à un total de 32 milliards d'euros d'investissements dont 18 milliards d'euros d'investissements additionnels.

13 Par rapport à un prolongement des investissements actuels, incluant pour la période 2022-2030 les investissements prévus par le plan France 2030.

14 Les investissements liés à la transformation des processus de production pour les industries grandes consommatrices d'énergie sont estimés à 26,6 milliards d'euros (4,1 milliards d'euros ont lieu avant 2030, et 22,5 milliards d'euros après).

15 Une route de production caractérise l'ensemble des procédés technologiques utilisés pour la production d'un matériau. Un matériau donné peut être produit via plusieurs routes de production différentes.

## ENCADRÉ 1. LES PLANS DE TRANSITION SECTORIELS DE L'ADEME : UN PROJET TENANT COMPTE DES SPÉCIFICITÉS DE CHAQUE FILIÈRE INDUSTRIELLE

Les Plans de Transition Sectoriels de l'ADEME reposent sur un travail d'élaboration d'outils d'accompagnement au dialogue prospectif dans neuf filières industrielles, en concertation avec les acteurs des secteurs (industriels et fédérations). Réalisé sur une durée de 12 à 18 mois, un PTS construit des scénarios de décarbonation visant à atteindre les objectifs énergie-climat de la France à l'horizon 2050, ce qui représente pour l'industrie une baisse de 81% des émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport à 2015.

A la différence de la grande majorité des travaux issus de la littérature nationale, européenne ou internationale qui abordent 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 intitulé Finance ClimAct<sup>16</sup>, ces plans de transition s'appuient sur une analyse croisée du déploiement des technologies de décarbonation et de l'impact de l'évolution du marché en termes de demande. Ils proposent une chronique d'investissements à l'horizon 2050, ainsi qu'une estimation de l'évolution du coût de production lié au déploiement technologique et à l'évolution des prix des énergies et du CO<sub>2</sub>. 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<sup>17</sup>.

Les Plans de Transition Sectoriels du ciment<sup>18</sup> et de l'aluminium<sup>19</sup> ont d'ores et déjà été publiés. Les PTS de l'ammoniac et de l'acier seront finalisés d'ici l'été 2023, tandis que les PTS des cinq autres secteurs seront finalisés d'ici la fin de l'année 2023 (sucre, papier-carton, verre, oléfines et chlore).

<sup>16</sup> Plus d'informations disponibles sur le site dédié : <https://finance-climact.fr/>

<sup>17</sup> L'ensemble des documents associés au projet PTS sont disponibles sur le site : <https://agirpoulatransition.ademe.fr/entreprises/demarche-decarbonation-industrie/actualites/plans-transition-sectoriels-decarboner-lindustrie>

<sup>18</sup> <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/5041-plan-de-transition-sectoriel-de-l-industrie-cimentiere-en-france-9791029718212.html>

<sup>19</sup> <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/6167-plan-de-transition-sectoriel-de-l-industrie-aluminium-en-france-rapport-de-synthese-9791029720840.html>

## 2. ESTIMER LES BESOINS D'INVESTISSEMENTS : UNE MÉTHODE TRANSPARENTE POUR ILLUSTRER LES ENJEUX DE LA TRANSFORMATION PROFONDE DE L'INDUSTRIE

### Quelle industrie en 2050 ?

#### Transition(s) 2050, quatre scénarios qui illustrent les options envisageables pour transformer en profondeur l'industrie

Nous estimons les besoins d'investissements pour mettre en œuvre les scénarios «Transition(s) 2050» de l'ADEME, publiés en 2021, qui explorent quatre chemins contrastés pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Ces travaux, réalisés à l'échelle de l'ensemble des activités économiques, sont présentés par l'ADEME<sup>20</sup> comme des «archétypes de stratégie» pour «réfléchir collectivement aux alternatives possibles, à ce qui semble plus réaliste, plus désirable». Ils ne prétendent pas couvrir «tous les scénarios possibles». Alors que la route à suivre pour transformer en profondeur l'industrie est encore un sujet ouvert (cf. **partie 1**) ces scénarios contrastés présentent l'intérêt d'illustrer différentes options envisageables.

Concernant l'industrie, les scénarios Transition(s) 2050 reposent sur quatre principaux leviers de décarbonation : des changements de procédés, l'utilisation d'énergies bas-carbone (comme l'électricité, l'hydrogène bas-carbone et la biomasse), l'utilisation de technologies de capture du CO<sub>2</sub>, ou une diminution du volume de production, liée à des changements de consommation. Chacun des scénarios comporte sa propre combinaison de leviers : les trois premiers leviers caractérisent les routes de production, tandis que le dernier définit le niveau de production à 2050.

Deux scénarios, S1 «Génération frugale» et S2 «Coopérations territoriales», sont présentés comme privilégiant la qualité au volume de production, avec des produits «plus chers mais durables, écoconçus, réparables, réutilisables et recyclables»<sup>21</sup>. Dans ces scénarios, le volume de production industrielle baisse à l'horizon 2050 de 35 % pour S1 et 20 % pour S2 par rapport à 2015, en raison de choix de sobriété des consommateurs (citoyens, entreprises et collectivités).

Dans ces deux scénarios, le contexte de baisse de la production s'accompagne de modifications limitées des routes de production.

Les deux autres scénarios misent sur un niveau de production proche de l'actuel : la production baisse de 14 % dans le scénario S3 «Technologies vertes» et est stable dans le scénario S4 «Pari réparateur». Dans ce contexte d'un maintien du niveau de production, ces scénarios misent sur des transformations importantes des routes de production.

Ces scénarios contrastent avec un scénario tendanciel (TEND), qui ne tient compte que des politiques arrêtées avant 2021 et des grandes tendances économiques, et qui n'atteint pas l'objectif de neutralité carbone en 2050. Les déclinaisons précises de ces scénarios au sein des branches industrielles étudiées sont détaillées dans la **partie 3**.

#### Des scénarios qui témoignent de la forte intégration de l'industrie avec d'autres activités

Les scénarios Transition(s) 2050 sont construits en intégrant les dépendances de l'industrie aux secteurs en amont et en aval de la chaîne de production. Ils fixent ainsi la production future d'après les besoins de matériaux des principaux secteurs consommateurs (par exemple : transports, Bâtiments et Travaux Publics, emballages, etc.), modulo la part de matériaux importés ou exportés. Ils tiennent également compte des besoins en amont en matières premières, en énergie, mais aussi en infrastructures. Ces scénarios permettent de placer la transformation profonde de l'industrie dans un cadre plus global de décarbonation de l'ensemble des activités économiques en France.

20 ADEME. «Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat». ADEME, novembre 2021.

21 *Op.cit.*

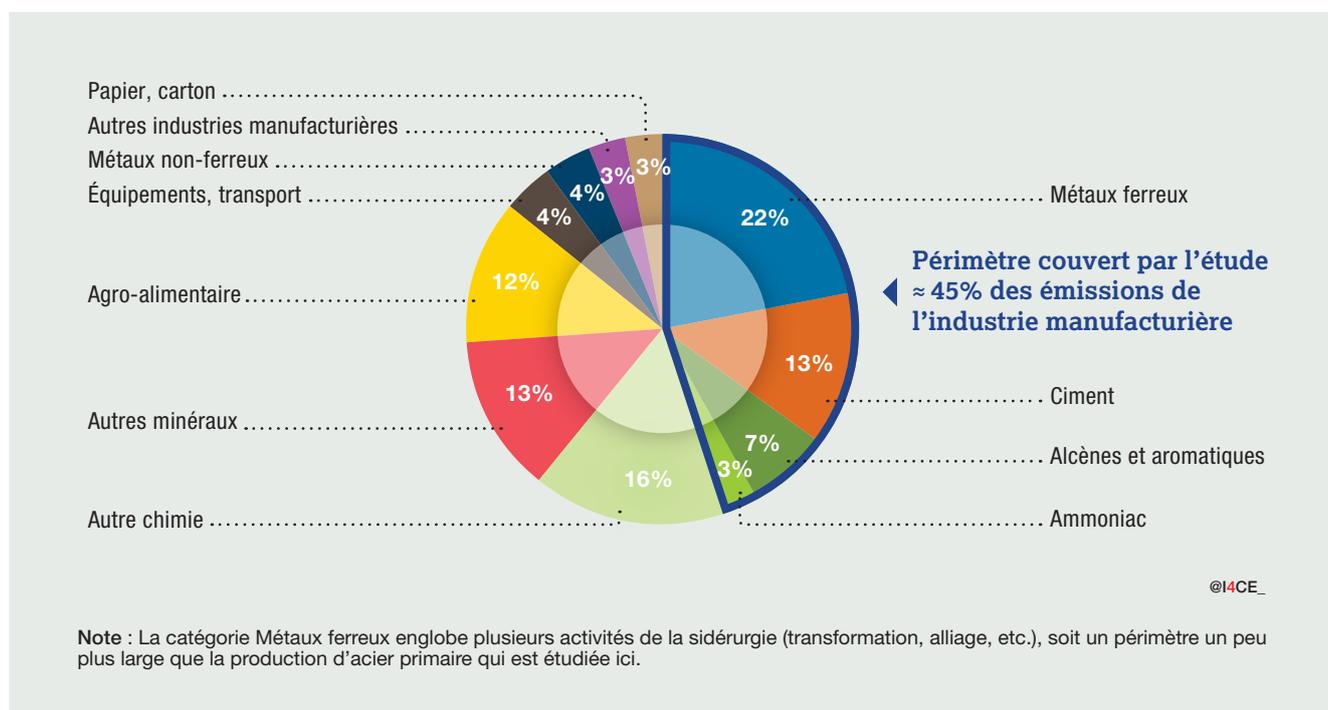
## Périmètre : les investissements liés à des procédés très émetteurs dans quatre branches de l'industrie lourde

### Quatre branches fortement émettrices

Nous proposons dans cette publication une estimation des besoins d'investissements pour décarboner quatre branches de l'industrie lourde parmi les plus émettrices : la production d'acier, de ciment, d'alcènes et aromatiques, et d'ammoniac. Ce périmètre représente environ 45 % des émissions de l'industrie en France métropolitaine. Il s'agit aussi de branches

industrielles pour lesquelles la littérature est suffisamment aboutie, à la fois sur le niveau de précision des scénarios de décarbonation mais aussi en ce qui concerne les coûts des différentes routes de production. Le reste des émissions de GES de l'industrie en France se répartit sur quelques autres industries fortement émettrices, mais surtout sur de nombreuses autres « industries diffuses » (cf. Figure 1).

FIGURE 1. RÉPARTITION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE DANS L'INDUSTRIE EN FRANCE EN 2019



Source : Calculs des auteurs d'après les données du rapport Secten éd. 2022 du Citepa et les mémos des Plans de Transition Sectoriels de l'ADEME.

### Documenter les investissements portés par les industriels

Les chiffres présentés dans cette étude couvrent les investissements dans les équipements de production sur les sites industriels. Cela inclut l'installation d'équipements liés à des activités nouvelles sur les sites de production, comme l'usage d'hydrogène comme agent réducteur pour la production d'acier et comme matière première pour l'ammoniac ou la production de méthanol pour la production des alcènes et aromatiques. Pour cette raison, les investissements liés à la production d'hydrogène par électrolyse ont été intégrés dans le chiffrage des besoins d'investissements, même dans le cas où les scénarios prospectifs prévoient qu'ils soient géographiquement éloignés et connectés par un réseau de distribution.

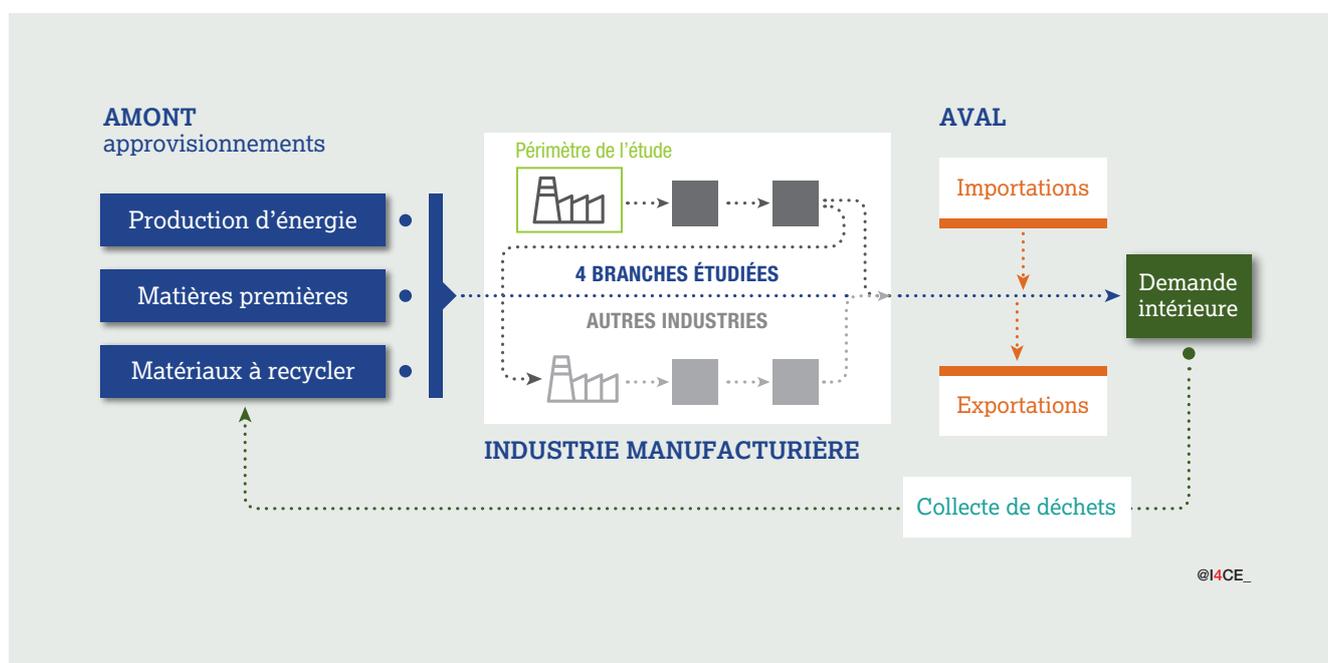
En revanche, le chiffrage présenté ici exclut :

- les équipements liés aux utilités, comme le chauffage des bâtiments et l'éclairage ;
- les investissements en aval des branches industrielles couvertes par l'étude, comme le laminage de l'acier : ces équipements, plus difficiles à identifier et à quantifier, semblent moins critiques en termes d'émissions et d'investissements mais nécessiteraient néanmoins des travaux complémentaires ;
- une série d'investissements qui ne sont aujourd'hui pas portés par l'industrie lourde : des investissements amont qui relèvent de la branche de l'énergie, des investissements en infrastructures (transport et stockage du CO<sub>2</sub> après captage, transport d'hydrogène) et certains investissements en aval comme ceux liés au développement de filières de recyclage, de réemploi et de réparation. Néanmoins, ces investissements sont clés pour la décarbonation de l'industrie lourde, et les enjeux liés à leur déploiement sont documentés dans la partie 4.

## ENCADRÉ N°2. LA QUESTION DE L'ADAPTATION DE L'INDUSTRIE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le chiffrage ne propose pas d'estimation des besoins d'investissements liés à l'adaptation au changement climatique. Ce sujet est encore peu exploré pour l'industrie, mais on peut d'ores et déjà identifier plusieurs types de risques. Une première catégorie de risques est liée à la situation géographique, notamment la localisation portuaire ou fluviale des principaux sites de l'industrie lourde (risques d'inondation, de submersion, de sécheresse). D'autres risques émanent des chaînes de valeur, du fait des nombreux liens en amont et aval de l'industrie avec d'autres secteurs. Dans des travaux complémentaires à Transition(s) 2050<sup>22</sup>, l'ADEME indique que le changement climatique ne remet pas en question les principaux leviers de la transition pour les scénarios S1, S2 et S3 (avec toutefois un point de vigilance sur l'utilisation de l'hydrogène). Le scénario S4 est soumis à des risques plus importants concernant à la fois l'organisation industrielle et économique, et les technologies de décarbonation<sup>23</sup>.

FIGURE 2. PÉRIMÈTRE ÉTUDIÉ



22 ADEME. « Transition(s) 2050. Feuilleton Adaptation au changement climatique », mars 2022.

23 Ce scénario repose notamment sur des échanges très mondialisés qui amplifient les risques sur la chaîne de valeur de l'industrie, qu'ils touchent la production dans les pays exportateurs, le transport des matières premières ou des effets en cascade. Plusieurs risques concernent les leviers technologiques comme le CCS (submersions des installations littorales et mouvements de terrain sur les infrastructures de transport et stockage) ou le vapocraquage de bionaphta (disponibilité de biomasse).

## Modéliser les besoins d'investissements à partir des scénarios de décarbonation

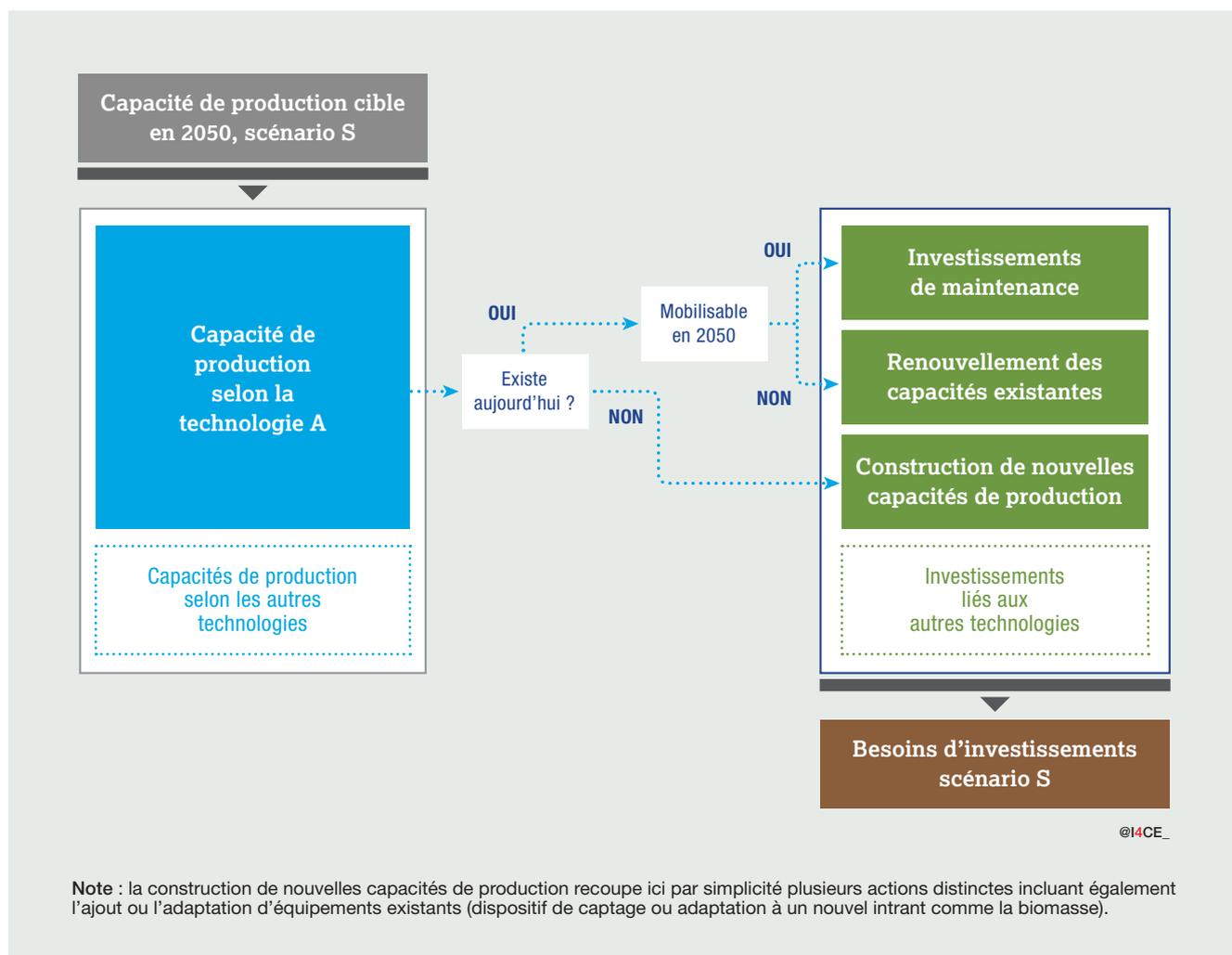
### Quoi ? Identifier les investissements nécessaires pour rendre le parc existant compatible avec celui visé en 2050

L'estimation des besoins d'investissements que nous proposons s'appuie sur deux caractéristiques-clés des scénarios : le niveau de production et les routes de production employées. Pour estimer les besoins d'investissements associés à chaque scénario, nous comparons le parc actuel avec le parc de production futur envisagé : correspond-il aux capacités de production décrites dans chaque scénario, à la fois en termes de niveaux de production et de routes de production ? Si oui, est-ce que ces capacités de production

seront toujours en état de fonctionnement en 2050 ? Sinon, quelles nouvelles capacités déployer ?

Ainsi, notre estimation reflète une diversité d'opérations à effectuer sur les sites de production actuels pour qu'ils correspondent en 2050 aux scénarios proposés (maintenance, renouvellement, développement de nouvelles technologies, cf. Figure 4). La durée de vie des nouvelles technologies de production étant toutefois encore mal connue, nous n'incluons pas dans notre chiffrage les investissements liés à leur maintien ou leur renouvellement. Notre chiffrage rapporte les besoins d'investissements pour réaliser la transition et sous-estime possiblement certains investissements dans des équipements qui nécessiteraient d'être renouvelés avant 2050<sup>24</sup>.

FIGURE 3. IDENTIFICATION DES BESOINS D'INVESTISSEMENTS POUR CHAQUE SCÉNARIO



Note : la construction de nouvelles capacités de production recoupe ici par simplicité plusieurs actions distinctes incluant également l'ajout ou l'adaptation d'équipements existants (dispositif de captage ou adaptation à un nouvel intrant comme la biomasse).

24 C'est notamment le cas des électrolyseurs dont la durée d'exploitation se situerait autour de la dizaine d'année. Voir la note de bas de page n°34 pour une estimation des investissements associés.

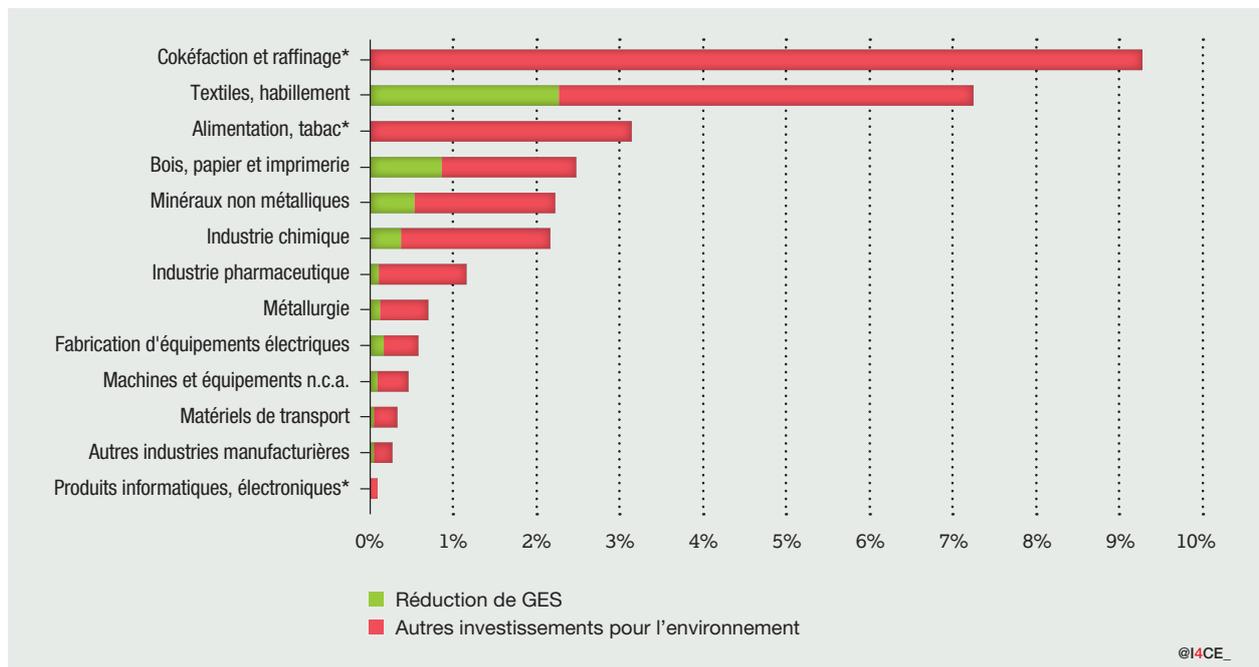
### ENCADRÉ N°3. LES STATISTIQUES DISPONIBLES N'APPORTENT QU'UN ÉCLAIRAGE PARTIEL SUR LES INVESTISSEMENTS DE DÉCARBONATION RÉALISÉS PAR LES INDUSTRIELS

L'INSEE produit plusieurs bases de données qui documentent les investissements dans l'industrie. Ces données dessinent les grandes tendances d'investissements, mais présentent toutefois plusieurs limites méthodologiques qui n'en font pas un indicateur adapté pour quantifier l'ensemble des investissements réalisés pour décarboner l'industrie en France.

Il existe deux principales sources de données :

- l'enquête trimestrielle sur les investissements dans l'industrie manufacturière et extractive<sup>25</sup>, menée auprès des industriels, renseigne les motifs économiques des investissements qu'ils déploient et rapporte notamment une hausse de la part des investissements dont le motif principal est la réalisation d'économies d'énergie : 9 % de l'ensemble des investissements industriels aujourd'hui contre 3 % en 1990. Ces données présentent toutefois plusieurs limites : elles se basent sur des déclarations des entreprises, et ne sont disponibles qu'à l'échelle de l'ensemble du secteur industriel. En outre, les motifs d'investissement sont renseignés au sein d'une liste prédéfinie qui permet mal d'identifier les investissements de décarbonation<sup>26</sup>.
- l'enquête Antipol<sup>27</sup>, agrège les dépenses pour l'environnement, rapportées par les industriels, en distinguant plusieurs activités au sein de l'industrie. Elle propose notamment de mesurer les investissements réalisés pour la « limitation des émissions de gaz à effet de serre ». Les données de cette enquête suggèrent que ces dépenses représentent une part très faible de l'ensemble des investissements industriels (Figure 4). Néanmoins, ces données représentent probablement un minortant des investissements pour le climat : i) elles s'appuient sur les déclarations des entreprises qui peuvent omettre certains investissements ii) leur champ d'observation est restreint (l'enquête ne couvre pas encore les investissements liés à l'efficacité énergétique<sup>28</sup>) et iii) pour une partie des investissements, elles ne mesurent que le surcoût relatif à un actif comparable mais moins performant d'un point de vue environnemental<sup>29</sup>. Ces limites illustrent les difficultés à identifier et quantifier les investissements pour décarboner l'industrie<sup>30</sup>.

**FIGURE 4. PART DES INVESTISSEMENTS POUR L'ENVIRONNEMENT DANS LES INVESTISSEMENTS TOTAUX PAR BRANCHE DE L'INDUSTRIE MANUFACTURIÈRE (%)**



\* Données sur les investissements pour limiter les émissions de GES non disponibles.

Source : Calculs des auteurs d'après les données de l'INSEE : enquête Antipol et comptes nationaux.

25 Lien vers l'enquête : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/serie/s1207>

26 Les motifs présentés dans l'enquête sont les suivants : renouvellement, modernisation, rationalisation, automatisation, nouvelles techniques, économies d'énergie, extension de la capacité de production, introduction de nouveaux produits, autres (sécurité, environnement, condition de travail...).

27 Lien vers l'enquête : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/serie/s1232>

28 Cette catégorie a été ajoutée à partir de l'enquête 2021 dont les résultats ne sont pas encore disponibles.

29 Cette enquête distingue les investissements entièrement dédiés à la protection de l'environnement, ayant un rôle préventif ou curatif, « dits investissements spécifiques », des « investissements intégrés » qui concernent le renouvellement d'un matériel de production, par un équipement plus performant en matière environnementale. Ce dernier type d'investissement n'est pas valorisé à son coût nominal mais seulement à la valeur du surcoût relatif à un actif comparable mais moins performant d'un point de vue environnemental.

30 Ces données peuvent être complétées en utilisant le recensement proposé par d'autres organismes qui suivent les annonces d'investissement pour la décarbonation à travers le monde comme Agora Energiewende, « Global Steel Transformation Tracker »; ou Leadership Group for Industry Transition, « Industry Transition Tracker ».

## Combien ?

### Utiliser les estimations de coûts existantes pour calculer les besoins d'investissements

Le montant des besoins d'investissements à déployer est calculé à partir des données de coûts disponibles dans la littérature. Les données de coûts sont exprimées en euros par tonne produite (€/tonne), autrement dit la valeur monétaire d'un équipement rapportée à sa capacité de production annuelle. Ces coûts peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs. Les coûts de certains équipements de décarbonation varient en fonction de la taille des sites par le biais d'économies d'échelle<sup>31</sup>. Les coûts de construction des équipements de certaines routes de production sont plus faibles sur un site préexistant (*brownfield*) par comparaison avec la même route construite sur un nouveau site (*greenfield*). Enfin, pour la plupart des technologies<sup>32</sup>, en l'absence d'informations robustes, nos estimations s'appuient sur l'hypothèse par défaut que les coûts ne varient pas dans le temps. Les coûts des opérations de maintenance sont également documentés en rassemblant les informations publiques disponibles sur les investissements historiques, et rapportés à l'échelle du parc existant.

## Quand ?

### Apprécier les incitations et contraintes au déploiement des investissements

Les deux étapes précédentes nous permettent d'estimer des besoins d'investissements à l'horizon 2050 mais ne renseignent pas leur répartition dans le temps. Pour éclairer cette question, nous proposons des chroniques d'investissements.

Plusieurs facteurs influencent la distribution temporelle des besoins d'investissements d'ici 2050 :

- **Des facteurs économiques :**
  - la réduction des quotas gratuits dans le cadre du système d'échange de quotas d'émission européen, jusqu'à leur suppression totale en 2034, constitue une incitation économique pour certaines branches industrielles à réaliser des investissements de décarbonation avant cette échéance<sup>33</sup>.
  - la concurrence internationale sur le développement d'une industrie verte (cf. **Partie 4**) encourage les investissements pour décarboner l'industrie.

- **Des facteurs liés aux équipements :**

- certains équipements de production industrielle ont des durées de vie limitées. Ces durées de vie définissent des cycles de renouvellement ou de rénovation des équipements. L'arrivée en fin de vie d'un équipement de production émetteur est l'opportunité de le remplacer par un nouvel équipement de production bas-carbone.
- le niveau de maturité de certaines technologies ne permet pas leur mise en œuvre à l'échelle industrielle à court terme. De plus, certaines technologies présentent un temps de déploiement long entre leur adoption et leur mise en place. Ces contraintes techniques influencent la réalisation des investissements associés.

Nos chroniques tiennent également compte des objectifs intermédiaires de déploiement de certaines technologies à l'horizon 2030 présentes dans Transition(s) 2050.

Les chroniques d'investissements développées tentent de traduire un équilibre entre les influences de ces différents facteurs pour chaque branche industrielle et route de production envisagée. Les données et hypothèses retenues pour le chiffrage ont fait l'objet de discussions avec des experts et représentants de l'industrie. Ces chroniques ne sont pas comparables aux données disponibles aujourd'hui sur les investissements observés dans l'industrie, notamment parce qu'elles sont construites sur un périmètre plus restreint que les branches à partir desquelles les statistiques sont agrégées.

31 Les données retenues pour l'estimation des besoins d'investissements reflètent, selon les branches et les sources disponibles, une moyenne observée sur différents sites ou bien des coûts proches de ceux correspondant à la taille des usines françaises.

32 Les électrolyseurs pour la production d'hydrogène font exception avec une diminution de moitié des coûts attendue à l'horizon 2050.

33 « Le PE adopte cinq textes clés pour atteindre l'objectif climatique de 2030 ». Actualité, Parlement européen, 18 avril 2023.

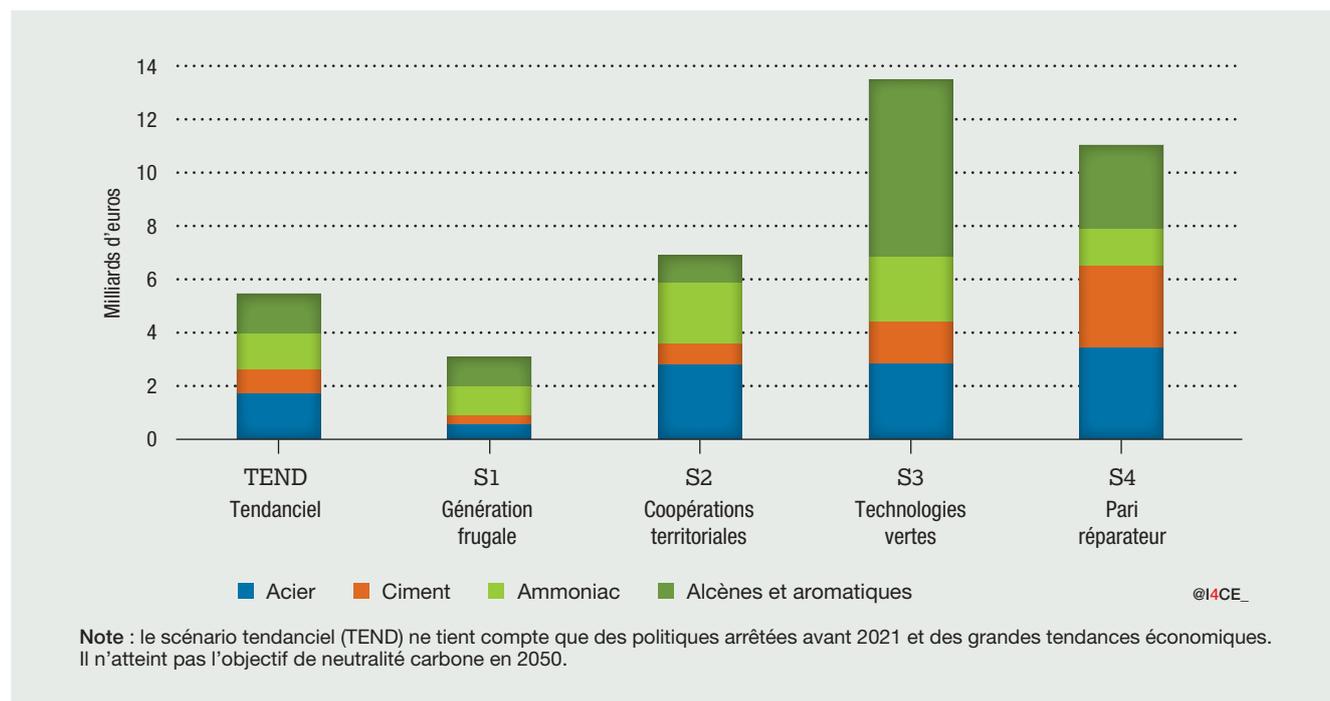
### 3. ACIER, CIMENT, ALCÈNES ET AROMATIQUES, ET AMMONIAC : DES BESOINS D'INVESTISSEMENTS DÉPENDANTS DU SCÉNARIO DE TRANSITION

De 3 à 14 milliards d'euros d'investissements d'ici 2050 selon le scénario

Les besoins d'investissements varient d'un facteur 1 à 4 entre les scénarios

Les besoins d'investissements pour décarboner les productions d'acier, de ciment, d'alcènes et aromatiques, et d'ammoniac sont compris entre 3 milliards d'euros pour le scénario S1 « Génération frugale » et 14 milliards d'euros pour le scénario S3 « Technologies vertes », d'ici 2050 (Figure 5).

FIGURE 5. BESOINS D'INVESTISSEMENTS CUMULÉS À L'HORIZON 2050



Cet écart entre les besoins d'investissements s'explique par des stratégies de décarbonation différentes d'un scénario à l'autre. Les routes de production employées et le niveau de production visé à 2050 sont les deux principales caractéristiques qui influencent les besoins d'investissements associés à chacun des scénarios.

**Le scénario S1 mise sur une forte baisse de la production, en maintenant les procédés actuels émetteurs.** La réduction des émissions se fonde sur une réduction du volume de production. Les besoins d'investissements associés à ce scénario sont faibles, car ils consistent principalement dans des investissements de maintien des équipements de production existants et, dans une moindre

mesure, des investissements dans des leviers technologiques de décarbonation.

**Les scénarios S3 et S4 ciblent un maintien ou une diminution modérée du niveau de production actuel, mais une transformation profonde des procédés vers des modes de production bas-carbone.** La réduction des émissions se fonde principalement sur la décarbonation de la production. Les besoins d'investissements associés à ces scénarios sont plus élevés. Le scénario S4 s'appuie en particulier sur des investissements importants dans les technologies de captage du CO<sub>2</sub>, tandis que le scénario S3 s'appuie entre autres sur la production d'hydrogène bas-carbone.

**Le scénario S2 représente une situation intermédiaire.** Il s'appuie à la fois sur une baisse de la production – bien que plus modérée que le S1 – et sur une transformation de certains procédés de production.

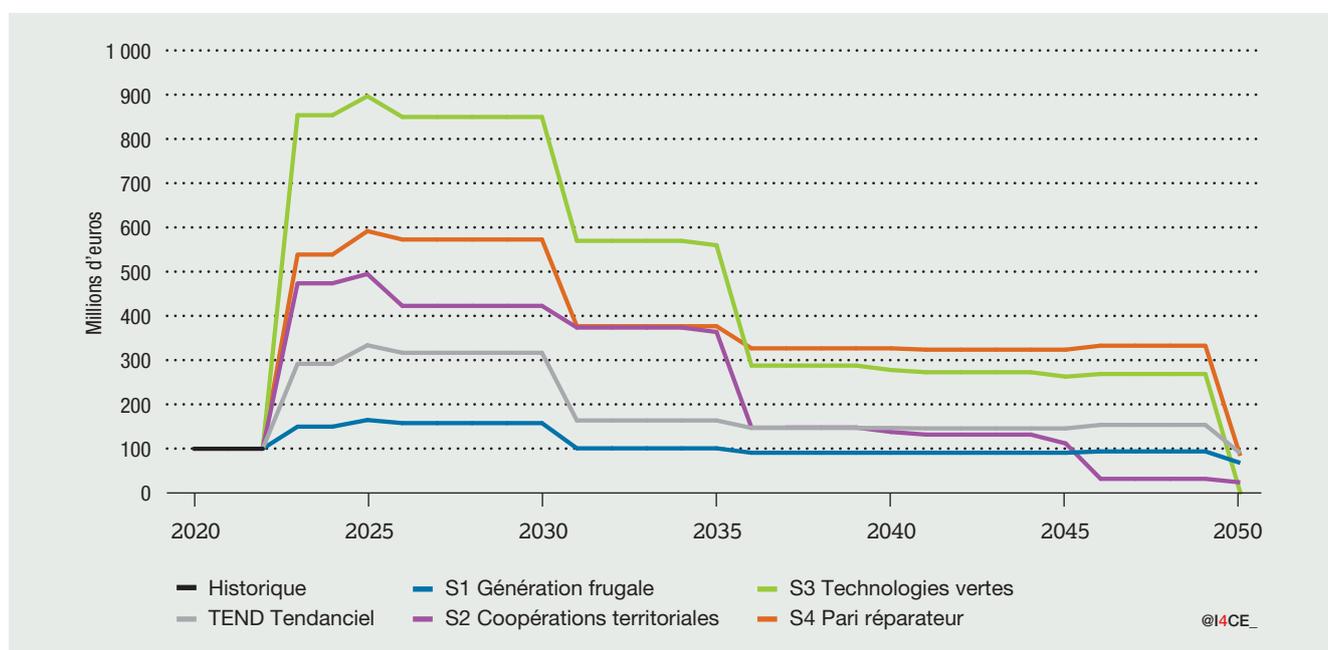
Les besoins d'investissements estimés se limitent au périmètre de l'étude : seules quatre branches de l'industrie sont étudiées, et les investissements concernent uniquement les transformations à mener sur les sites de production, et non l'ensemble des chaînes de production et des infrastructures desquelles ces sites dépendent. Ainsi, la décarbonation de ces quatre branches de l'industrie nécessite également, selon les scénarios, d'autres types d'investissements. Par exemple, les scénarios de décarbonation qui s'appuient sur les technologies de captage du CO<sub>2</sub> requièrent le développement d'infrastructures de transport et de stockage du CO<sub>2</sub> capté. De même, les scénarios ayant recours à de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau requièrent des investissements

dans la production d'électricité bas-carbone, et dans les réseaux d'hydrogène lorsque l'hydrogène n'est pas produit sur site. Enfin, les leviers de décarbonation qui entraînent une augmentation de la consommation d'électricité bas-carbone impliquent des investissements dans le renforcement des réseaux électriques. Tous ces investissements sont en dehors de notre périmètre d'estimation.

### Un pic d'investissements sur la prochaine décennie

Pour construire les chroniques d'investissements de la décarbonation des productions d'acier, de ciment, d'ammoniac et d'alcènes et aromatiques, nous tenons compte des différents facteurs qui influencent la répartition des investissements dans le temps (voir partie 2).

**FIGURE 6. CHRONIQUES D'INVESTISSEMENTS DANS LES QUATRE SECTEURS DE L'INDUSTRIE ÉTUDIÉS**



La forme générale des chroniques d'investissements ne varie pas selon les scénarios (Figure 6). Les investissements sont fortement concentrés avant 2030-2035, puis diminuent et marquent un palier de 2035 à 2050, puis chutent une fois les investissements de décarbonation réalisés.

Cela s'explique en partie par la conjugaison des cycles de renouvellement des équipements, qui offrent des opportunités de transformation des routes de production dans les quinze prochaines années, et de la suppression des quotas d'émission gratuits en 2034, qui incite à réaliser des investissements d'ici là. Ces deux facteurs jouent un rôle important dans la décarbonation de l'acier notamment.

Le déploiement des investissements dépend également du niveau de maturité des technologies. D'une part, les cycles de renouvellement et la suppression des quotas d'émissions

gratuits encouragent un déploiement rapide des technologies déjà matures. D'autre part, les investissements dans les technologies non matures (comme le captage et stockage du CO<sub>2</sub>) s'échelonnent davantage sur la fin de la période, malgré les incitations à investir tôt. Le développement tardif à l'échelle industrielle de ces technologies non matures explique une partie des besoins d'investissements entre 2035 et 2050, le reste des besoins correspondant à des investissements de maintien des équipements existants.

Cette étude présente des besoins d'investissements à l'horizon 2050 pour mettre en œuvre les scénarios de décarbonation de l'ADEME. Après 2050, certains équipements de production devront potentiellement être renouvelés – aussi bien des équipements existants aujourd'hui que des nouveaux équipements de production bas-carbone – ce qui se traduira par un nouveau cycle de réinvestissements<sup>34</sup>.

<sup>34</sup> Certains nouveaux équipements de production bas-carbone, notamment ceux déployés avant 2030 ou 2040, devront potentiellement être renouvelés avant même 2050, en fonction de leur durée de vie. C'est notamment le cas des électrolyseurs, dont la durée d'exploitation est aujourd'hui estimée autour de la dizaine d'années. Ces besoins d'investissements ne sont pas inclus dans les estimations ci-dessus ni dans les chroniques. Concernant les électrolyseurs, les investissements supplémentaires seraient compris entre 0,2 et 1 milliard d'euros selon différentes hypothèses de diminution du coût et de durée d'exploitation des électrolyseurs d'ici 2050 – chiffres cumulés pour l'ensemble des secteurs concernés (acier, ammoniac, alcènes et aromatiques) et qui s'ajoutent aux besoins des deux scénarios ayant recours à de l'hydrogène bas-carbone (S2 et S3).

## La décarbonation de la production d'acier

### Acier : quatre routes possibles pour une production légèrement en baisse

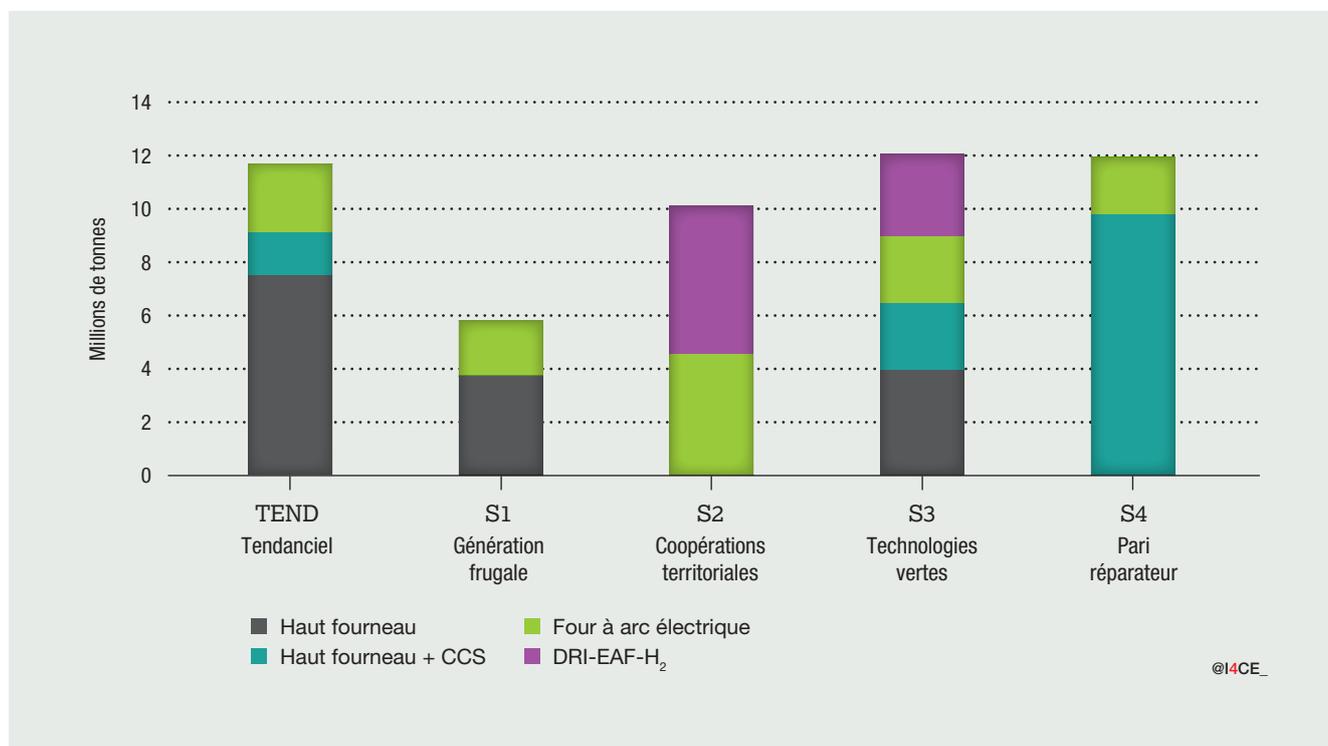
Les scénarios Transition(s) 2050 reposent sur quatre routes de production de l'acier, dont deux nouvelles routes décarbonées :

- **Haut fourneau** : il s'agit de la filière primaire actuelle, le minerai de fer est réduit dans les hauts fourneaux en présence de coke ;
- **Haut fourneau et captage et stockage du CO<sub>2</sub> (CCS)** : la filière haut fourneau actuelle à laquelle est ajoutée une unité de captage du CO<sub>2</sub>, en vue de son transport et stockage offshore ;
- **Four à arc électrique (EAF)** : la filière secondaire actuelle, la ferraille est récupérée et fondue dans les fours à arc électriques ;
- **Réduction directe et four à arc électrique (DRI-EAF-H<sub>2</sub><sup>35</sup>)** : il s'agit d'une nouvelle filière de production, dans laquelle le minerai de fer est réduit avec de l'hydrogène bas-carbone, puis fondu dans un four à arc électrique (le minerai de fer peut également être dans un premier temps réduit avec du gaz naturel, mais l'utilisation d'hydrogène bas-carbone permet de réduire significativement les émissions de la filière).

Tous les scénarios reposent, dans des proportions différentes, sur la filière secondaire des fours à arc électriques, et en particulier le scénario S2 qui est un scénario de "coopérations territoriales" résolument tourné sur l'incorporation de matières premières issues du recyclage et la structuration des filières de réemploi, réutilisation et recyclage. La nouvelle filière DRI-EAF-H<sub>2</sub> est développée dans les scénarios S2 et S3, tandis que la technologie de captage du CO<sub>2</sub> est utilisée dans les scénarios TEND, S3 et très fortement développée dans S4. Aucune des deux nouvelles routes décarbonées n'est développée dans le scénario S1, qui s'appuie uniquement sur la diminution du niveau de production et l'incorporation de ferraille (recyclage) pour réduire les émissions du secteur.

L'ensemble des scénarios prévoit une baisse du niveau de production, en lien avec la diminution du rythme de construction neuve dans le secteur du bâtiment, mais cette tendance est plus marquée pour le S1 : 5,8 Mt en 2050, par comparaison à la production actuelle d'environ 15,0 Mt par an. Dans les scénarios S2, S3 et S4, la production d'acier diminue de manière plus modérée : elle atteint 10,1 Mt dans S2 et 12,0 Mt dans S3 et S4 (Figure 7).

FIGURE 7. NIVEAUX ET ROUTES DE PRODUCTION DE L'ACIER EN 2050 DANS LES SCÉNARIOS TRANSITION(S) 2050



35 Pour Direct Reduced Iron - Electric Arc Furnace.

### Acier : des besoins d'investissements estimés entre 0,6 et 3,4 milliards d'euros

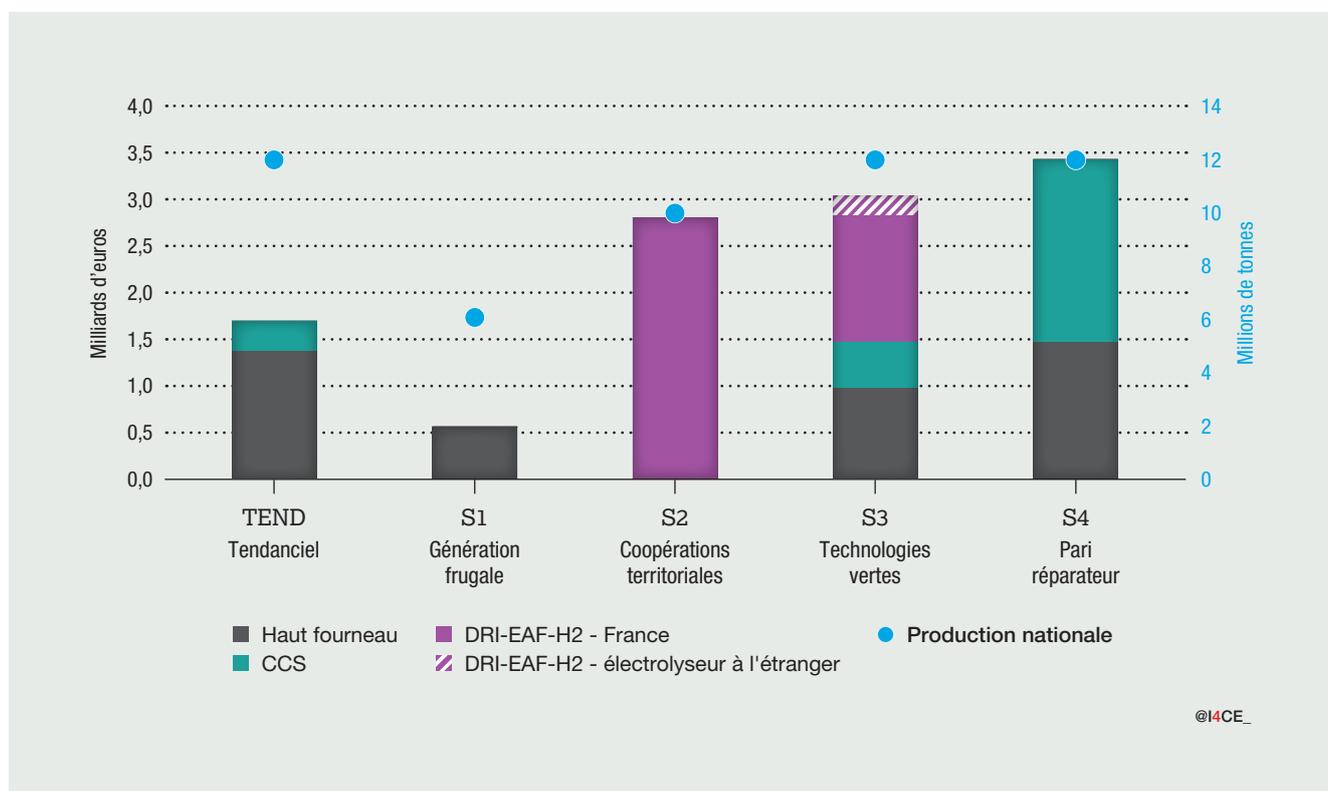
La décarbonation de la production d'acier à l'horizon 2050 requiert des investissements dans :

- le renouvellement d'une partie des capacités de production de hauts fourneaux, et
- le déploiement d'équipements liés aux nouvelles routes de production (unités de captage du CO<sub>2</sub> et équipements de la filière DRI-EAF-H<sub>2</sub>, y compris des électrolyseurs pour la production d'hydrogène sur site).

En l'absence de données disponibles sur les besoins de maintenance ou de renouvellement des fours à arc électriques, nous n'identifions pas de besoins d'investissements dans ces équipements – excepté la construction de nouveaux EAF pour la filière DRI-EAF-H<sub>2</sub>.

Les besoins d'investissements pour décarboner la production d'acier varient sensiblement entre les différents scénarios de l'ADEME : 0,6 milliard d'euros dans S1 à 3,4 milliards d'euros dans S4 (Figure 8). Cet écart reflète non seulement les différences de capacité de production à l'horizon 2050, mais également les différences de coûts entre les routes de production déployées. Le scénario S2 requiert des besoins d'investissements uniquement dans le déploiement de la route DRI-EAF-H<sub>2</sub> à hauteur de 2,8 milliards d'euros. Dans le scénario S3, une partie de l'hydrogène utilisé par la filière DRI-EAF-H<sub>2</sub> est importée de l'étranger, ce qui abaisse les besoins d'investissements sur le territoire national à 2,8 milliards d'euros, contre 3,0 milliards d'euros si tout l'hydrogène était produit en France.

FIGURE 8. BESOINS D'INVESTISSEMENTS ET NIVEAU DE PRODUCTION D'ACIER À L'HORIZON 2050



Les besoins d'investissements dans la route de production DRI-EAF-H<sub>2</sub> incluent l'installation des capacités d'électrolyse. Toutefois, dans le scénario S3, l'hydrogène est principalement acheminé par réseaux jusqu'aux sites industriels plutôt que directement par les industriels. Par simplicité, nous ne différencions pas les investissements dans les capacités d'électrolyse en France selon qu'elles soient situées sur les sites industriels ou non.

Ces besoins d'investissements n'incluent pas ceux dans la fourniture d'électricité bas-carbone pour la production d'hydrogène, le renforcement des réseaux électriques, les réseaux d'hydrogène et dans le transport et stockage du CO<sub>2</sub>.

## Acier : des besoins d'investissements concentrés entre aujourd'hui et 2035

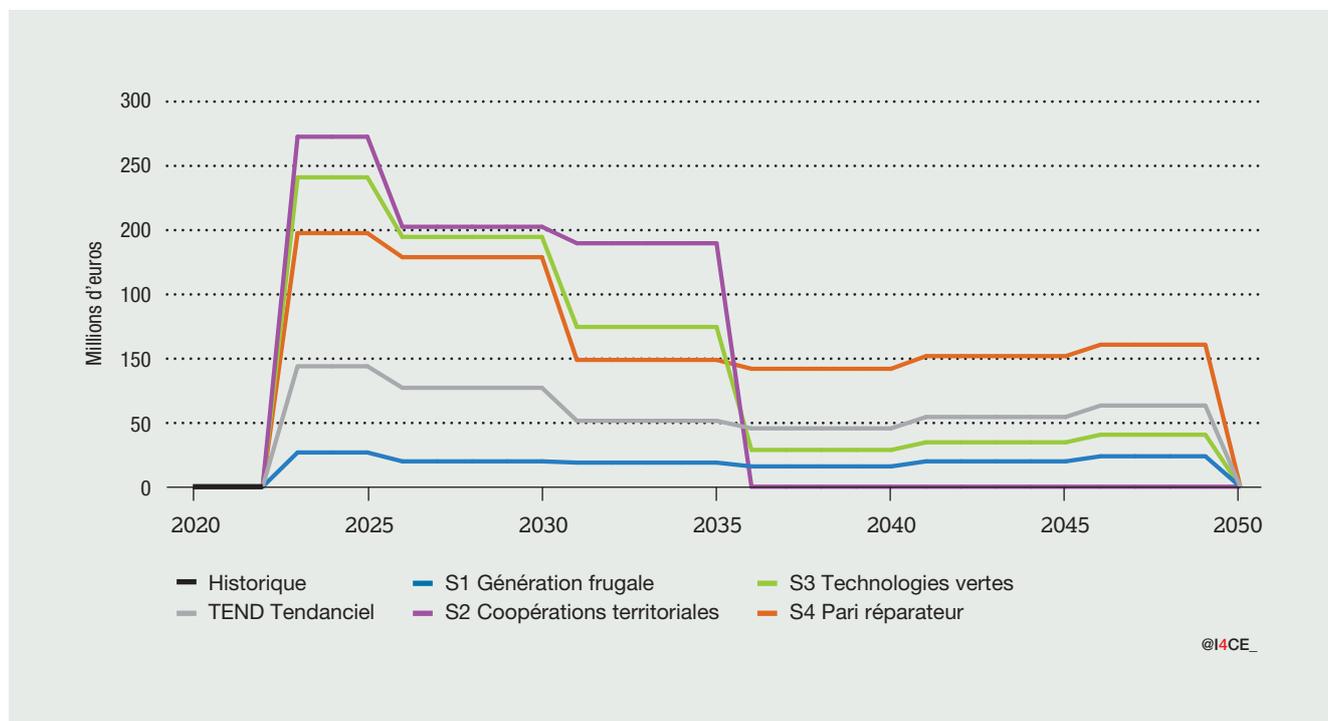
Deux contraintes temporelles majeures influencent la distribution dans le temps des investissements à réaliser dans la décarbonation de l'acier. D'une part, les hauts fourneaux possèdent une durée de vie comprise entre 15 et 20 ans, au terme de laquelle les équipements doivent être renouvelés. Ces réfections définissent des cycles de renouvellement réguliers des hauts fourneaux. Les derniers renouvellements ayant eu lieu entre 2006 et 2015, l'ensemble des hauts fourneaux doit connaître des réinvestissements entre 2021 et 2035 au plus tard<sup>36</sup>, puis entre 2035 et 2050 pour les capacités de hauts fourneaux maintenues. Ces périodes de renouvellement des équipements offrent des opportunités pour mener des investissements de décarbonation : que ce soit l'ajout d'unités de captage du CO<sub>2</sub>, ou bien la conversion des sites vers la route de production DRI-EAF-H<sub>2</sub>. D'autre part, la

chronique tient compte des incitations liées à la suppression en 2034 des quotas gratuits d'émission dans le cadre du système d'échange de quotas d'émission européen.

Nous construisons les chroniques d'investissements<sup>37</sup> dans la décarbonation de la production d'acier à partir de ces deux contraintes (Figure 9) :

- les hauts-fourneaux maintenus dans les scénarios sont renouvelés une fois d'ici 2035 puis une seconde fois d'ici 2050 ;
- les capacités de production DRI-EAF-H<sub>2</sub> sont déployées au cours du premier renouvellement des hauts fourneaux, c'est-à-dire d'ici 2035 ;
- les unités de captage du CO<sub>2</sub> sont développées pour partie avant 2030, puis entre 2030 et 2050, d'après les cibles de CO<sub>2</sub> capté dans les scénarios Transition(s) 2050.

FIGURE 9. CHRONIQUES D'INVESTISSEMENTS DANS LA PRODUCTION D'ACIER



<sup>36</sup> Agora Energiewende. « Global Steel Transformation Tracker ». <https://www.agora-energiewende.de/en/service/global-steel-transformation-tracker/>

<sup>37</sup> En complément de ces chroniques d'investissement, associées aux scénarios du projet Transition(s) 2050, l'ADEME publiera d'ici l'été 2023 un Plan de Transition Sectoriel centré sur la décarbonation de la production française d'acier, avec des chroniques détaillées.

## La décarbonation de la production de ciment

### Ciment : des scénarios de décarbonation qui diffèrent principalement par leurs niveaux de production

Les émissions de gaz à effet de serre issues de la production du ciment correspondent pour deux tiers à des émissions de procédés, issues de la production de clinker, et pour un tiers à des émissions de combustion, issues de la consommation d'énergie. La décarbonation de la branche industrielle du ciment dans les scénarios Transition(s) 2050 repose à la fois sur le déploiement de leviers de décarbonation des procédés et sur une baisse de la production.

Deux principaux leviers permettent de réduire les émissions de procédé : diminuer le taux de clinker dans le ciment ou capter les émissions de CO<sub>2</sub> émises. Le recours au captage des émissions de CO<sub>2</sub> est envisagé dans l'ensemble des scénarios à l'exception du S1. Cette solution n'est toutefois déployée à grande échelle (pour environ la moitié de la production) que dans le S4.

De plus, l'ensemble des scénarios fait appel à trois leviers de réduction des émissions de combustion : l'usage de combustibles moins carbonés tels que les combustibles solides de récupération, la rénovation des usines vers la voie sèche avec précalcinateur proche du meilleur niveau de performance (*upgrading*, qui est une action préalable à l'intégration de combustibles alternatifs) et la mise en place de technologies incrémentales (autres améliorations ponctuelles de l'efficacité énergétique et de réductions d'émissions).

Le recours à chacun de ces leviers de décarbonation varie selon les scénarios, en cohérence avec les niveaux de production. La production de ciment en 2050 diminue de 30% à 70% dans l'ensemble des scénarios en lien essentiellement avec la diminution du rythme de

construction neuve dans le secteur du bâtiment. Les scénarios S1 et S2 prévoient les niveaux de production les plus faibles, de respectivement 4,3 Mt et 5,4 Mt, contre une production actuelle de 16,5 Mt. Ces deux scénarios misent sur une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> à travers une baisse du volume de production et s'appuient dans une moindre mesure sur les différents leviers de décarbonation. Comparativement, la contraction de la production de ciment est plus modérée dans les scénarios S3 et S4, à hauteur respectivement de 11,0 Mt et 11,5 Mt : ces scénarios ont recours de manière plus importante aux technologies de décarbonation pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

### Ciment : des besoins d'investissements estimés entre 0,3 et 3,1 milliards d'euros

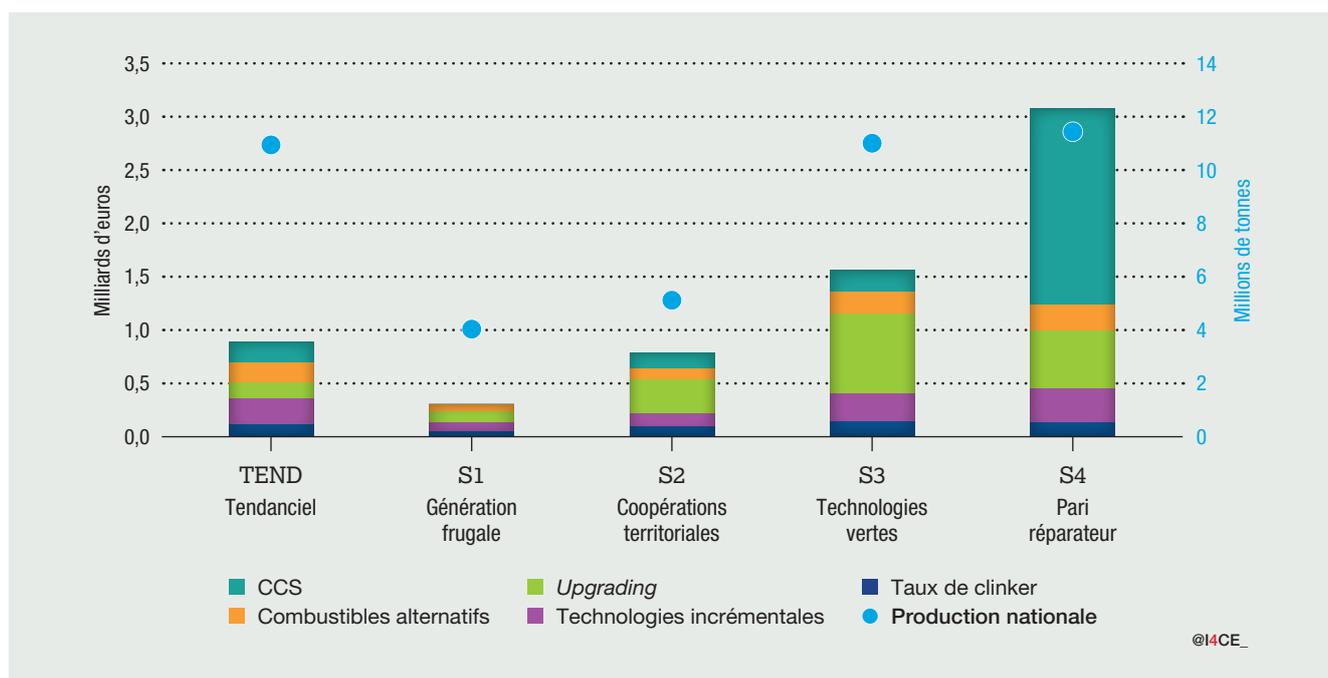
Les besoins d'investissements dans la décarbonation de la production de ciment varient principalement selon le niveau de capacité de production en 2050 et les leviers utilisés dans les différents scénarios (Figure 10).

Le scénario S1, qui prévoit la plus forte baisse de production de ciment, nécessite des besoins d'investissements limités, de l'ordre de 300 millions d'euros à l'horizon 2050.

Les scénarios S2 et S3 requièrent des investissements à hauteur de 780 millions d'euros et 1,6 milliard d'euros respectivement, tirés notamment par les actions d'*upgrading*, préalable à l'intégration de combustibles alternatifs.

Le scénario S4 présente des besoins d'investissements largement supérieurs aux autres scénarios, de l'ordre de 3,1 milliards d'euros, tirés en grande partie par des investissements dans des unités de captage du CO<sub>2</sub>.

FIGURE 10. BESOINS D'INVESTISSEMENTS ET NIVEAU DE PRODUCTION DE CIMENT À L'HORIZON 2050



Ces besoins d'investissements n'incluent pas les investissements dans le transport et stockage de CO<sub>2</sub>.

### Ciment : une chronique d'investissement marquée par un pic au cours des cinq prochaines années

La maturité des technologies à mobiliser, conjuguée à la suppression en 2034 des quotas gratuits d'émission dans le cadre du système d'échange de quotas d'émission européen, constitue le principal facteur qui structure le calendrier de déploiement des investissements dans la décarbonation du ciment (Figure 11). Les technologies matures dès aujourd'hui sont déployées au cours de la prochaine décennie, en phase avec le calendrier de déploiement des technologies dans le Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière (voir encadré n°2) :

- la baisse du taux de clinker est mise en œuvre principalement avant 2030 ;

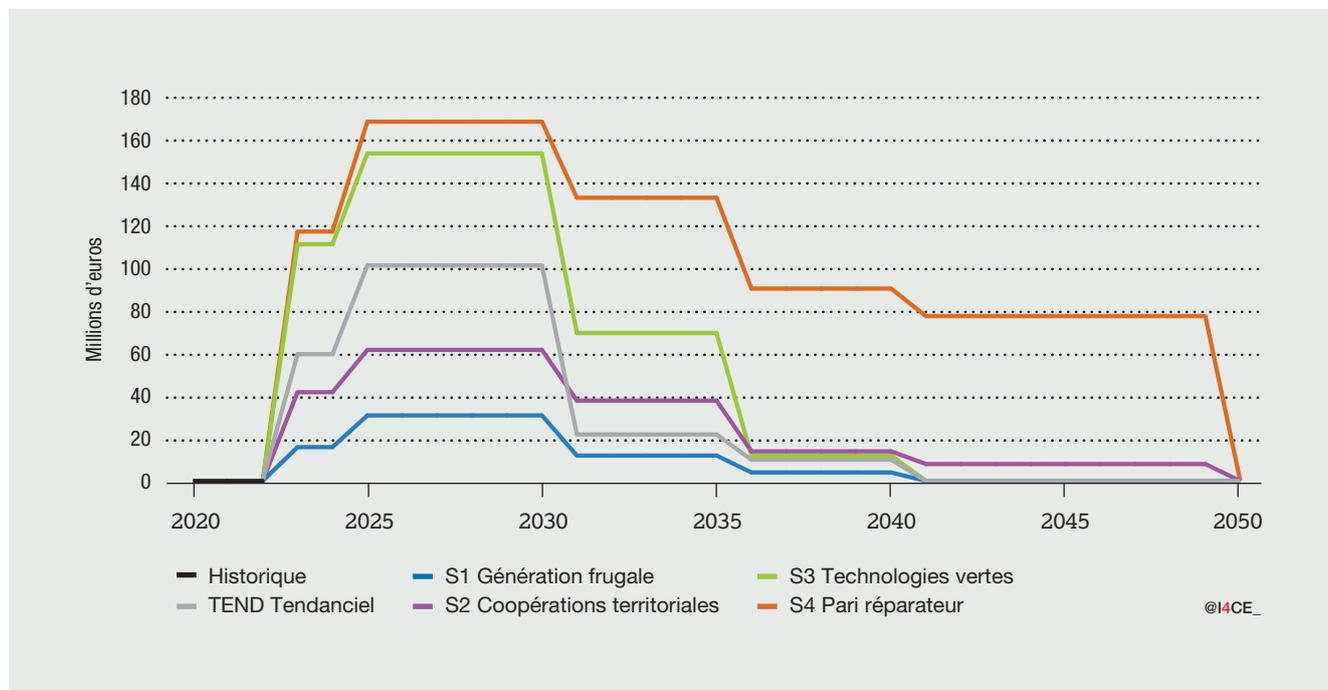
- les technologies incrémentales sont déployées entre 2025 et 2030 ;
- l'*upgrading* des cimenteries est réalisé d'ici 2035.

Le déploiement de ces technologies est à l'origine de la concentration d'une partie des besoins d'investissements entre aujourd'hui et 2035.

Entre 2035 et 2050, les investissements réalisés se rapportent principalement à des leviers moins matures :

- l'intégration de combustibles alternatifs est mise en œuvre d'ici 2040 ;
- les unités de captage du CO<sub>2</sub> sont développées pour partie avant 2030 puis entre 2030 et 2050, selon les cibles de CO<sub>2</sub> capté dans les scénarios Transition(s) 2050.

FIGURE 11. CHRONIQUES D'INVESTISSEMENTS DANS LA PRODUCTION DE CIMENT



#### ENCADRÉ N°4. LE PLAN DE TRANSITION SECTORIEL DE L'INDUSTRIE CIMENTIÈRE EN FRANCE

L'ADEME a publié en 2021 un Plan de Transition Sectoriel (PTS) de l'industrie cimentière en France. Le PTS présente trois scénarios du devenir du secteur à l'horizon 2050 : un scénario de référence (qui n'atteint pas la neutralité carbone) et deux scénarios de décarbonation : le scénario «sobriété low-tech» et le scénario «techno-push». Ce document présente également des besoins d'investissements nécessaires à la mise en œuvre des trois scénarios :

- 4,4 milliards d'euros dans le scénario de référence,
- 204 millions d'euros dans le scénario «sobriété low-tech»,
- 7,7 milliards d'euros dans le scénario «techno-push».

Si l'exercice PTS et celui présenté ici suivent des méthodes proches, il n'est pas possible de comparer directement les deux estimations dans la mesure où les niveaux de production modélisés sont très différents, or plus les niveaux de production sont élevés, plus les besoins d'investissements de décarbonation seront importants à l'échelle nationale.

Les niveaux de production atteignent 14 Mt en 2050 dans le scénario de référence contre 4,3 Mt à 11,5 Mt entre S1 et S4. En effet, dans les scénarios de Transition(s) 2050, les baisses de production de ciment (engendrées par un fort développement de la rénovation et une limitation forte du marché de la construction de logements neufs) engendrent des reconversions de sites cimentiers qui abaissent donc les besoins en investissement.

Le scénario «sobriété low-tech», est relativement proche du scénario S1. Le scénario S1 prévoit quelques leviers supplémentaires comme le recours aux technologies incrémentales et à l'*upgrading* mais avec un niveau de production inférieur. Les besoins d'investissements des deux scénarios («sobriété low-tech» et S1) sont du même ordre de grandeur.

Le scénario «techno-push» propose quant à lui un niveau de production bien supérieur à l'ensemble des scénarios de Transition(s) 2050, y compris le S4. Il prévoit également d'autres leviers plus innovants qui ne sont pas recensés dans notre estimation relative à l'industrie cimentière, comme la minéralisation qui concerne l'aval de la chaîne de production, l'électrification des pré-calciinateurs ou un recours plus intense à certains leviers coûteux comme le CCS.

## La décarbonation de la production d'alcènes et aromatiques

### Alcènes et aromatiques : des scénarios de décarbonation contrastés intégrant soit de nouvelles routes de production, soit une forte baisse de la production

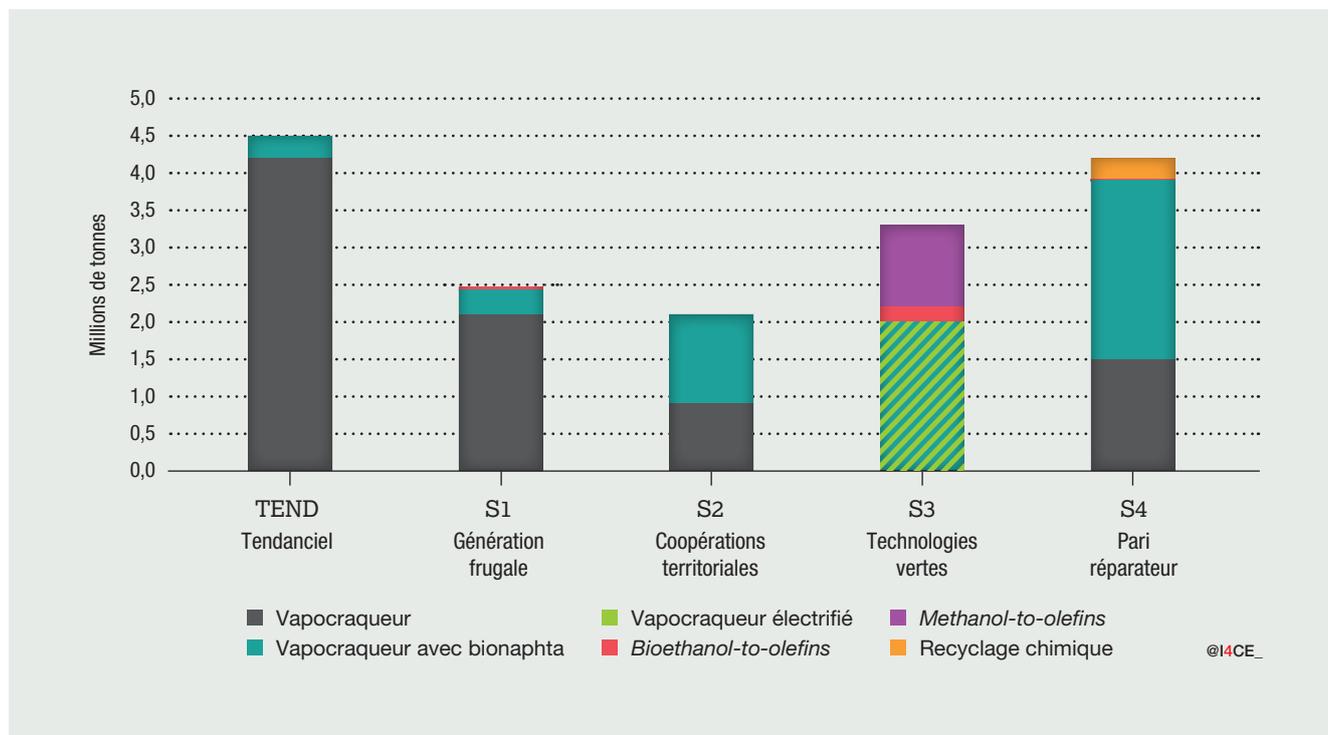
Les alcènes et aromatiques, ou *High Value Chemicals* (HVC) sont des composés chimiques produits par vapocraquage à partir de composés issus du raffinage du pétrole, tel le naphta. L'éthylène est le principal produit des vapocraqueurs et représente aujourd'hui environ 40 % des HVC produits en France. 65 % des produits issus du vapocraquage servent ensuite à fabriquer des plastiques.

Les scénarios Transition(s) 2050 proposent deux grandes stratégies pour décarboner la production des HVC (Figure 12). Les scénarios S1 et S2 se caractérisent par une forte baisse du niveau de production des HVC, à 2,5 Mt et 2,1 Mt respectivement contre plus de 5,4 Mt aujourd'hui, résultant de l'application de la réglementation actant la fin des emballages plastiques à usage unique<sup>38</sup>. Cette baisse s'accompagne par un développement poussé du recyclage mécanique des plastiques (activité en aval de

la production des HVC et hors du périmètre étudié ici). Ces deux scénarios ne prévoient pas de modification des procédés de production des HVC, hormis l'intégration d'une partie de bionaphta comme intrant des vapocraqueurs et, marginalement, de la voie *bioethanol-to-olefins* en S1. Les vapocraqueurs doivent être convertis à partir d'un certain seuil d'incorporation de bionaphta, afin d'être mieux adaptés au nouveau mix d'intrants.

Les scénarios S3 et S4 prévoient une moindre baisse de la production des HVC, à 3,3 et 4,3 Mt respectivement, et ont recours au développement de nouvelles routes de production bas-carbone. Le scénario S3 repose notamment sur le développement de la route *methanol-to-olefins*<sup>39</sup> et sur l'électrification du vapocraqueur, tandis que S4 inclut le développement d'une filière des recyclages chimiques des plastiques. A l'exception de S3, les scénarios conservent tous une part de vapocraquage à partir de produits pétroliers ce qui suppose le maintien, en amont, d'activité de raffinage du pétrole (hors de notre périmètre d'étude).

FIGURE 12. NIVEAUX ET ROUTES DE PRODUCTION DES ALCÈNES ET AROMATIQUES EN 2050 DANS LES SCÉNARIOS TRANSITION(S) 2050



38 L'effet de cette disposition réglementaire sur le niveau de production des vapocraqueurs peut néanmoins être amorti par de nouveaux débouchés pour les alcènes et aromatiques.

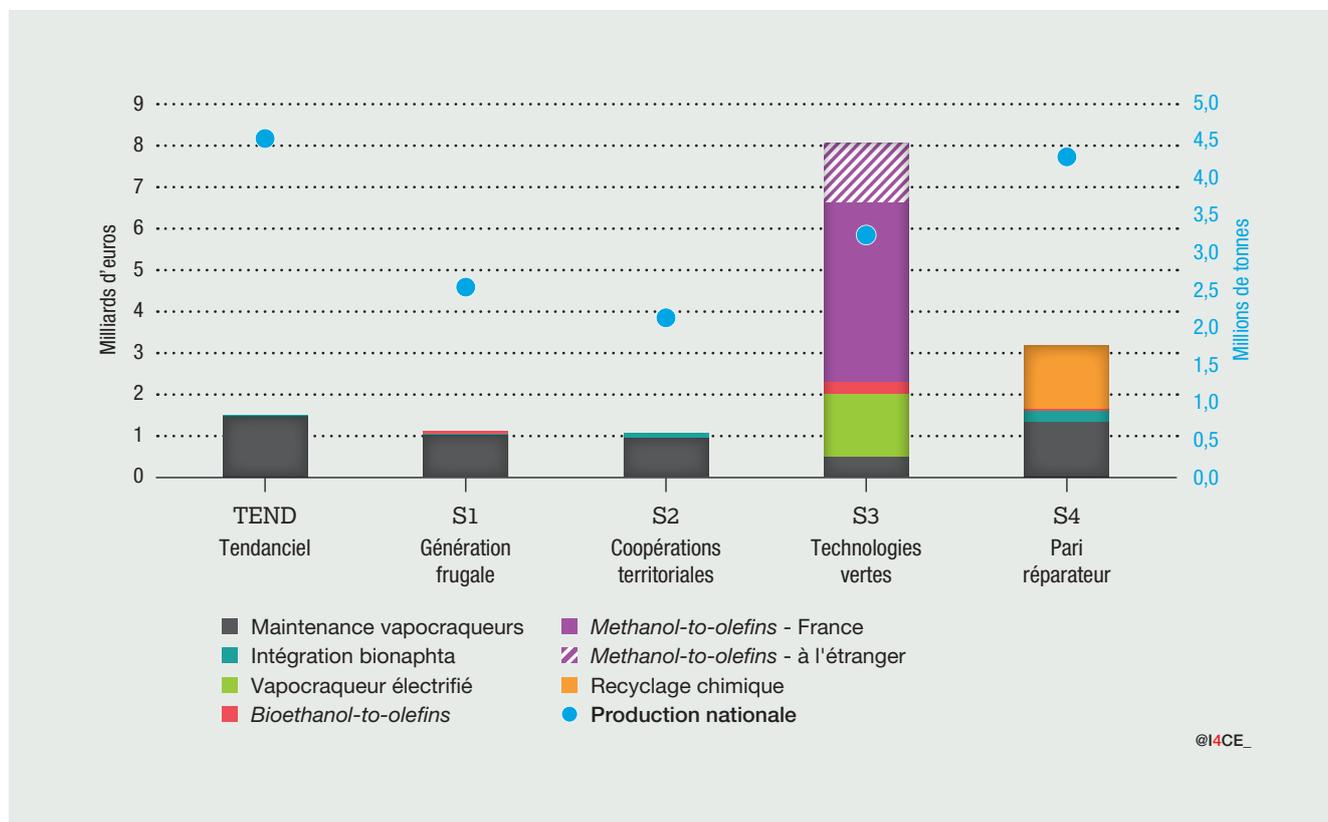
39 La route de production *methanol-to-olefins* est un procédé chimique qui permet de convertir du méthanol en alcènes et aromatiques. Lorsque le méthanol utilisé est produit à partir de CO<sub>2</sub> et d'hydrogène bas-carbone, la production d'alcènes et aromatiques par la route *methanol-to-olefins* est peu émettrice.

### Alcènes et aromatiques : des besoins d'investissements estimés entre 1,1 et 6,7 milliards d'euros

L'écart important des besoins d'investissements entre les scénarios s'explique essentiellement par le développement de nouvelles routes de production coûteuses, en particulier dans le scénario S3 dont les besoins d'investissements en France s'élèvent à 6,7 milliards d'euros (Figure 13). Le développement de la route *methanol-to-olefins* nécessite notamment, en plus des investissements dans les capacités de production d'alcènes, des investissements dans la production de méthanol bas-carbone, à partir de CO<sub>2</sub> et d'hydrogène bas-carbone, impliquant l'installation

d'électrolyseurs (dont une partie à l'étranger avec importation de l'hydrogène produit et le développement d'un réseau d'hydrogène sur le territoire). Les besoins d'investissements du scénario S4, de 3,1 milliards d'euros, sont notamment portés par le développement du recyclage chimique des plastiques, dont les coûts rapportés à la capacité de production sont élevés. Les besoins d'investissements des scénarios S1 et S2 sont équivalents, à hauteur de 1,1 milliard d'euros, et se rapportent en grande partie à la maintenance des vapocraqueurs existants ainsi qu'à leur conversion pour l'intégration de bionaphta en intrant. Ces deux scénarios impliquent également des investissements supplémentaires dans la filière du recyclage mécanique des plastiques, non comptabilisés dans le champ de cette étude.

FIGURE 13. BESOINS D'INVESTISSEMENTS ET NIVEAU DE PRODUCTION DES ALCÈNES ET AROMATIQUES À L'HORIZON 2050



Les besoins d'investissements dans la route de production *methanol-to-olefins* incluent l'installation de capacités d'électrolyse pour la production de méthanol bas-carbone. Toutefois, dans le scénario S3, l'hydrogène est principalement acheminé par réseaux jusqu'aux sites industriels plutôt que produit directement par les industriels. Par simplicité, nous ne différencions pas les investissements dans les capacités d'électrolyse en France selon qu'elles soient situées sur les sites industriels ou non.

Les besoins d'investissements n'incluent pas ceux dans la fourniture d'électricité bas-carbone pour la production d'hydrogène, le renforcement des réseaux électriques, les réseaux d'hydrogène et dans le transport et stockage du CO<sub>2</sub>. Ils n'incluent pas non plus les besoins d'investissements dans le raffinage du pétrole ou le recyclage mécanique, en dehors de notre périmètre.

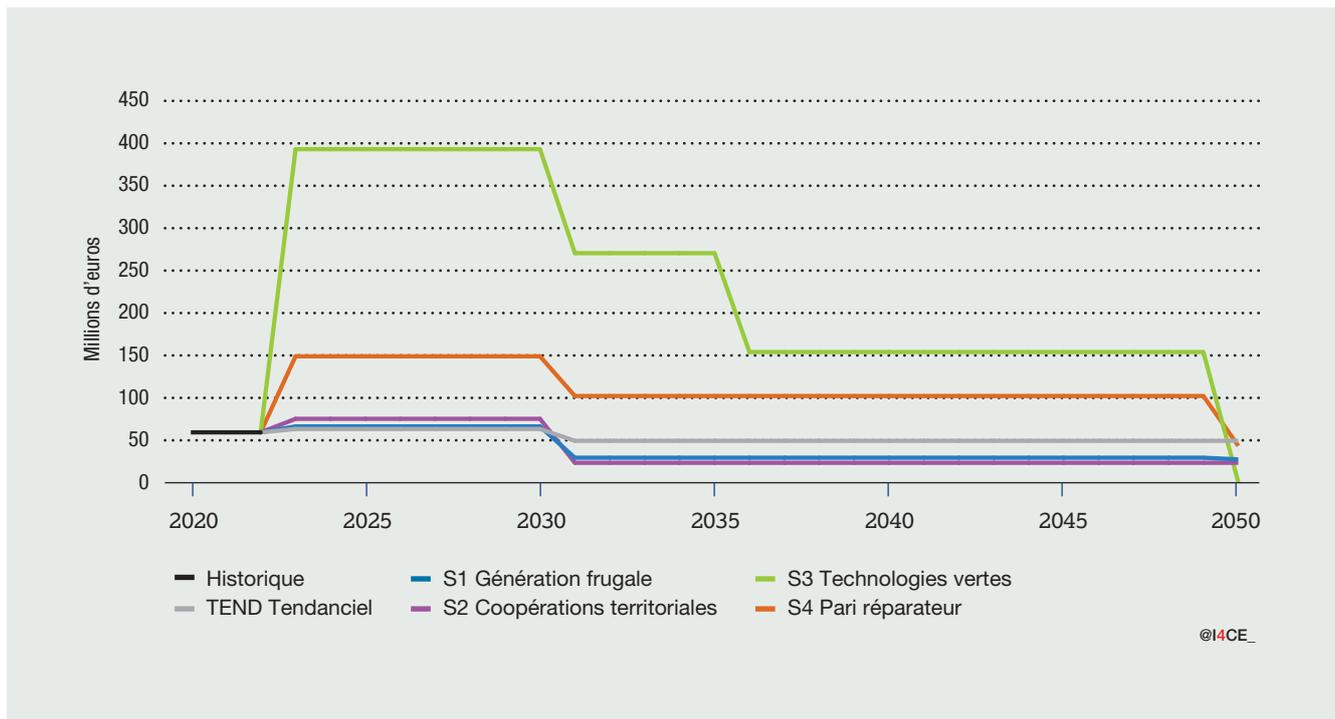
### Alcènes et aromatiques : des investissements concentrés au cours des dix prochaines années

Les sites de production des alcènes et aromatiques sont inspectés et modernisés tous les sept ans. Lors de ces arrêts réglementaires, des investissements de maintien des capacités sont réalisés, lesquels constituent la majeure partie des besoins d'investissements des scénarios S1 et S2. De plus, ces périodes offrent des opportunités pour réaliser des investissements dans la décarbonation des vapocraqueurs et le développement de nouvelles filières de production. Comme les prochaines mises à l'arrêt des sites doivent se dérouler entre 2023 et 2029<sup>40</sup>, une part des investissements de décarbonation est concentrée sur cette période. Certaines routes de production n'étant pas encore matures aujourd'hui, leur développement et les investissements correspondants sont répartis sur l'ensemble de la période 2023-2050.

Nous construisons les chroniques d'investissements à partir des arrêts réglementaires et de la maturité des technologies (Figure 14) :

- l'intégration de bionaphta et l'électrification des vapocraqueurs sont mises en œuvre d'ici respectivement 2030 et 2035, autour des prochains arrêts réglementaires ;
- la route de production *bioethanol-to-olefins* et les recyclages chimiques des plastiques sont développés entre 2023 et 2050.
- la route de production *methanol-to-olefins* est développée entre 2023 et 2050, en prenant en compte le développement de la production de méthanol bas-carbone, qui dépend des capacités d'électrolyse et des nouvelles infrastructures permettant l'importation d'hydrogène. Dans le scénario S3, environ trois quarts des capacités de production sont développées après 2030. Des capacités d'électrolyse sont installées en France avant 2030, puis après 2030 la majeure partie des besoins en hydrogène bas-carbone est importée de l'étranger. Cela se reflète dans la chronique du scénario S3 par une baisse des investissements à partir de 2030 bien que le rythme de déploiement des capacités *methanol-to-olefins* soit plus élevé.

FIGURE 14. CHRONIQUES D'INVESTISSEMENTS DANS LA PRODUCTION DES ALCÈNES ET AROMATIQUES



40 Tous les vapocraqueurs ont connu leur dernière mise à l'arrêt entre 2016 et 2022.

## La décarbonation de la production d'ammoniac

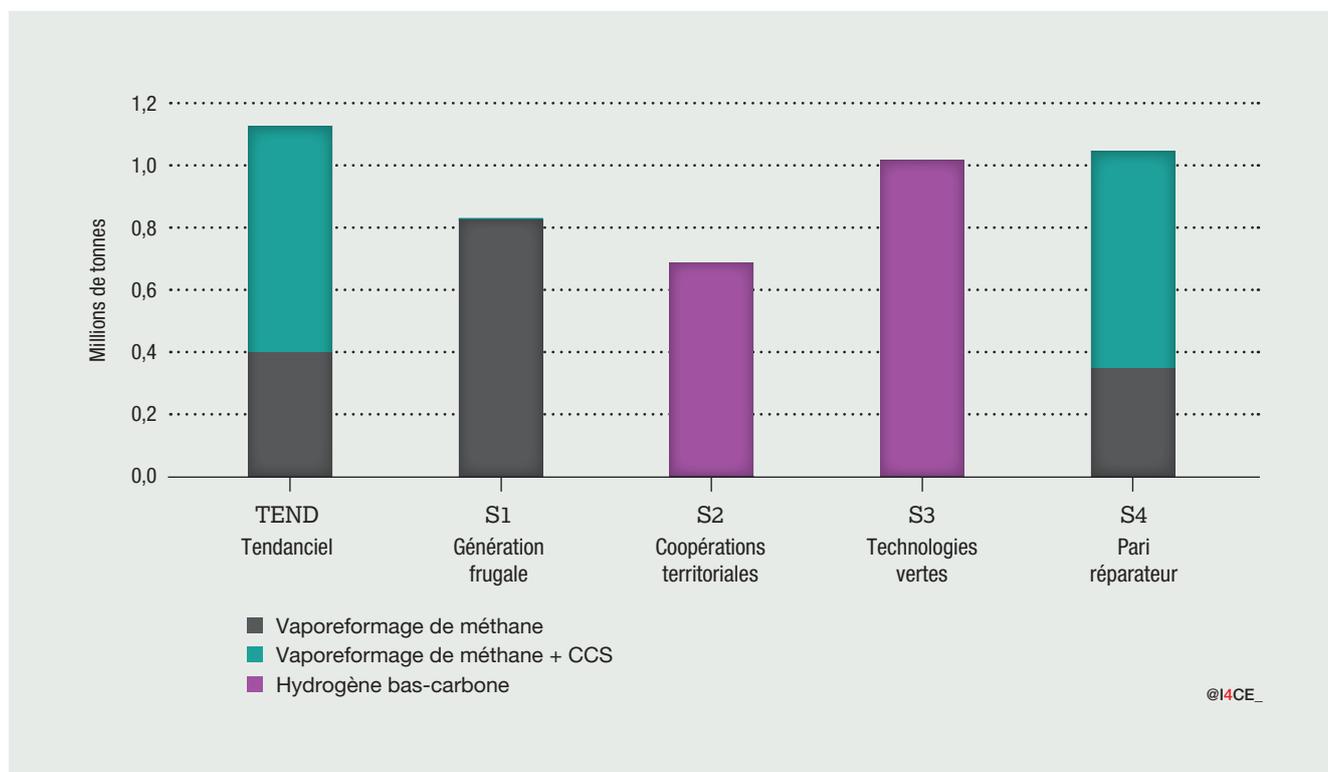
### Trois routes de production possibles pour des niveaux de production relativement stables

Les niveaux de production d'ammoniac dans les scénarios ADEME à l'horizon 2050 sont compris entre 0,7 Mt dans le scénario S2 et 1,1 Mt dans les scénarios TEND et S4, cette borne haute étant à un niveau équivalent à la production actuelle, entre 0,9 et 1,1 Mt par an sur la période 2015-2020.

Trois routes de production, dont deux décarbonées, ont été considérées pour la production d'ammoniac (Figure 15) :

- la route actuelle de production d'ammoniac par vaporeformage de méthane ;
- la route actuelle avec l'ajout d'unités de captage des émissions de CO<sub>2</sub> en vue de son stockage ;
- une nouvelle route de production d'ammoniac utilisant de l'hydrogène décarboné produit par électrolyse de l'eau.

FIGURE 15. NIVEAUX ET ROUTES DE PRODUCTION DE L'AMMONIAC EN 2050 DANS LES SCÉNARIOS TRANSITION(S) 2050

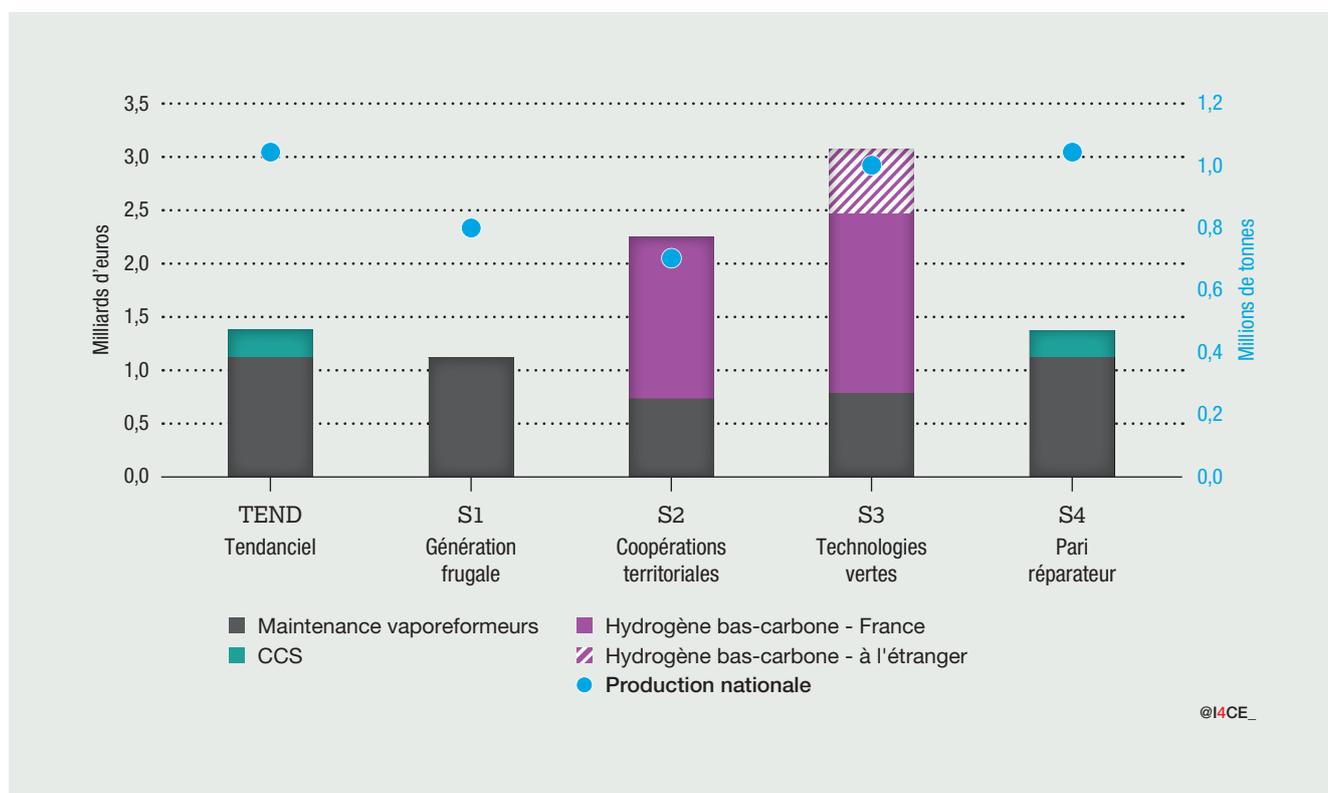


### Des besoins d'investissements estimés entre 1,1 et 2,5 milliards d'euros

Les besoins d'investissements dans la production d'ammoniac se partagent entre le maintien des vaporeformeurs existants et le déploiement de nouveaux équipements de production, dont les unités de captage des émissions des vaporeformeurs et les capacités d'électrolyse pour la production d'hydrogène bas-carbone<sup>41</sup> (Figure 16). De plus, à partir d'un certain taux d'utilisation d'hydrogène dans la production d'ammoniac, des investissements sont nécessaires pour convertir les sites de production à cette nouvelle route de production. Ces investissements, plus coûteux, expliquent les besoins d'investissements élevés des scénarios S2 et S3, à hauteur de 2,3 milliards

d'euros et 3,1 milliards d'euros respectivement. Le scénario S3 prévoit toutefois l'importation d'une partie de l'hydrogène utilisé, ce qui abaisse les besoins d'investissements rapportés strictement aux capacités de production sur le territoire national à 2,5 milliards d'euros. Les besoins d'investissements des deux autres scénarios sont relativement proches : 1,1 milliard d'euros dans S1 et 1,4 milliard d'euros dans S4. Cet écart reflète essentiellement l'ajout dans le scénario S4 d'unités de captage du CO<sub>2</sub>. Cette option de décarbonation apparaît à première vue moins coûteuse, néanmoins dans ce scénario une partie de la production d'ammoniac n'est pas éligible au CCS, et donc pas couverte, ce qui implique davantage d'émissions résiduelles que la voie par électrolyse.

FIGURE 16. BESOINS D'INVESTISSEMENTS ET NIVEAU DE PRODUCTION D'AMMONIAC À L'HORIZON 2050



Les besoins d'investissements dans la route de production d'ammoniac à partir d'hydrogène incluent l'installation des capacités d'électrolyse. Toutefois, dans le scénario S3, l'hydrogène est principalement acheminé par réseaux jusqu'aux sites industriels plutôt que directement par les industriels. Par simplicité, nous ne différencions pas les investissements dans les capacités d'électrolyse en France selon qu'elles soient situées sur les sites industriels ou non.

Les besoins d'investissements n'incluent pas ceux dans la fourniture d'électricité bas-carbone pour la production d'hydrogène, le renforcement des réseaux électriques, les réseaux d'hydrogène et dans le transport et stockage du CO<sub>2</sub>.

41 Les besoins d'investissements prennent en compte une hypothèse d'une diminution par deux du coût des électrolyseurs d'ici 2030 (International Energy Agency, « Ammonia Technology Roadmap », 2021).

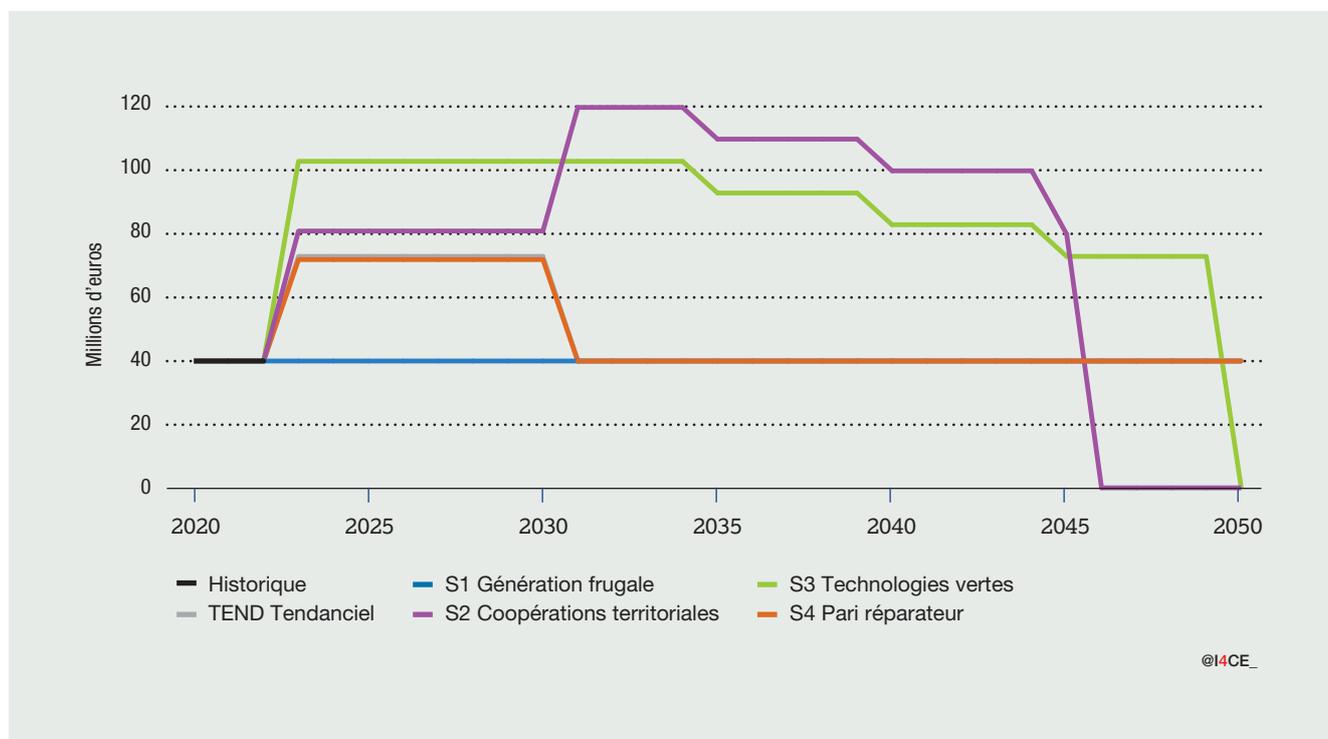
### Ammoniac : des niveaux d'investissements en deux temps, avant et après 2030

Les vaporeformeurs peuvent avoir une longue durée de vie, de l'ordre de la centaine d'année, à condition de réaliser régulièrement des investissements de maintien des capacités. Cela se traduit dans la chronique d'investissement de décarbonation de l'ammoniac par un niveau d'investissements minimum pour les scénarios reposant à 2050 sur la route de production par vaporeformage de méthane (TEND, S1 et S4). Dans les scénarios S2 et S3, des investissements dans le maintien des vaporeformeurs sont conservés jusqu'au moment où chaque site est converti pour produire de l'ammoniac en utilisant uniquement de l'hydrogène décarboné.

Les routes de production décarbonées sont déployées en partie avant 2030 puis entre 2030 et 2050<sup>42</sup> (Figure 17) :

- les investissements dans la conversion des sites de production pour l'intégration complète d'hydrogène bas-carbone (scénarios S2 et S3) sont réalisés à partir de 2030. Un site est converti tous les cinq ans, jusque 2045 dans S2 et jusque 2050 dans S3 ;
- les investissements dans les capacités d'électrolyse de l'eau (scénarios S2 et S3) sont distribués entre 2023 et 2030 puis entre 2030 et respectivement 2045 et 2050 pour S2 et S3, dates auxquelles tous les vaporeformeurs ont été convertis ;
- les unités de captage du CO<sub>2</sub> (scénarios TEND et S4) sont développées autour de 2030.

FIGURE 17. CHRONIQUES D'INVESTISSEMENTS DANS LA PRODUCTION D'AMMONIAC



42 En complément de ces chroniques d'investissement, associées aux scénarios du projet Transition(s) 2050, l'ADEME publiera d'ici l'été 2023 un Plan de Transition Sectoriel centré sur la décarbonation de la production française d'ammoniac, avec des chroniques détaillées.

# 4. DE L'IDENTIFICATION DES BESOINS D'INVESTISSEMENTS À LEUR MISE EN ŒUVRE

## Comparaison des annonces des industriels aux besoins d'investissements identifiés : quelle transformation s'amorce ?

### Les industriels ont annoncé plusieurs projets pour décarboner la production d'acier avec un recours à des technologies de rupture et un maintien du niveau de production

En France, la production d'acier est assurée par trois sites de hauts fourneaux et une vingtaine d'aciéries électriques recyclant de la ferraille. La décarbonation de la production d'acier a été marquée par l'annonce en février 2022<sup>43</sup> par le groupe ArcelorMittal du déploiement, avec le soutien de l'État<sup>44</sup>, de nouvelles installations à Dunkerque et Fos-sur-Mer en remplacement de trois hauts fourneaux. À Dunkerque, une unité de réduction directe (DRI) pour transformer le minerai de fer avec de l'hydrogène, d'une capacité de production de 2,5 Mt par an, sera couplée à une technologie innovante de four électrique et complétée par un four à arc électrique (EAF) additionnel. A Fos-sur-Mer, l'industriel prévoit la mise en place d'un four à arc électrique d'une capacité de production de 2 Mt par an<sup>45</sup>. De plus, le groupe ArcelorMittal étudie une deuxième phase d'investissement avec, outre les technologies mises en œuvre dans la première phase, le développement du CCS.

Ces annonces d'investissements élevés, déployés avant 2030 et de la coexistence de plusieurs technologies de rupture, dont le CCS, sont en cohérence avec la chronologie de besoins d'investissements que nous estimons pour le scénario S3 de l'ADEME<sup>46</sup>. Elles impliquent le déploiement d'investissements additionnels en dehors des sites de production pour la fourniture d'électricité et le renforcement

de réseaux électriques nécessaires à l'accueil des électrolyseurs, ainsi que la mise en place d'infrastructures pour le CCS.

### Les cimentiers envisagent des leviers de décarbonation multiples pour transformer en profondeur leur activité

La branche du ciment se distingue des autres branches étudiées ici par un nombre relativement élevé de cimenteries, 27 en 2015 en France métropolitaine<sup>47</sup>. Les récentes annonces des groupes cimentiers présents en France permettent d'identifier le recours à plusieurs leviers pour réduire leurs émissions de GES :

- l'arrêt de la production de clinker sur certains sites<sup>48</sup> ;
- le déploiement d'installations qui réduisent les émissions liées à la consommation d'énergie (avec l'installation de nouveaux fours en voie sèche et l'utilisation de biomasse et de déchets comme combustibles alternatifs<sup>49</sup>) ;
- le développement d'autres liants en substitut au clinker comme les argiles calcinées<sup>50</sup> ;
- l'initiation de projets de captage du CO<sub>2</sub><sup>51</sup>.

Ainsi, ces différents projets commencent à esquisser une transformation du secteur par un recours à plusieurs leviers de décarbonation. Cette transformation dépendra des différents choix industriels faits par les groupes cimentiers, fortement dépendants des perspectives d'évolution du

43 ArcelorMittal, *op.cit.* Ces investissements visent, à production constante, une réduction totale de près de 40 % des émissions de CO<sub>2</sub> d'ArcelorMittal en France, soit 7,8 Mt par an de CO<sub>2</sub>.

44 Matignon. « Dossier de presse France 2030. Décarbonation de l'industrie », 4 février 2022.

45 Dans le cadre de France Relance, l'État soutient également sur ce site un projet d'injection de gaz naturel en remplacement du charbon et du coke, avec à la clé un gain de 0,133 Mt de CO<sub>2</sub>, soit 2 % des émissions du site. Gouvernement. « Dossier de presse : 47 nouveaux lauréats pour les appels à projets décarbonation », 14 mars 2023.

46 Le coût global de ces investissements de 1,7 milliard d'euros pour une capacité de production de 4,5 tonnes, est comparable aux données de coût que nous avons identifiées.

47 ADEME. « Plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière en France. Premiers résultats technico-économiques. Rapport final », décembre 2021.

48 Deux usines Lafarge ont été reconverties en 2016 et 2017. En novembre 2020 Calcia a annoncé la fin de la production de clinker sur deux sites : l'usine de Gargenville dans les Yvelines convertie en station de broyage et l'usine de Cruas en Ardèche qui devient un terminal automatisant la distribution de ciment blanc.

49 La majeure partie de ces actions a été soutenue par le plan France Relance : installations de biomasse pour deux cimenteries Lafarge et une cimenterie Eqiom, procédés permettant l'utilisation de combustibles solides de récupération pour une cimenterie Vicat et une cimenterie Calcia.

50 Soutenue dans le cadre de France Relance pour deux sites du groupe Holcim et un site Vicat.

51 C'est notamment le cas du site de production de Lumbres (Eqiom), soutenu par le Fonds Innovation au niveau européen, et qui pourrait contribuer au développement d'un nouvel écosystème de captage et de stockage près de Dunkerque pour un transport puis stockage en mer du Nord. C'est également le cas du site de Martres-Tolosane (Lafarge) qui devrait accueillir une plateforme R&D pour tester des nouvelles technologies de captage de CO<sub>2</sub> plus efficaces. En outre, la cimenterie Vicat de Montalieu-Vercieu devrait également être équipée de dispositifs de captage du CO<sub>2</sub> pour produire d'ici 2027 du méthanol décarboné, dans le cadre d'un partenariat avec une filiale hydrogène d'EDF.

marché. Il semble utile pour cela de préciser à la fois les perspectives d'évolution de la demande (liées notamment aux évolutions réglementaires relatives à la construction neuve et à l'artificialisation des sols) et celles concernant le potentiel de déploiement d'infrastructures de transport et stockage de CO<sub>2</sub>.

### Pour la production d'alcènes et aromatiques, des technologies de rupture sont à l'étude, sans calendrier précis

En France, six vapocraqueurs assurent la production des alcènes et aromatiques. Nous n'avons pas connaissance de projets portant sur la décarbonation de ces sites de production. Quelques communications à l'échelle des groupes qui opèrent ces sites indiquent des travaux prospectifs autour de solutions similaires à celles présentées dans les scénarios ADEME, comme les vapocraqueurs électrifiés. Mais ces documents ne détaillent pas de calendrier ou de géographie pour le déploiement de ces solutions actuellement non matures.

En revanche plusieurs investissements ont récemment été annoncés pour installer des unités de recyclage chimique qui pourraient permettre d'alimenter certains vapocraqueurs en intrant, dont le lancement de deux sites avec des capacités de production de plusieurs milliers de tonnes :

- un investissement de 250 millions d'euros pour l'ouverture d'une usine Loop/Suez dont la mise en service est prévue pour 2024, avec une capacité de production de 70 000 tonnes/an de plastique recyclé.
- un investissement de 850 millions d'euros, avec une aide de l'État, par une usine Eastman dont la mise en service est prévue pour 2025, et qui permettra de recycler 16 000 tonnes de déchets plastiques par an.

A ce stade les industriels ont seulement annoncé publiquement le déploiement de solutions de recyclages chimiques<sup>52</sup>, technologie qui est uniquement présente à la marge au sein du scénario S4 de l'ADEME.

### Les industriels producteurs d'ammoniac prennent date en lançant des projets d'étude pour le déploiement de nouvelles technologies utilisant l'hydrogène bas-carbone ou le captage de CO<sub>2</sub>

En France, la production d'ammoniac est répartie sur quatre sites de production. Deux projets sont à l'étude : l'un porte sur l'utilisation d'hydrogène bas-carbone et l'autre sur le captage et la séquestration du CO<sub>2</sub>.

Concernant la production à partir d'hydrogène bas-carbone, un protocole d'accord a été signé fin 2021 entre le chimiste Borealis et Hynamics, une filiale du groupe EDF spécialisée dans l'hydrogène décarboné. Il vise à étudier le développement d'un projet de production d'ammoniac bas-carbone sur le site de production de Borealis en Alsace qui produit aujourd'hui 1 Mt/an (tous produits confondus, fertilisants azotés, ammoniac et acide nitrique). L'objectif serait de produire 24 000 tonnes d'ammoniac bas-carbone par an à l'horizon 2025-2026, évitant ainsi 33 000 tonnes de CO<sub>2</sub> chaque année<sup>53</sup>.

Concernant le captage du CO<sub>2</sub>, cette option est envisagée pour les sites de production du bassin industriel normand (dont deux sites d'ammoniac à Grand-Quevilly et au Havre) dans le cadre d'un protocole d'accord<sup>54</sup> pour travailler au développement d'une infrastructure de CCS. Les entreprises signataires de ce protocole d'accord collaboreront pour évaluer la faisabilité technique et économique de la mise en œuvre d'une chaîne de captage depuis leurs activités industrielles jusqu'au transport puis stockage final en mer du Nord.

Ainsi, des projets sont à l'étude sur la plupart des sites<sup>55</sup> de production d'ammoniac en France. Les industriels semblent envisager de recourir davantage au CCS que dans les scénarios étudiés. Cette option semble préférée à l'hydrogène bas-carbone, plus coûteux. Le calendrier de ces annonces présage en outre d'un déploiement plus tardif que celui envisagé dans nos chroniques d'investissements. S'agissant de projets en phase d'étude il existe encore un aléa concernant leur déploiement effectif.

---

Les annonces des industriels de ces quatre branches témoignent de l'amorce d'une transformation profonde de leur production. Les solutions envisagées semblent privilégier le maintien du niveau de production, ainsi que le recours à la fois à des solutions matures et des technologies de rupture. La plupart des projets documentés sont en phase de lancement avec pour certains encore des aléas sur la concrétisation des solutions envisagées et donc sur la réduction des émissions. Ces annonces ne permettent pas de dégager de stratégie d'ensemble au sein de ces branches ou même de l'ensemble de l'industrie, qui assurerait la cohérence des actions de décarbonation et l'atteinte des objectifs climatiques.

52 Si plusieurs sites de production de méthanol bas-carbone sont prévus en France, ces derniers sont pour l'instant destinés à être utilisés comme carburants pour le transport maritime ou aérien.

53 « Borealis et Hynamics travaillent sur un projet de production d'ammoniac bas-carbone ». Borealisgroup, novembre 2021.

54 « Air Liquide, Borealis, Esso, TotalEnergies et Yara coopèrent en vue de contribuer à la décarbonation du bassin industriel normand ». Borealisgroup, juillet 2021.

55 Nous n'avons pas connaissance de projets visant à décarboner la production sur le site de Borealis Grandpuits qui a fait l'objet d'opérations de maintenance en 2021.

## L'État a récemment mis en place des dispositifs prometteurs pour accompagner la transformation en profondeur de l'industrie lourde

### France 2030 : transformer l'industrie lourde en déployant des technologies de rupture

Annoncé fin 2021, ce nouveau plan d'investissement concentre le soutien à l'industrie sur les industries lourdes : sur 5 milliards d'euros alloués à la décarbonation de l'industrie, 4 milliards d'euros seront consacrés au déploiement de solutions de « décarbonation profonde de sites industriels fortement émissifs notamment dans le secteur de la sidérurgie, la chimie lourde, le ciment ou l'aluminium »<sup>56</sup>. Le soutien public à destination de ces sites pourrait, suite aux annonces du Président de la République en novembre 2022, être augmenté de 5 milliards d'euros supplémentaires dans les 18 mois à venir. Ce soutien supplémentaire sera octroyé si le total des engagements

pris par les industriels atteint une réduction de leurs émissions de 10 MtCO<sub>2</sub>.

Les estimations que nous proposons dans ces travaux ne permettent pas d'analyser d'un point de vue financier ce dispositif : notre périmètre d'étude est plus restreint que les industries éligibles à France 2030 et nous ne documentons pas les contraintes de financement des industriels. En revanche, ce nouveau dispositif, qui se distingue des précédents par son ciblage spécifique sur l'industrie lourde (cf. **Encadré n°5**), envoie un signal sur la politique de transformation industrielle poursuivie par l'État. Elle accompagne et confirme l'orientation qui se dessine dans les plans d'investissement des industriels pour transformer leur activité : maintenir des capacités de production en déployant de nouveaux leviers technologiques.

### ENCADRÉ N°5. UN CIBLAGE RÉCENT DES DISPOSITIFS NATIONAUX VERS LES INVESTISSEMENTS DE RUPTURE DANS L'INDUSTRIE LOURDE

#### Des politiques publiques soutenant la décarbonation de l'industrie sont déployées à la fois à l'échelon européen et à l'échelon national

Au niveau européen, la politique industrielle se décline d'une part autour du système d'échange de quotas d'émission (SEQUE EU ETS) – qui incite à la décarbonation par le prix du carbone – et d'autre part par un soutien à l'innovation via, pour la période 2020-2030, le Fonds innovation (38 milliards d'euros)<sup>57</sup>. L'industrie bénéficie également de dispositifs nationaux de soutien à la recherche et à l'investissement :

- des outils comme le crédit d'impôt recherche, les Programmes d'investissements d'avenir (610 millions d'euros prévus pour la stratégie d'accélération de la décarbonation de l'industrie suite à l'intégration des PIA4 dans France 2030<sup>58</sup>) ou encore les financements de l'Agence nationale de recherche<sup>59</sup>, soutiennent la recherche et le développement industriels.
- des outils comme le Fonds Chaleur<sup>60</sup> et les certificats d'économies d'énergie (CEE)<sup>61</sup>, soutiennent le déploiement de solutions de décarbonation matures, sans toutefois cibler les transformations profondes des procédés de production, propres à la décarbonation de l'industrie lourde.

Enfin, la Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné (SNH), annoncée en septembre 2020, prévoit également un volet décarbonation de l'industrie<sup>62</sup>. Elle se concentre toutefois pour l'instant sur la décarbonation de l'hydrogène pour les usages industriels existants. Cette stratégie devrait être renforcée dans le cadre de sa mise à jour d'ici l'été 2023 pour y intégrer des nouveaux usages industriels.

56 Le volet industrie comporte également 1 milliard d'euros pour le déploiement de solutions plus matures dans le tissu industriel français, notamment la chaleur bas-carbone et l'efficacité énergétique, sans cibler d'industrie ou de territoire. Le plan France 2030 comprends par ailleurs, 2,3 milliards d'euros pour l'hydrogène décarboné et le développement de technologies d'énergies renouvelables à la pointe, 1 milliard d'euros pour faire émerger en France des réacteurs nucléaires de petite taille et 3,8 milliards d'euros pour les transports du futur : véhicules électriques et avion bas-carbone.

57 Le Fonds innovation soutient des activités de démonstration de technologies bas-carbone innovantes pour l'industrie, et des innovations de rupture, notamment le captage et stockage du CO<sub>2</sub> – il sera notamment financé par le système d'enchères du SEQUE et le reliquat des fonds du programme NER300.

58 Gouvernement. « Stratégie d'accélération "Décarbonation de l'industrie" ». Direction Générale des Entreprises, 4 février 2022. Plusieurs appels à projet pour accompagner les industriels ont déjà été lancé. Par exemple, l'appel à projets « Zones Industrielles Bas-carbone » (ZIBAC) qui accompagnera, à hauteur de 13,6 milliards d'euros d'aides, la réalisation d'études d'ingénierie et de faisabilité de décarbonation de la zone industrielle de Dunkerque.

59 A titre illustratif, un rapport du Sénat de 2019 identifie des soutiens de l'ordre de plusieurs dizaines de millions d'euro par an pour la sidérurgie. Valérie Létard. « Les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du XXI<sup>e</sup> siècle : opportunité de croissance et de développement ». Sénat, juillet 2019.

60 Durant la période 2009-2020, le Fonds Chaleur a été doté de 2,6 milliards d'euros pour soutenir plus de 6 000 réalisations représentant 9,4 milliards d'euros de travaux et une production totale de chaleur de 35,5 TWh/an (soit plus de 3 millions tep/an). Ce fonds est géré par l'ADEME, qui attribue des aides à l'investissement adaptées (subventions, aides remboursables...) pour permettre aux projets d'être économiquement équilibrés et de proposer un prix compétitif de la chaleur aux usagers.

61 Sur la période 2018-2021, d'après les données du Ministère de la Transition Ecologique, 4,8 milliards d'euros de subventions ont été délivrées dans ce cadre pour l'industrie.

62 Elle prévoit un soutien public de 9 milliards d'euros d'ici 2030 et vise le développement d'une filière française de l'électrolyse afin de favoriser des économies d'échelle et de baisser les coûts de production (avec un objectif de 6,5 GW d'électrolyseurs installés en 2030).

### Les industries lourdes ont plébiscité le dispositif de soutien au déploiement d'investissements introduit avec le plan France Relance sur la période 2020-2022

Avec le volet décarbonation de l'industrie du plan France Relance, l'État a proposé une enveloppe de 1,2 milliard d'euros via trois appels à projets (AAP). Au dernier pointage de mars 2023, 47 projets ont été accompagnés via ces AAP pour un total de 3,6 MtCO<sub>2</sub> évitées par an<sup>63</sup>.

En particulier, l'appel à projet DecarbIND<sup>64</sup> a proposé un soutien à l'électrification et à une transformation profonde des procédés industriels s'ils ont pour conséquence la baisse des émissions. Une première évaluation de ce volet décarbonation de l'industrie<sup>65</sup> montre que les industries lourdes comme le ciment ou la chimie-raffinage en ont été les principales bénéficiaires<sup>66</sup>. Il est toutefois difficile à ce stade d'identifier l'effet déclencheur<sup>67</sup> du dispositif France Relance pour l'accélération des investissements dans ces branches, identifiées par ailleurs comme moins allantes à décarboner<sup>68</sup>. En effet, plusieurs effets déclencheurs se sont cumulés au lancement du dispositif France Relance : une forte hausse du prix du carbone sur le marché SEQE<sup>69</sup>, renforcée par la crise géopolitique ukrainienne.

### Les concertations par filières organisées par l'État visent à faciliter un déploiement des investissements nécessaires sur l'ensemble de la chaîne de production

Dans le cadre du plan d'investissement France 2030, l'État a développé un nouveau mode de concertation avec les industriels des 50 sites les plus émetteurs, qui reprend et complète celui des feuilles de route de décarbonation<sup>70</sup>, élaborées par le Conseil national de l'industrie à l'échelle des filières. Cette approche dite « des 50 sites » élargit l'horizon temporel à 2050, contre 2030 dans les feuilles de route. Elle vise également à préciser les investissements qui doivent être réalisés à l'échelle des sites et des territoires<sup>71</sup> tout en veillant à la cohérence du déploiement de certains leviers technologiques mobilisés à l'échelle des bassins industriels (hydrogène, captage et séquestration de CO<sub>2</sub>). Cette concertation des 50 sites doit aboutir à la signature d'ici mi-2023 de contrats de transition écologique recensant les investissements prévus, et les aides nécessaires pour la mise en place des projets de décarbonation<sup>72</sup>. Cette approche est prometteuse pour accompagner une transformation profonde des sites en ce qu'elle propose d'articuler soutien financier aux investissements et concertation avec les

différents acteurs concernés pour leur déploiement. Elle n'inclut cependant pas, à notre connaissance, de volet visant à s'assurer de solutions de portage et de financement pour le déploiement d'infrastructures pour le transport de CO<sub>2</sub> et d'hydrogène. Le déploiement de ces infrastructures doit en outre s'inscrire dans le cadre d'une réflexion plus large à l'échelle européenne.

63 Gouvernement. « Dossier de presse : 47 nouveaux lauréats pour les appels à projets décarbonation », 14 mars 2023.

64 Qui a apporté à ce stade un soutien financier de 444 millions d'euros pour des investissements totaux de 2,1 milliards d'euros et une réduction des émissions de GES de 1,8 MtCO<sub>2</sub>/an.

65 « Comité d'évaluation du plan France Relance - Deuxième rapport, Chapitre 3. Les mesures de décarbonation de l'industrie ». France Stratégie & IGF, 20 décembre 2022.

66 La branche de la production de ciment a reçu l'aide la plus importante : 33,3 % de l'aide totale distribuée dans le cadre des deux appels à projet hors chaleur. Le secteur de la chimie et du raffinage a également reçu une part significative des aides totales avec 16,1 %.

67 Les premières analyses ne permettent pas de conclure quant à l'impact causal des dispositifs sur les investissements en faveur de la décarbonation et la baisse des émissions. Les évaluations conduites par l'équipe de chercheurs de l'Institut des Politiques Publiques se poursuivront en 2023.

68 Faquet, Romain. « Which Industrial Firms Make Decarbonization Investments? » DG Trésor, août 2021.

69 Parmi les autres leviers permettant d'expliquer la surreprésentation de ces branches parmi les entreprises candidates, le Comité d'évaluation du plan France Relance identifie le cahier des charges de l'appel à projets : avec un poids prépondérant du critère d'attribution d'efficacité de l'aide (montant de la subvention rapporté à la baisse des émissions de CO<sub>2</sub>) qui favorise de fait les entreprises les plus émissives, ou encore le fait que les projets d'investissement de ces branches, potentiellement plus risqués tireraient davantage d'intérêt d'un soutien public pour garantir une rentabilité suffisante de l'investissement.

70 Prévu par l'article 301 de la loi « climat et résilience » qui a instauré pour toutes les filières et branches émissives l'obligation d'établir des feuilles de routes de décarbonation.

71 Sont notamment mentionnés Dunkerque (59) et Fos-sur-Mer (13) avec des projets de développement de « hubs verts », en apportant des technologies décarbonées pour alimenter un ensemble allant de la production de l'énergie, au recyclage du carbone, en intégrant les raccordements de l'ensemble de ces technologies.

72 Ces contrats ont également vocation à nourrir l'élaboration des stratégies réalisées avec le Ministère de la Transition Énergétique : actualisation de la Stratégie nationale hydrogène, élaboration d'une Stratégie nationale biomasse, planification des raccordements électriques dans les zones industrielles de décarbonation, rédaction d'une stratégie nationale de capture, usage et séquestration de carbone nationale.

## Un agenda politique propice à accélérer davantage la transformation de l'industrie

### Bien articuler le processus de « planification écologique » et la mise à jour de la Stratégie nationale bas-carbone pour la transformation de l'industrie

La Stratégie nationale bas-carbone devrait être mise à jour à la suite de l'adoption de la loi de programmation énergie-climat (LPEC) attendue à l'été 2023. Cette mise à jour fixera un nouveau cap de décarbonation pour l'industrie, en tenant compte du renforcement des objectifs de baisse des émissions à l'horizon 2030 dans le cadre du Pacte Vert européen. Cette mise à jour pourra être l'occasion d'intégrer dans la SNBC les investissements et les orientations prévus par les industriels et l'État dans le cadre de France 2030.

Grâce aux travaux de modélisation multisectorielle, la mise à jour de la SNBC garantit l'atteinte d'un bouclage énergétique et climatique à l'horizon 2050. Plusieurs initiatives récentes contribuent déjà à assurer une cohérence entre les actions à mener au sein d'un territoire : les stratégies de transformation à l'échelle de bassins industriels avec l'approche des « 50 sites », complétées par l'approche Zones industrielles Bas-Carbone (un soutien public à la réalisation d'études d'ingénierie et de faisabilité de décarbonation à l'échelle de territoires industriels). Néanmoins, les leviers technologiques envisagés pour les quatre branches industrielles étudiées impliquent un recours à de nombreuses ressources et infrastructures : capacités de stockage du CO<sub>2</sub> et potentielles infrastructures de transport associées, fourniture d'électricité décarbonée en quantité suffisante pour la production d'hydrogène et renforcement des réseaux électriques. La mise à jour de la SNBC permettra d'identifier si les orientations prises par le secteur industriel sont cohérentes avec les stratégies de décarbonation envisagées pour les autres secteurs d'activité et au niveau national.

Ce travail de modélisation pourrait utilement s'articuler avec un processus permettant de rendre des arbitrages lorsque la modélisation fait apparaître des stratégies ou orientations sectorielles incompatibles (ressources insuffisantes, incompatibilité des trajectoires de réduction des émissions...). Le Secrétariat général à la planification écologique paraît être une institution bien placée pour conduire ce processus. Il est garant de la cohérence de la stratégie d'ensemble et, placé auprès de la Première ministre, il constitue l'enceinte adéquate pour organiser les discussions et rendre les arbitrages nécessaires.

### Le renforcement de la concurrence internationale pour le développement d'une industrie verte impose une accélération de la transformation notre industrie

Alors que la concurrence internationale a pu être considérée comme un frein à la décarbonation de l'industrie, plusieurs évolutions récentes en font désormais plutôt un facteur d'accélération. Au niveau européen d'une part, l'accord pour un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières et la fin progressive des quotas d'émission gratuits visent à la fois à limiter les risques de fuites de carbone et à accélérer la décarbonation de la production européenne. D'autre part, la concurrence internationale, et en particulier des États-Unis, a entraîné la présentation par la Commission européenne en janvier 2023 d'un volet industriel du Pacte Vert visant à « renforcer la compétitivité de l'industrie européenne et à soutenir la transition rapide vers la neutralité climatique »<sup>73</sup>. Cette initiative vise à apporter une première réponse à l'Inflation Reduction Act américain qui propose un soutien fédéral public à l'investissement d'au moins 369 milliards de dollars.<sup>74</sup> Plusieurs autres pays développent des plans d'investissement pour soutenir la décarbonation de leur industrie : la Chine a adopté un plan quinquennal en mars 2022, l'Inde a mis en place des programmes d'incitation à la production et le Japon a lancé un programme de « Green Transformation ».

73 Commission européenne. « Pacte vert : un plan industriel pour la compétitivité de l'industrie européenne neutre en carbone. », Communiqué du 12 avril 2023.

74 Estimation du Congressional Budget Office, mais le soutien pourrait être plus important dans la mesure où la plupart des dispositifs prévus ne sont pas plafonnés. Voir notamment, Pellerin-Carlin, Thomas. « Think house, not brick: building an EU Cleantech Investment Plan to match the US Inflation Reduction Act. », I4CE, février 2023.

# CONCLUSION

L'estimation des besoins d'investissements pour décarboner l'industrie lourde est nécessaire pour conduire la politique industrielle. Les quelques estimations existantes fournissent aujourd'hui des informations incomplètes. C'est pourquoi nous proposons une méthode transparente pour estimer les besoins d'investissements sur les sites de production de quatre branches industrielles, et pour différents scénarios de décarbonation. Nos résultats mettent en avant la grande variabilité des besoins d'investissements autour de deux paramètres : d'une part, l'évolution des activités économiques et de la demande pour les produits de l'industrie et, d'autre part, les nouvelles technologies à déployer pour décarboner la production. Ces résultats soulignent l'importance de définir plus précisément une stratégie multisectorielle intégrée à suivre pour décarboner l'industrie lourde.

Outre les objectifs nationaux de réduction des émissions de GES, le contexte international et les contraintes liées au prix du carbone en Europe incitent à accélérer la décarbonation de l'industrie. Nous montrons avec nos chroniques, qui tiennent compte de contraintes technologiques et sectorielles, que la majeure partie des besoins d'investissements se concentrent au cours de la prochaine décennie.

Les industriels s'engagent d'ailleurs progressivement sur cette voie, accompagnés par l'État qui renforce son action, en particulier pour l'industrie lourde, grâce au plan France 2030. Ces initiatives dessinent de premières orientations pour décarboner l'industrie en France : soutenir le maintien de capacités de production sur le territoire en déployant de nouveaux leviers technologiques. Nous identifions plusieurs leviers d'action pour permettre la transformation profonde de l'industrie : i) expliciter et rendre visible la stratégie de décarbonation de l'industrie, et s'assurer qu'elle s'inscrit dans une cohérence d'ensemble avec les évolutions envisagées des autres activités économiques ; ii) clarifier le modèle de financement des infrastructures nécessaires pour déployer les technologies envisagées (électricité bas-carbone, transport d'hydrogène et CCS) ; iii) le tout, grâce à un travail de planification piloté par l'État associant les principales filières concernées et permettant de concilier politique industrielle et climatique.

# LISTE DES FIGURES ET ENCADRÉS

<b>Figure 1</b>	Répartition des émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie en France en 2019	10
<b>Figure 2</b>	Périmètre étudié	11
<b>Figure 3</b>	Identification des besoins d'investissements pour chaque scénario	12
<b>Figure 4</b>	Part des investissements pour l'environnement dans les investissements totaux par branche de l'industrie manufacturière (%)	13
<b>Figure 5</b>	Besoins d'investissements à l'horizon 2050	15
<b>Figure 6</b>	Chroniques d'investissements dans les quatre secteurs de l'industrie étudiés	16
<b>Figure 7</b>	Niveaux et routes de production de l'acier en 2050 dans les scénarios Transition(s) 2050	17
<b>Figure 8</b>	Besoins d'investissements et niveau de production d'acier à l'horizon 2050	18
<b>Figure 9</b>	Chroniques d'investissements dans la production d'acier	19
<b>Figure 10</b>	Besoins d'investissements et niveau de production de ciment à l'horizon 2050	20
<b>Figure 11</b>	Chroniques d'investissements dans la production de ciment	21
<b>Figure 12</b>	Niveaux et routes de production des alcènes et aromatiques en 2050 dans les scénarios Transition(s) 2050	23
<b>Figure 13</b>	Besoins d'investissements et niveau de production des alcènes et aromatiques à l'horizon 2050	24
<b>Figure 14</b>	Chroniques d'investissements dans la production des alcènes et aromatiques	25
<b>Figure 15</b>	Niveaux et routes de production de l'ammoniac en 2050 dans les scénarios Transition(s) 2050	26
<b>Figure 16</b>	Besoins d'investissements et niveau de production d'ammoniac à l'horizon 2050	27
<b>Figure 17</b>	Chroniques d'investissements dans la production d'ammoniac	28
<b>Encadré 1</b>	Les Plans de Transition Sectoriels : un projet tenant compte des spécificités de chaque filière industrielle	8
<b>Encadré 2</b>	La question de l'adaptation de l'industrie au changement climatique	11
<b>Encadré 3</b>	Les statistiques disponibles n'apportent qu'un éclairage partiel sur les investissements de décarbonation réalisés par les industriels	13
<b>Encadré 4</b>	Le Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière en France	22
<b>Encadré 5</b>	Un ciblage récent des dispositifs nationaux vers les investissements de rupture dans l'industrie lourde	31



---

**I4CE** est un institut de recherche à but non lucratif qui contribue par ses analyses au débat sur les politiques publiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Nous promovons des politiques efficaces, efficientes et justes.

Nos 40 experts collaborent avec les gouvernements, les collectivités locales, l'Union européenne, les institutions financières internationales, les organisations de la société civile et les médias.

Nos travaux couvrent trois transitions – énergie, agriculture, forêt – et six défis économiques : investissement, financement public, financement du développement, réglementation financière, tarification carbone et certification carbone.

---



**INSTITUTE FOR CLIMATE ECONOMICS**  
30 rue de Fleurus - 75006 Paris

**[www.i4ce.org](http://www.i4ce.org)**  
Contact : [contact@i4ce.org](mailto:contact@i4ce.org)

Suivez-nous sur

