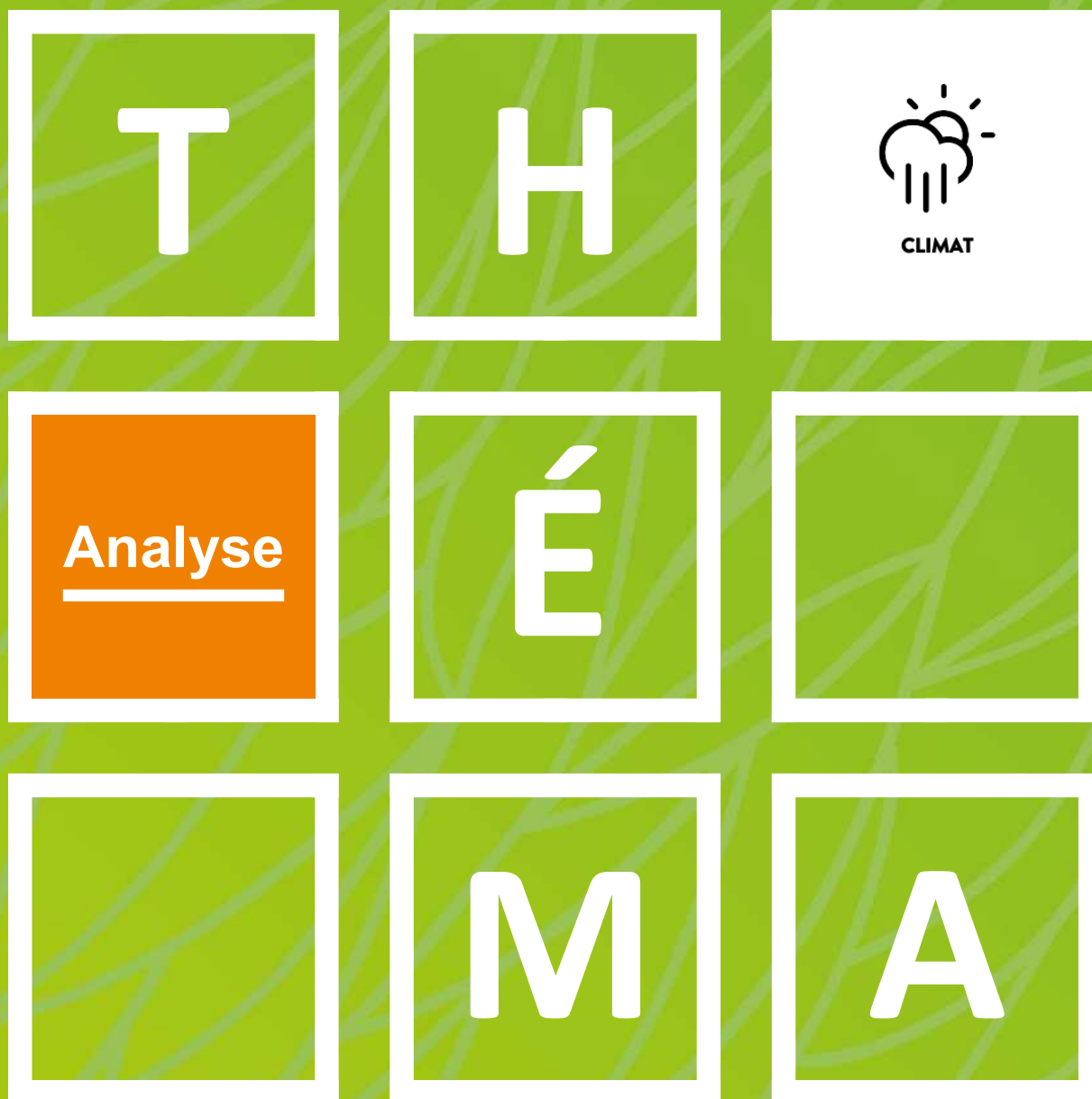




Trajectoires de transition bas carbone en France au moindre coût.

Septembre 2016



sommaire

Trajectoires de transition bas carbone en France au moindre coût.

5 – Introduction

La France s'est engagée dans une trajectoire de décarbonation de son économie avec l'objectif de diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. En pratique, cela implique de mobiliser l'ensemble des gisements de réductions d'émissions connus dans les secteurs du transport, du bâtiment, de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture et des déchets selon une chronique qui en minimise le coût.

13 – Méthodologie

L'outil D-CAM, développé par le CGDD, repose sur (i) la construction d'un scénario théorique au fil de l'eau qui servira de point de référence aux scénarios de transition bas carbone ; (ii) une base de données sur le potentiel, la vitesse de déploiement et le coût des gisements mobilisables ; (iii) un modèle de minimisation des coûts du déploiement de ces gisements.

21 – Courbes D-CAM sectorielles

L'outil D-CAM explore pour chaque secteur (énergie, transport, bâtiment, industrie, déchets, agriculture) des scénarios de décarbonation qui permettent d'atteindre les objectifs fixés par la stratégie nationale bas carbone à différents horizons temporels.

43 – Courbe agrégée et messages clés

L'approche agrégée de l'outil modifie la répartition des efforts de réductions d'émissions entre les secteurs par rapport à l'approche sectorielle. Ils augmentent fortement dans le secteur de l'énergie et diminuent dans les secteurs de l'industrie, du transport et du bâtiment. Le bilan macro de la transition bas carbone ne fait pas apparaître de surcoût évident par rapport au scénario au fil de l'eau. Les courbes D-CAM produisent des trajectoires indicatives et exploratoires de la transition.

53 - Annexes

Document édité par :

Le service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable

Remerciement : Cette étude n'aurait pas pu être réalisée sans le précieux appui fourni par l'ensemble des experts consultés tout au long de l'élaboration de l'outil D-CAM : Adrien **Vogt-Schilb** (Banque mondiale), Sandrine **Mathy** (EDDEN), Benoît **Leguet** (I4CE), Isabelle **Vincent** (ADEME), Marie-Laure **Nauleau** (ADEME), Jean-Marc **Moulinier** (MEEM/CGDD), Nicolas **Wagner** (MEEM/CGDD), Pierre **Brender** (MEEM/DGEC), Marie **Boyette** (MEEM/DGEC), Antonin **Vergez** (MEEM/DGEC), Joseph **Lunet** (MEEM/DGEC), Marjorie **Doundnikoff** (MEEM/DGEC), Thibaud **Normand** (MEEM/DGEC), Mélanie **Calvet** (MEEM/CGDD), Olivier **Gavaux** (MEEM/DGITM), Hélène **Le Maître** (MEEM/DGITM), Anne **Le Maout** (MEEM/DHUP)

contributeurs

BPF

**Baptiste Perrissin
Fabert**

Economiste du climat

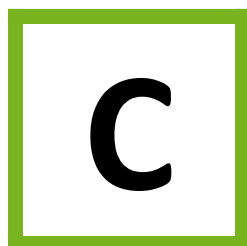
baptiste.perrissin-fabert@developpement-
durable.gouv.fr

AF

Alexis Foussard
Doctorant au Laboratoire de
Météorologie Dynamique

alexis.foussard@orange.fr

avant-propos



ette publication dans la collection Thema - analyse du CGDD présente un outil original, unique en France, de modélisation des transformations nécessaires du système productif français pour atteindre l'objectif d'une division par 4 des émissions de GES d'ici 2050 au moindre coût.

Les potentiels des gisements de réduction d'émissions connus dans les secteurs du transport, du bâtiment, de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture et des déchets sont suffisants pour décarboner l'économie française. Ces gisements prennent la forme de technologies plus efficaces, de nouvelles sources d'énergie mais aussi de mesures comportementales. Le défi pour les pouvoirs publics et les acteurs sectoriels de la transition bas carbone consiste alors à mobiliser, parmi ces gisements, ceux qui permettent d'atteindre l'objectif selon une chronique de déploiement et une répartition sectorielle qui en minimise le coût.

Cet outil permet, en première approche, de (i) élaborer des scénarios agrégés ou sectoriels de transition bas carbone (ii) pointer les risques et les coûts de verrouillages technologiques indésirables qui empêcheraient d'atteindre l'objectif du facteur 4.

Il a été conçu pour faire dialoguer dans un cadre cohérent des visions du monde divergentes sur les scénarios de décarbonation de l'économie. La transparence de la base de données utilisée est ainsi un élément déterminant de la crédibilité, de l'acceptation et de la pertinence des messages de l'outil. Il a vocation à devenir un outil de référence du débat public sur la transition bas carbone.

Laurence Monnoyer-Smith

Commissaire générale au développement durable

Introduction

La France s'est engagée dans une trajectoire de décarbonation de son économie avec l'objectif de diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. En pratique, cela implique de mobiliser l'ensemble des gisements de réductions d'émissions connus dans les secteurs du transport, du bâtiment, de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture et des déchets selon une chronique qui en minimise le coût.



LE DÉFI DE LA TRANSITION BAS-CARBONE

La France s'est engagée dans une trajectoire de décarbonation de son économie. La loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) a confirmé l'objectif du facteur 4 en 2050 qui consiste en une division par 4 des gaz à effet de serre (GES) émis sur le territoire national par rapport au niveau d'émission de 1990. Les émissions seraient ainsi réduites à 140 MtCO₂eq/an contre 480 Mt/an en 2012. La France, faisant déjà partie des pays de l'OCDE les moins intensifs en carbone, veut contribuer ainsi de façon exemplaire à l'effort international de lutte contre les dérèglements climatiques. De multiples co-bénéfices justifient également la transition bas carbone : sécurité énergétique, qualité de l'air, nouveaux emplois, nouveaux marchés, compétitivité hors prix.

En pratique, la cible du facteur 4 implique une profonde transformation du système productif qui repose encore, pour une large part, sur les énergies fossiles. Une telle transformation est toutefois possible. Les potentiels des gisements de réduction d'émissions connus dans les secteurs du transport, du bâtiment, de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture et des déchets sont suffisants pour décarboner l'économie française. Ces gisements prennent la forme de technologies plus efficaces, de nouvelles sources d'énergie mais aussi de changements de comportements. Le défi pour les pouvoirs publics et les acteurs sectoriels de la transition bas carbone consiste alors à mobiliser, parmi ces gisements, ceux qui permettent d'atteindre l'objectif selon une chronologie de déploiement et une répartition sectorielle qui en minimise le coût.

La stratégie nationale bas carbone prévue par la LTECV, décline à l'échelle sectorielle, sur la base de scénario prospectifs, des budgets carbone quinquennaux indicatifs qui donneront à la trajectoire de long terme du facteur 4 des points de passages intermédiaires réalistes et ajustables en fonction des nouvelles informations disponibles. Pour favoriser l'acceptabilité et l'appropriation des objectifs sectoriels par les acteurs de la transition, la stratégie est soumise à l'avis des parties prenantes du conseil national de la transition écologique (CNTE). Cet exercice prospectif, ascendant (*bottom up*), s'appuie sur des expertises sectorielles, des travaux de modélisation à la fois méso et macro-économiques qui prennent en considération les interactions entre secteurs et l'effet de la transition bas carbone sur l'activité économique et l'emploi.

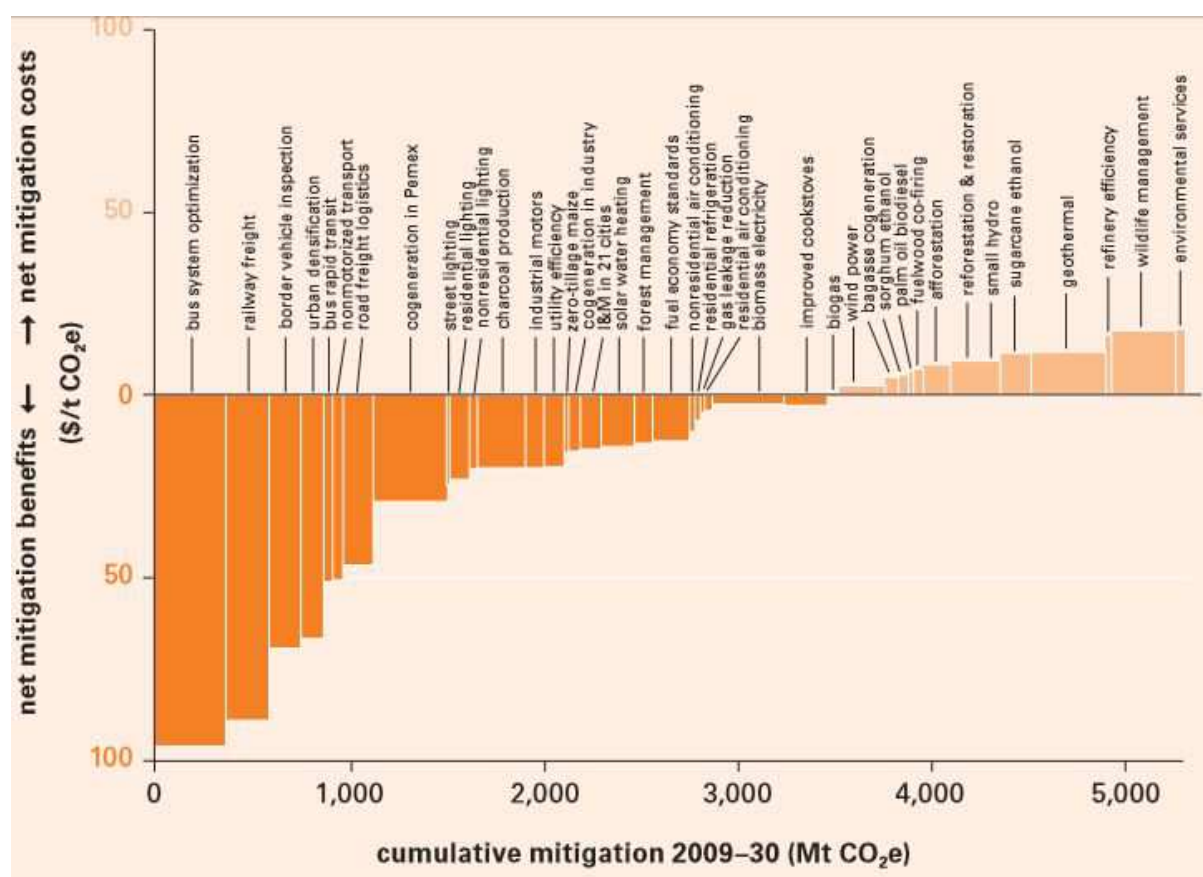
L'exercice beaucoup plus descendant (*top down*) de construction d'un outil de suivi de la dynamique des coûts d'abattement moyens qui est présenté dans cette étude du CGDD, fournit quant à lui des informations plus frustes qui sont toutefois utiles, en première approche, pour :

- nourrir des scénarios agrégés ou sectoriels de transition bas carbone ;
- offrir des points de comparaison « objectifs » aux budgets carbone retenus par la stratégie bas carbone ;
- apprécier la cohérence des points de passage fixés par la stratégie bas carbone avec l'objectif de long terme du facteur 4 en pointant les risques et les coûts de verrouillages technologiques indésirables ;
- définir des chroniques de déploiement efficient des mesures de réduction d'émissions ;
- estimer des surcoûts éventuels d'une trajectoire bas carbone par rapport à un scénario au fil de l'eau et calibrer ainsi des niveaux de subvention pour faciliter la transition.

LES COURBES DE COÛT MARGINAL D'ABATTEMENT

Les courbes de coût marginal d'abattement (plus connues sous l'acronyme anglais « *MACC* » pour *marginal abatement cost curves*) sont largement utilisées pour informer le débat climatique sur les gisements disponibles de réductions d'émissions de GES et leur coût. Le succès et l'intérêt de ces courbes reposent, en partie, sur leur capacité à synthétiser, sous une représentation unique, un ensemble complexe d'information : nature des gisements de réductions d'émissions de GES, quantité d'émissions évitées, classement des gisements selon leur coût moyen sur une période donnée. Elles existent à l'échelle de pays (figure 1), voire à l'échelle mondiale (McKinsey, 2009).

Figure 1 : Exemple de MACC établie pour le Mexique (Johnson et al., 2010)



Lecture : L'axe des abscisses indique des quantités cumulées de réduction d'émissions de gaz à effet de serre entre 2009 et 2030. L'axe des ordonnées exprime le coût moyen sur cette même période de différentes mesures de réductions d'émissions. Ces mesures de réduction d'émission de gaz à effet de serre sont classées sur l'axe des abscisses selon un ordre de coût marginal croissant.

Ces courbes sont souvent construites dans une approche dite « ingénieure » ou « experte », en cherchant à isoler les coûts associés à une mesure ou une technologie particulière de réduction d'émissions (à l'inverse des MACC dérivées de modèle macro-économiques, construites en faisant varier un prix du CO₂). Si ces courbes permettent une représentation simple d'un ensemble de gisements de réduction ordonnés selon une métrique de coûts ou de bénéfices nets par rapport à un scénario au fil de l'eau, la lecture des résultats doit se faire en gardant à l'esprit la méthodologie de construction de la courbe pour éviter toute surinterprétation des résultats.

En particulier, les courbes de coût marginal d'abattement, telles qu'elles ont été popularisées par McKinsey, sont construites selon une logique de coûts croissants (« *lowest cost first* »), pour un horizon temporel fixé : ces courbes indiquent un ensemble de mesures de réduction à mobiliser continûment d'aujourd'hui à l'année cible, afin de minimiser le coût total d'abattement permettant d'atteindre un objectif donné de réduction de gaz à effet de serre. Néanmoins, ces courbes présentent une vision très statique des réductions d'émissions. Elles donnent une idée du potentiel de réduction d'émissions sur une période donnée mais ne renseigne pas sur les chemins à emprunter pour atteindre l'objectif fixé à l'année cible. Notamment, interpréter une MACC comme une courbe « d'ordre de mérite » - qui indiquerait de déployer les mesures de la moins chère à la plus chère – revient à faire abstraction de toutes les dimensions temporelles du déploiement d'un gisement de réduction d'émissions, et à considérer que chaque potentiel peut être instantanément exploité.

L'action publique a ainsi besoin pour séquencer une stratégie de transition bas carbone d'un outil plus complet que des courbes de coût marginal d'abattement qui fournissent seulement une illustration sommaire des coûts relatifs de différents gisements de réduction d'émissions. Hiérarchiser les mesures selon les coûts marginaux de réduction d'émission à une date donnée ne renseigne ni sur les dates de démarrage de l'exploitation de chacun des gisements, ni sur les rythmes souhaitables de diffusion des technologies. Poser des jalons intermédiaires pour une stratégie de réduction des émissions de GES nécessite de se pencher davantage sur les aspects temporels de mobilisation des gisements.

Quelques précautions méthodologiques sont nécessaires pour interpréter les résultats d'une courbe de coût marginal d'abattement. Répondre au préalable aux questions suivantes permet d'en éviter les principaux pièges (Kesicki & Ekins, 2012) :

- Quelle a été la méthode d'estimation des coûts ?
- Quelles interactions entre mesures ont été ou non prises en considération ?
- Quels sont le ou les horizon(s) temporel(s) visé(s) par la courbe de coûts ?

ÉLABORATION D'UNE « COURBE DYNAMIQUE DE COÛTS D'ABATTEMENT MOYENS » (D-CAM) EN FRANCE

La SNBC qui vise l'objectif de long terme du facteur 4 en 2050 procède par étape à travers des budgets carbone quinquennaux. Elle donne des points de passage intermédiaires à différents secteurs en fonction d'objectifs inscrits dans la loi et de l'appréciation des contraintes sociales, techniques et économiques auxquelles ils font face. Prises isolément, les courbes de coût

marginal d'abattement ne donnent pas d'indication sur la manière d'articuler ces points de passage avec un objectif de long terme.

Vogt et Hallegatte (2011, 2014) ont développé, à partir de courbes de coûts d'abattement, un outil de planification d'une transition bas carbone conçu pour comparer des potentiels de gisements de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et définir l'ensemble des gisements à mobiliser au cours du temps pour atteindre un objectif de réduction, au moindre coût, à une date donnée. La représentation graphique des résultats allie dans une même figure (voir figure 2) :

- une « courbe de coût d'abattement moyen (CAM) » avec les coûts moyens en abscisses et les réductions d'émissions en ordonnées (à l'inverse des *MACC* usuelles) ;
- une courbe de dynamique temporelle (D) des émissions qui décompose l'évolution des réductions d'émissions en comparaison à un scénario d'émissions au fil de l'eau dans lequel les émissions croissent comme l'activité économique. Cette courbe est communément appelée courbe en « coins » (*wedge curve*).

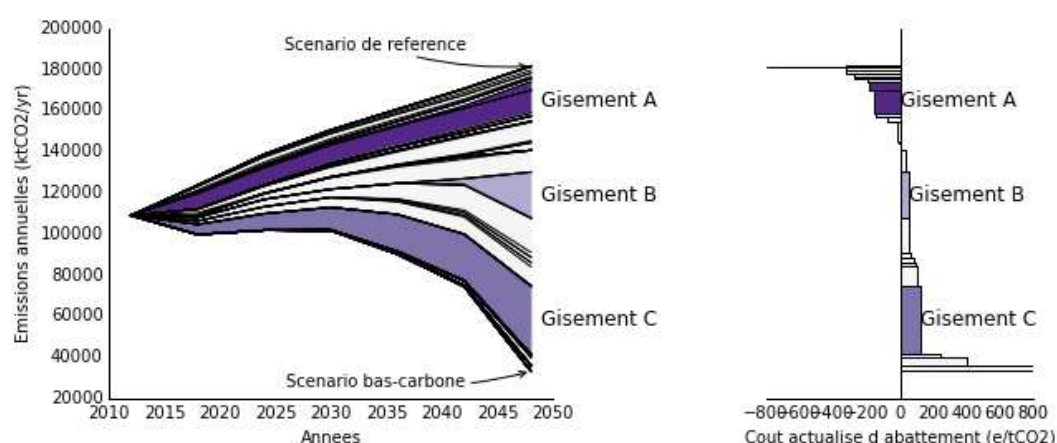
Chaque « coin » correspond au déploiement d'une mesure d'abattement (A, B et C dans la figure 2) qui comme le coin d'un bucheron entaille progressivement le niveau d'émission du scénario au fil de l'eau. Le coût moyen de chaque mesure sur la période considérée est représenté sous forme de bâton horizontal au sein de la courbe CAM inversée. La construction des courbes, à l'échelle sectorielle ou agrégée, repose sur l'estimation de coûts pour chaque gisement de réduction d'émissions par rapport à un scénario d'évolution des émissions de GES au fil de l'eau. L'ensemble de ces coûts sur la période considérée rapportés aux tonnes de CO₂ évitées par le gisement considéré donne le coût moyen du gisement. Ce sont, en réalité, ces coûts moyens qui sont classés par ordre croissant dans une courbe dite de « coût marginal d'abattement ».

Chacune des mesures/technologies d'atténuation est caractérisée par : (i) le gisement potentiel de réduction d'émission à l'horizon considéré, (ii) la vitesse de déploiement de l'action envisagée et (iii) un coût (variable au cours du temps) par rapport à une technologie moyenne comparable d'un scénario au fil de l'eau.

La qualité de la base de données utilisée pour construire les courbes D-CAM est ainsi tout à fait critique. La constitution de cette base doit faire l'objet de discussions transparentes entre parties prenantes d'une stratégie bas carbone pour que la courbe D-CAM délivre des messages pertinents et appropriables. Cet outil peut alors fournir des points de comparaison utiles aux options retenues par la stratégie.

Il permet, en effet, de visualiser, sur un même graphique (figure 2) des scénarios de pénétration des gisements de réduction d'émissions (à gauche, « *wedge curve* » ou courbe dynamique d'abattement) associés à leur coût (à droite, courbe CAM) et à un horizon temporel donné. Son analyse renseigne sur l'ensemble des solutions technologiques à mobiliser pour atteindre les objectifs d'atténuation fixés et non sur l'ordre de mérite du déploiement de ces gisements.

Figure 2: Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens



Lecture : A gauche de la figure, la courbe en coins indique la dynamique de déploiement des gisements de réduction d'émissions entre 2010 et 2050 pour atteindre l'objectif fixé dans le scénario bas carbone. Les trois principaux coins sont les gisements A, B et C. A droite de la figure, la courbe de coûts d'abattement moyens classe ces gisements selon un coût croissant.

L'outil n'a pas vocation à fournir une hiérarchie des solutions à mettre en œuvre, mais à illustrer un ensemble de gisements qu'il est possible de mobiliser pour atteindre un facteur 4, et à mettre au jour des possibles contradictions entre objectifs de court terme et de long terme.

LES MESSAGES CLÉS DÉLIVRÉS PAR L'OUTIL D-CAM

Il est essentiel de bien délimiter le périmètre de pertinence de ces courbes qui renvoie une image stylisée d'un chemin efficace de la transition bas carbone sans pour autant fournir d'indication sur les instruments de mise en œuvre d'une telle transition. L'attrait visuel de ces courbes, et leur ressemblance avec des courbes d'offre de production électrique a pu conduire à des erreurs d'interprétation en termes d'ordre de mérite. L'usage abusif du terme « marginal » a pu encourager les promoteurs de ces courbes à en déduire des niveaux souhaitables de taxe carbone.

La version « enrichie » des courbes D-CAM qui fait correspondre des dynamiques de réduction d'émissions à des mesures d'abattement est un meilleur outil de représentation des gisements de réduction d'émissions à mobiliser au cours d'une trajectoire de transition bas carbone mais ne peut être utilisée pour formuler directement des prescriptions de politiques, ni des chroniques précises du déploiement de telle ou telle technologie. L'ensemble des barrières au déploiement des mesures est censé par exemple être capté par un paramètre de « vitesse » de déploiement qui demeure toutefois bien fruste au regard de la complexité réelle des secteurs.

C'est pourquoi, elles doivent être conçues avant tout comme un instrument de dialogue entre les parties prenantes de la transition bas carbone. En utilisant différents jeux de données fondés sur

des expertises divergentes, elles permettent de visualiser les effets de différentes visions du monde sur le rythme et les options efficaces à mobiliser pour la transition bas carbone. La transparence de la base de données utilisée est ainsi un élément déterminant de la crédibilité, de l'acceptation et de la pertinence de l'outil.

Encadré 1 : Comment lire et interpréter une D-CAM

Afin d'éviter toute manipulation des messages tirés de courbes D-CAM, il est essentiel de clarifier ce qu'elles peuvent et ne peuvent pas dire.

Les courbes D-CAM ne disent pas :

- ce qu'est le coût marginal d'abattement, soit le coût de la dernière tonne de CO₂ évité pour atteindre un objectif donné ;
- qu'il faut déployer les mesures d'abattement par ordre de mérite (excepté pour les mesures à coûts négatifs qu'il faut mobiliser d'emblée pour minimiser le coût de toute stratégie bas carbone) ;
- la trajectoire de la taxe carbone qui permettrait de déclencher l'ensemble des mesures requises pour atteindre un certain objectif ;
- les co-bénéfices d'une mesure d'abattement ;
- les barrières qui limitent la vitesse de déploiement des mesures.

Les courbes D-CAM délivrent, en revanche, le type de messages suivants :

- la courbe de coût moyen révèle des gisements à coûts négatifs, qui peuvent ne pas être perçus spontanément (déficit d'information, évolutions des coûts à la baisse sur la période considérée, différence de taux d'actualisation privé/public, TRI inférieur à celui d'autres investissements jugés plus prioritaires par les entreprises) et devraient être déployés le plus rapidement possible (Gisement A de la figure 2) ;
- les options de réduction d'émissions retenues pour atteindre des objectifs intermédiaires doivent éviter de conduire à un « verrouillage » technologique qui obérerait le futur. Par exemple, améliorer seulement l'efficacité des véhicules thermiques classiques pour atteindre un objectif de moyen terme peut retarder l'atteinte d'une décarbonation totale des transports si aucun effort de R&D n'est fourni en parallèle pour des véhicules à zéro émission. Les options retenues à court terme doivent au contraire préparer les étapes suivantes, pour en réduire le coût et en maximiser les co-bénéfices.
- l'association des courbes temporelles et de coûts moyens permet de mettre en évidence la chronologie efficiente des gisements à mobiliser entre aujourd'hui et la date cible de l'objectif, soient les gisements A et C immédiatement puis le gisement B
- des technologies coûteuses à diffusion lente (Gisement C) doivent être déployées en même temps que des technologies à coût d'abattement faible voire négatif (et qui peuvent avoir une diffusion tout aussi lente) (Gisement A), et même avant des gisements à coût moyen plus faible mais à diffusion plus rapide (Gisement B) afin d'atteindre l'objectif de long terme. La courbe D-CAM facilite cette mise en perspective et contribue à la cohérence dynamique des options de réduction d'émissions.

Introduction

Les courbes D-CAM sont ainsi des instruments exploratoires d'une stratégie bas carbone qui permettent de planifier les étapes d'un déploiement optimal – du point de vue des coûts – de différents gisements de réduction des émissions de GES. La séquence précise de ce déploiement ne peut être qu'indicative, car elle repose intégralement sur le paramètre de vitesse de diffusion dont la calibration est entourée de larges incertitudes.

Partie 1

Méthodologie

L'outil D-CAM (popularisé en anglais sous l'acronyme « MACC » pour *marginal abatement cost curves*), développé par le CGDD, repose sur (i) la construction d'un scénario théorique au fil de l'eau qui servira de point de référence aux scénarios de transition bas carbone ; (ii) une base de données sur le potentiel, la vitesse de déploiement et le coût des gisements mobilisables ; (iii) un modèle de minimisation des coûts du déploiement de ces gisements.



La construction de l'outil D-CAM repose sur des hypothèses, à la fois sur le scénario au fil de l'eau, et sur l'ensemble des gisements mobilisables.

CONSTRUCTION D'UN SCÉNARIO THÉORIQUE « AU FIL DE L'EAU »

Au sein du scénario théorique « au fil de l'eau », les technologies utilisées dans les différents secteurs sont supposées ne pas évoluer entre 2012 et 2050. Tous les secteurs conservent ainsi la même intensité énergétique et la même intensité carbone : une même « technologie de référence » est utilisée sur toute la période, qui est caractérisée par la moyenne des coûts unitaires et des émissions unitaires des technologies qui remplissent en 2012 un même service.

L'évolution de chaque secteur dans le scénario au fil de l'eau repose sur la projection de la demande (exprimée en kWh, en t.km transportées...) jusqu'en 2050 en tenant compte des hypothèses macroéconomiques qui guident l'ensemble des scénarios de la stratégie nationale bas carbone (SNBC) : population, croissance du PIB, et répartition de la valeur ajoutée entre les différents secteurs¹. Aucune hypothèse n'implique une baisse massive de la production industrielle ou de la production agricole.

Les émissions sont projetées à partir de cette demande, en conservant le ratio CO₂ / demande de 2012. Elles sont supérieures aux trajectoires des scénarios tendanciels (tels que le scénario « avec mesures existantes » de la SNBC) qui intègrent déjà plusieurs mesures de réduction des émissions.

Les technologies du scénario au fil de l'eau sont donc en principe « gelées » mais le modèle prévoit la possibilité de faire évoluer (ou non) au cours du temps deux types de coûts :

- le coût du MWh électrique peut augmenter avec le remplacement des centrales nucléaires par des EPR ;
- le coût de construction des logements qui n'est pas figé au coût moyen du parc actuel mais évolue selon la part grandissante des nouveaux logements qui sont tous supposés, dans le scénario au fil de l'eau, présenter les caractéristiques des logements neufs de 2012.

Ce scénario au fil de l'eau conduit à des émissions annuelles de 561 Mt en 2035 contre 464 Mt dans le scénario « avec mesures existantes » de la SNBC (hors UTCF). Il s'agit donc d'un scénario fictif qui représente toutefois un point de référence moins contestable qu'un scénario qui intégrerait les effets des mesures existantes. Il révèle en outre que les mesures existantes ont bel et bien en effet à la baisse sur les émissions.

DONNÉES D'ENTRÉE

Gisements

Une série de gisements de réduction a été identifiée pour chaque secteur à partir d'une revue de la littérature académique et grise, ainsi qu'à l'aide d'entretiens complémentaires avec des experts

¹ Ces hypothèses sont faites seulement sur la période 2010-2035 dans la SNBC. Sur la période 2035-2050, ce sont les projections de la commission européenne (« Trends to 2050 », 2013) qui ont été directement utilisées.

sectoriels (AIE, 2015 ; ADME, 2012 ; INRA, 2013). Ces gisements peuvent ainsi correspondre à des technologies plus efficaces (la voiture thermique à 2L. au 100km), à des changements de carburants (la voiture électrique), à des changements de comportement (co-voiturage, télétravail) et enfin à des changements de structure de la demande (report modal vers les transports collectifs). Au total, 578 gisements de réduction d'émissions sont pris en considération.

Potentiels

Chacun de ces gisements a un potentiel maximal d'utilisation, et une vitesse maximale de déploiement. Le potentiel de réduction va être déterminé à la fois par le potentiel d'utilisation de la technologie, et la réduction d'émissions unitaires par rapport à la technologie de référence. Ces émissions unitaires peuvent diminuer au cours du temps compte tenu de l'efficacité énergétique associée à du progrès technique et de la décarbonation de la source d'énergie utilisée. Seules sont considérées les émissions sur le territoire national : le travail n'est pas effectué en analyse de cycle de vie (les émissions liées aux phases de construction ne sont par exemple pas attribuées aux secteurs du résidentiel ou de la production d'énergie).

Vitesses

Pour l'estimation des vitesses de déploiement, plusieurs méthodes ont été utilisées. Chaque scénario prospectif intègre implicitement des contraintes sur la diffusion des gisements qu'il exploite. À partir de ces scénarios de diffusion, une vitesse peut alors être extraite : elle correspond par exemple au scénario de diffusion le plus rapide, qui pourra servir de valeur de référence, intégrant un large ensemble de contraintes : barrières réglementaires, freins liés à l'acceptabilité sociale, des contraintes techniques telles que la nécessité de développement d'un réseau ou le manque de main-d'œuvre qualifiée.

Pour certaines technologies au taux de remplacement rapide (véhicules, appareils de chauffage), il a été considéré que l'ensemble du parc pouvait être renouvelé sur la durée de vie typique de la technologie (par exemple 15 ans pour le parc automobile). Cela limite la vitesse de diffusion à court terme, tandis que sur le long terme la diffusion résultera du moment optimal pour atteindre les objectifs au moindre coût.

Pour d'autres technologies amenées à se déployer à une échelle mondiale (capture et stockage du carbone par exemple), les rythmes de diffusion sont issus de références internationales. Cela revient à supposer que les efforts de recherche et de développement dans ces secteurs, qui impliquent des baisses de coûts et le déploiement à une échelle commerciale, sont majoritairement faits au niveau mondial, de manière exogène.

Coûts

Les mesures ont également un coût associé, qui se décompose en un investissement initial, et un coût annuel d'exploitation. Rapportées à la durée de vie de la technologie, les mesures ont un coût actualisé, qui permet 1) d'obtenir le surcoût par rapport à la technologie moyenne utilisée dans le scénario au fil de l'eau pour remplir un service équivalent (production de 1 kWh d'électricité ou chauffage de 1 m² de logement), et 2) de comparer des gisements ayant des durées de vie différentes. Le calcul de minimisation du coût d'atteinte de l'objectif (exemple : -40 % d'émissions de CO₂eq en 2030 par rapport à 1990) est réalisé à partir du point de vue d'une autorité publique. Pour cela, les coûts unitaires sont considérés hors taxes, et le taux d'actualisation choisi est de 4,5 %, ce qui correspond au taux d'actualisation public ajusté du risque (rapport Gollier, 2011). Dans les résultats qui

suivent, seuls les coûts financiers ont été pris en considération (indépendamment des externalités, ou des gains de temps pour le secteur des transports par exemple). Enfin, les prix des ressources fossiles sont issus du scénario « New policies » de l'AIE (2014).

Il n'y a pas d'hypothèse sur le prix du carbone dans le système d'échange de quotas européen. Les coûts de réduction dans les secteurs soumis aux quotas sont ainsi surestimés. Il n'y a pas non plus d'hypothèse sur le renchérissement de la composante carbone des taxes sur la consommation des produits énergétiques ce qui conduit à surestimer les coûts de réduction des émissions de sources diffuses (transport, chauffage individuelle). Introduire une tarification du carbone pourrait faire l'objet d'un développement futur de l'outil.

COURBE DYNAMIQUE (D) D'ABATTEMENT EN ÉMISSIONS ANNUELLES

Les émissions après abattement (le graphique de gauche sur les figures présentées plus loin) sont le résultat d'une minimisation des coûts actualisés sur l'ensemble de la période des gisements qui permettent d'atteindre un objectif d'émissions à l'horizon 2050. L'encadré 2 décrit le programme d'optimisation qui est utilisé. L'outil permet également de chercher à respecter d'autres contraintes annexes d'émissions, telles qu'un budget CO₂ (c'est-à-dire les émissions cumulées) sur la période 2012-2050, ou des points de passage intermédiaires sectoriels ou globaux. Les contraintes supplémentaires peuvent notamment être issues du rapport du Comité trajectoire (2011) qui propose des points de passages intermédiaires et des objectifs finaux en 2050 pour chaque secteur émetteur, de manière à atteindre un facteur 4 en 2050. D'autres contraintes, inscrites dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte ont également été imposées, telles que la baisse des capacités nucléaires de production d'électricité.

L'optimisation indique, pour chaque secteur, quelles sont les utilisations de l'ensemble des technologies qui ont pu être recensées. Dans le scénario « au fil de l'eau », ces parts restent constantes alors que dans le scénario de réduction d'émissions, des technologies plus sobres en carbone se développent, avec un surcoût (ou parfois un bénéfice) net associé. Cette approche est complémentaire de l'exercice de scénarisation réalisé en amont de la SNBC qui comprend une évaluation des impacts macro-économiques des scénarios construits, et en particulier de celui servant de référence à la SNBC.

Les différences d'émissions entre les deux scénarios sont décomposées en différents gisements. Un gisement est associé à chacune des technologies bas-carbone qui peut se déployer entre 2012 et 2050. Il prend en considération à la fois la diffusion de la technologie en remplacement des technologies de 2012, et la réduction de ses émissions unitaires au cours du temps.

Encadré 2 : Description de l'outil utilisé pour construire les courbes

L'outil est programmé à l'aide du logiciel libre python. Il permet de construire, à partir de la base de données sur les technologies/mesures et le scénario au fil de l'eau, une trajectoire au moindre coût et de produire la représentation graphique des « coins » et des coûts d'abattement moyens associés. La minimisation porte sur une variable qui recense, année par année, l'utilisation $u_{i,t}$ de chacune des technologies/mesures i à la date t renseignées dans la base. Cette optimisation est faite sous plusieurs types de contraintes (où c et e désignent respectivement les coûts et les émissions unitaires).

Le potentiel maximum d'utilisation de chacune des technologies/mesures s'écrit :

D'une année sur l'autre, l'augmentation $u_{i,t} < A_{max,i}$ de l'utilisation des technologies/mesures est limitée par une vitesse de diffusion $V_{max,i}$. La vitesse maximale de diffusion s'écrit ainsi :

$$u_{i,t+1} \leq u_{i,t} + V_{max,i}$$

L'ensemble des technologies d'un secteur doit permettre de répondre à la projection de sa demande :

$$\sum u_{i(secteur),t+1} = D_{secteur,t}$$

Une contrainte (GES_{max}) sur les émissions totales en 2050, avec possibilité d'ajouter d'autres points de passage, est introduite de la façon suivante :

$$\sum u_{i,2050} \cdot e_{i,2050} \leq GES_{max},$$

Avec, $e_{i,2050}$ les émissions unitaires de la technologie i en 2050.

Des contraintes existent par ailleurs sur les équilibres entre offre et demande des différents vecteurs énergétiques.

La minimisation des coûts pour atteindre l'objectif de GES en 2050 porte alors sur une somme du type :

$$\sum_{i,t} \frac{u_{i,t} \cdot c_{i,t}}{(1+r)^t}$$

avec r le taux d'actualisation choisi.

Le vecteur des $u_{i,t}$ qui permet de remplir les contraintes au moindre coût donne ainsi la chronique des utilisations de chacune des technologies au cours du temps.

La surface occupée par un gisement (« coin ») représente les émissions cumulées évitées sur la période 2012-2050 qu'on peut attribuer à cette mesure ou technologie. Cette surface n'est pas proportionnelle à l'utilisation de la technologie au cours du temps, mais aux réductions de GES qui lui sont attribuées selon la méthode LMDI (voir encadré 3). Cette méthode permet de prendre en considération l'effet des interactions au cours du temps entre l'efficacité énergétique et le contenu carbone de l'énergie sur les potentiels des gisements de réduction d'émission. Par exemple, le

potentiel de réduction du télétravail diminue avec l'efficacité énergétique des véhicules. La surface restante en dessous de l'ensemble des coins représente la trajectoire des émissions résiduelles de GES au cours du temps dans le scénario « bas carbone » analysé.

Encadré 3 : Décomposition des gisements « LMDI »

La méthode de décomposition Log-Mean Divisia Index (LMDI) est utilisée pour attribuer les réductions d'émissions à différents gisements qui peuvent interagir (changement de la structure d'activité, efficacité des nouvelles technologies, décarbonation des vecteurs énergétiques). Par exemple, les réductions liées au télétravail ou au transport ferroviaire se réduisent à mesure que les émissions unitaires des véhicules particuliers diminuent (voir l'évolution des « coins » dans la figure 6 qui représente le secteur du transport). Cette interaction doit être prise en considération pour allouer au cours du temps les réductions d'émission des différents gisements du secteur des transports.

La méthode générale consiste (Kesicki & Anandarajah, 2011) à écrire les émissions totales E d'un secteur i comme une somme de produits de facteurs, chacun associés à une des technologies :

$$E_i = \sum_j (a_i * s_{ij} * f_{ij} * e_{ij})$$

Les facteurs étant respectivement : a_i l'activité du secteur, s_{ij} la part des différentes technologies j utilisées, f_{ij} l'intensité énergétique de chacune d'entre elles, et e_{ij} le contenu en CO₂ de l'énergie.

Les réductions d'émissions sont alors décomposées selon ces quatre facteurs x_i avant d'être attribuées aux technologies sous jacentes, suivant la formule générale :

$$\Delta E_x = \sum_j (E_{i,BC} - E_{i,0})(\log E_{i,BC} - \log E_{i,0}) \cdot \ln(x_{i,BC}/x_{i,0})$$

Où l'indice 0 désigne le scénario au fil de l'eau, l'indice BC le scénario bas carbone, et E_x les réductions d'émissions attribuées au facteur x .

REPRÉSENTATION DES COÛTS D'ABATTEMENT MOYENS (CAM)

À chaque mesure est associé le coût actualisé net de la tonne de CO₂eq évitée (IPCC, 2014). Ce coût correspond au rapport entre la différence de coût total actualisé entre la technologie bas-carbone et la technologie correspondante utilisée dans le scénario au fil de l'eau, et les émissions évitées (totales actualisées) grâce à cette mesure. Les coûts et les abattements engagés au-delà de 2050 (notamment pour les technologies qui ont de longues durées de vie) sont également pris en considération.

Certaines technologies ont des coûts qui diminuent fortement au cours du temps, de sorte que le coût actualisé de la tonne peut être différent du coût marginal d'abattement en 2012 ou de celui en 2050 (le coût des batteries de véhicules électriques est par exemple divisé par deux au bout de dix ans). Cette baisse de coûts est considérée comme exogène : elle ne dépend pas de la manière dont la technologie se diffuse sur le territoire national.

Les mesures peuvent être classées par commodité de lecture selon les coûts croissants (de haut en bas), mais il ne s'agit pas d'une courbe de mérite, qui donnerait l'ordre de priorité de mobilisation des gisements. Les courbes d'abattement obtenues montrent que l'ordre de mise en œuvre des mesures ne suit pas nécessairement celui des coûts, en raison des vitesses de déploiement limitées et différentes des gisements. Cet ordre de mise en œuvre résulte d'une minimisation de coûts sur toute la période. **Aux points de passage intermédiaires, certains gisements à coût d'abattement relativement plus élevé que d'autres doivent déjà être partiellement mobilisés pour garantir l'atteinte de l'objectif de long terme.**

La hauteur du bâton correspond au coût moyen de la tonne de CO₂eq évitée pour ce gisement sur l'ensemble de la période. Sa largeur indique les émissions évitées à la dernière année considérée.

Encadré 4 : Code couleur utilisé pour l'ensemble des figures

	Gisements comportementaux
	Gisements liés à structure de la demande
	Efficacité énergétique
	Changement de source d'énergie
	Décarbonation des vecteurs énergétiques
	Capture et/ou stockage des GES
	Autres
	Hachures : fortes incertitudes sur les coûts

Partie 1 : Méthodologie

Partie 2

Courbes D-CAM sectorielles

L'outil D-CAM explore pour chaque secteur (énergie, transport, bâtiment, industrie, déchets, agriculture) des scénarios de décarbonation qui permettent d'atteindre les objectifs fixés par la stratégie nationale bas carbone à différents horizons temporels.



COURBE D-CAM DU SECTEUR DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE

Calibration des paramètres et des contraintes utilisées pour l'optimisation

La projection de la Commission européenne utilisée pour le scénario au fil de l'eau pour le seul secteur français de l'énergie donne une activité qui se stabilise au cours du temps. Afin d'obtenir une courbe agrégée entre tous les secteurs, la production du secteur de l'énergie est ajustée de manière à équilibrer les demandes des secteurs consommateurs.

La courbe de la figure 3 est calculée sur cette projection du scénario au fil de l'eau de manière à atteindre l'objectif sectoriel proposé par le comité trajectoire (-96 % d'émissions en 2050 sur l'électricité, -85 % sur les autres énergies). Le secteur de l'énergie regroupe à la fois la production d'électricité et de chaleur, et la raffinerie.

Pour le secteur de la production électrique, l'ensemble des moyens de production ne sont pas équivalents compte tenu de la nécessité d'un équilibre à chaque instant entre offre et demande. Cet équilibre est assuré par la présence de capacités de base et de capacités de pointe. Ces dernières, également appelées capacités pilotables, sont à l'origine de l'essentiel des GES du secteur en raison de la mobilisation de centrales à flamme. Pour représenter l'équilibre pointe/base, il a été considéré de façon simplificatrice qu'une partie fixe (16 %) de l'énergie produite devait l'être par des capacités rapidement pilotables (centrales à flamme, station de transfert et de pompage, barrages). Le choix de ce ratio correspond à celui observé aujourd'hui. Réduire les émissions de GES dans le secteur de l'énergie revient ainsi à décarboner les capacités de pointe qui sont responsables de la quasi intégralité des émissions du secteur de l'énergie.

L'objectif du secteur est d'atteindre un niveau d'émissions en 2050 de 4,2 Mt/an, soit une réduction de 93 % des émissions par rapport au niveau de 1990 (60.1 Mt/an)

Résultats

La figure 3 montre que l'objectif de réduction d'émission est atteint en substituant les énergies fossiles pour produire de la chaleur et de l'électricité par de la biomasse (en généralisant la cogénération chaleur/électricité), des biogaz ou des gaz de synthèse et en mobilisant des gisements de capture et stockage du carbone (CCS). La quasi intégralité des gisements de réductions d'émissions utilisés en 2050 a un coût moyen inférieur à 150€/tCO₂. La courbe dynamique des émissions indique qu'il est efficace d'amorcer les efforts de réduction d'émissions en 2025 et de les accélérer franchement en 2030.

Le recours systématique aux technologies BECCS (bio-énergie avec capture et stockage du carbone) permettrait même d'aller plus loin que l'objectif fixé et de réaliser des émissions négatives. Ces émissions négatives joueront un rôle important dans la version agrégée de la D-CAM.

Figure 3 : Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme - Énergie

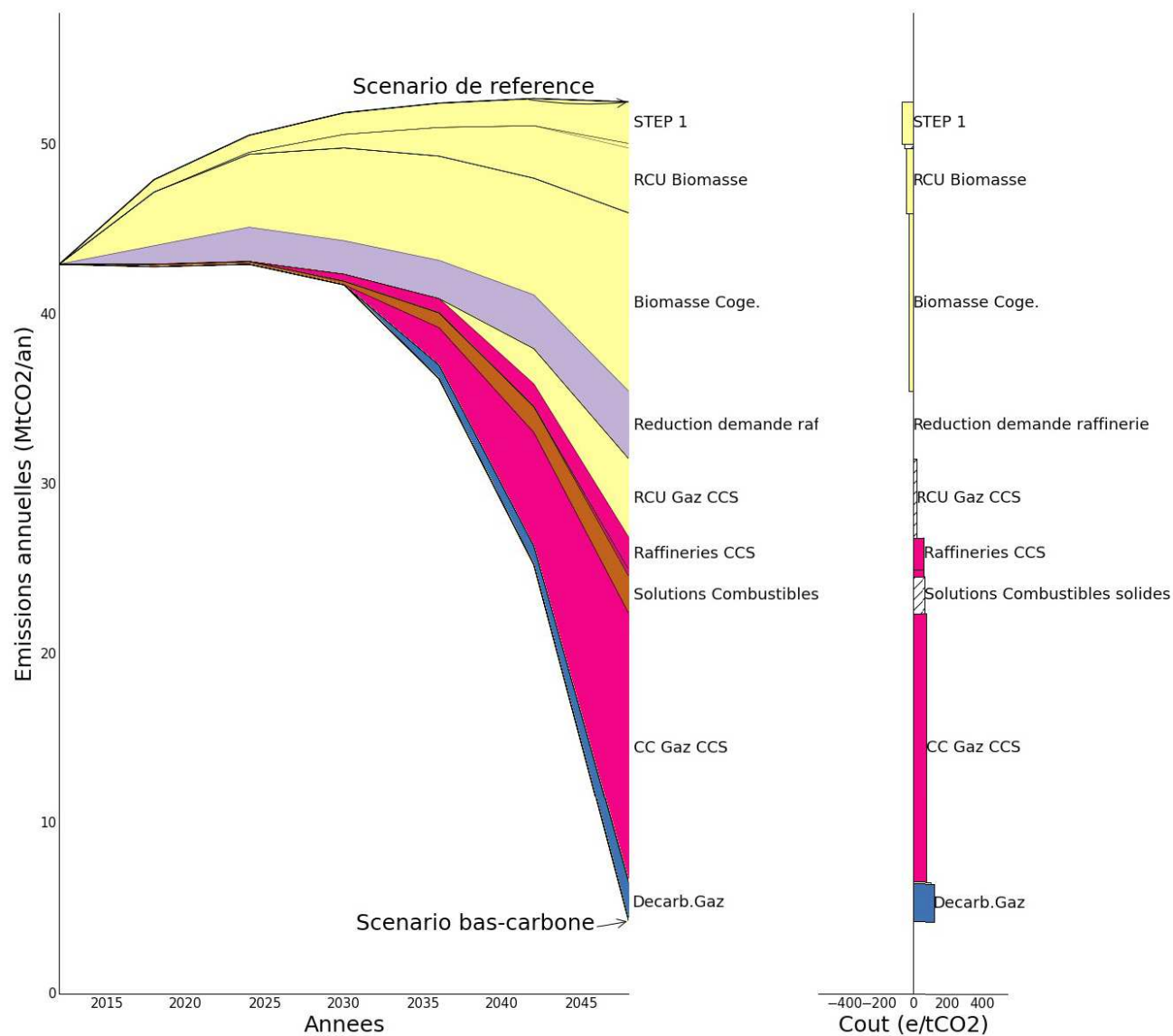
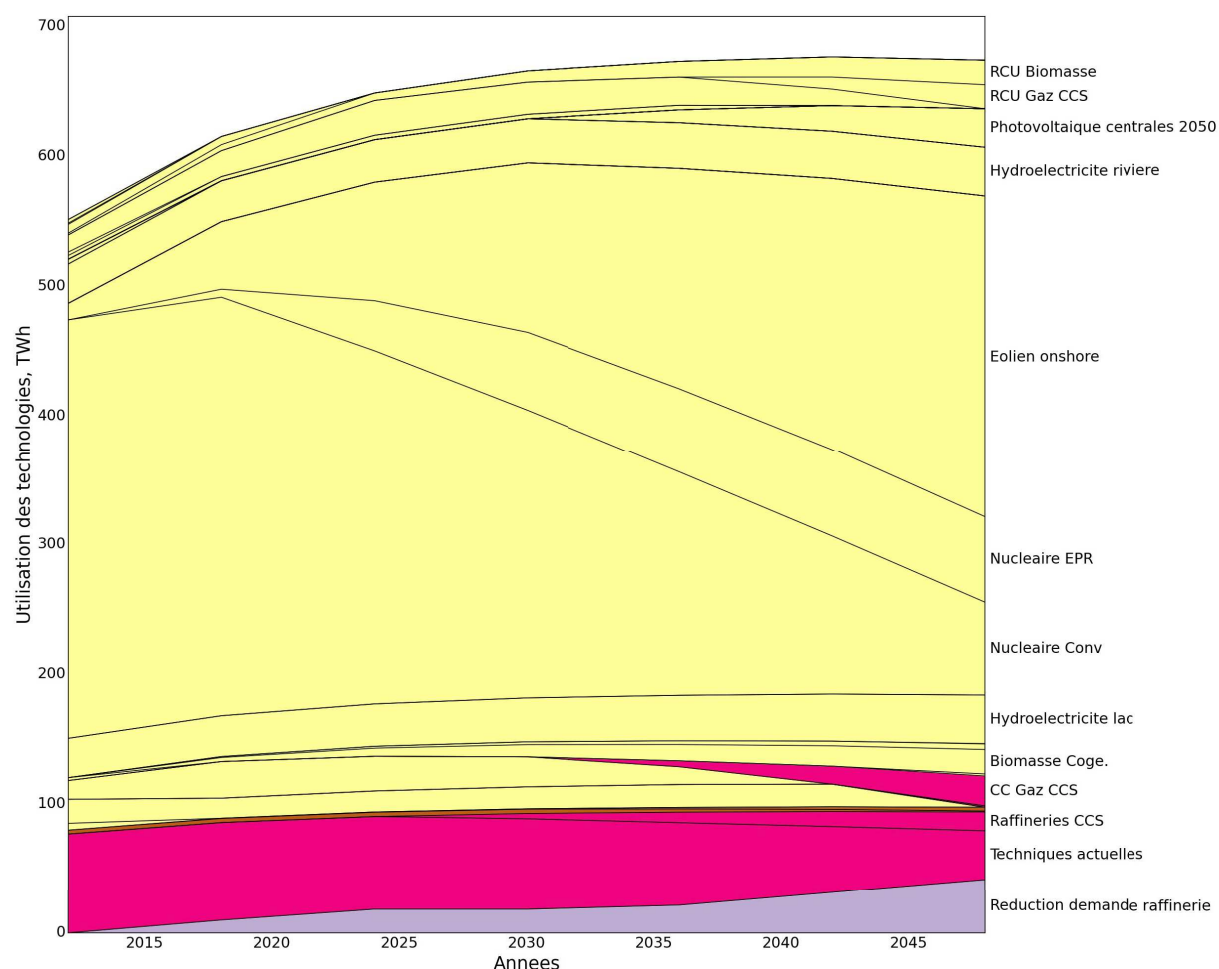


Figure 4 : Trajectoires d'utilisation des différentes technologies du mix électrique avec contraintes sur les émissions



Il est important de noter que la taille des gisements présentés sur la figure 3 n'est pas proportionnelle à la quantité physique d'énergie produite et ne reflète donc pas la part des technologies dans le mix énergétique. Les Cycles Combinés Gaz sont associés à un gisement important dans la mesure où ces centrales remplacent les centrales à charbon et au fioul responsables d'une part importante des émissions en 2012. Comme ces technologies ne portent que sur les capacités de pointe, soit 16 % du mix, elles ne représentent qu'une petite part du mix électrique total.

La figure 4 indique le mix énergétique total qui découle de la minimisation des coûts. Elle fait ainsi apparaître les technologies qui fournissent les capacités de base et n'apparaissent pas dans la D-CAM dans la mesure où elles sont non émettrices (nucléaire, hydroélectricité, éolien, photovoltaïque). La pénétration des énergies renouvelables se fait au rythme de la décroissance de la part du nucléaire dans le mix électrique qui atteint 50 % en 2050.

Une partie des réductions est également attribuée à l'utilisation de gaz non-fossile pour la production d'électricité.

De la même manière, le nucléaire n'apparaît pas comme un gisement de réduction en 2050, car sa part relative dans le mix électrique a diminué entre 2012 et 2050. Mais la proportion d'énergie d'origine nucléaire dans la production finale reste non négligeable.

Le déploiement d'énergie solaire n'intervient pas avant 2030 car auparavant l'éolien et l'hydroélectricité suffisent, en complément de la baisse des capacités nucléaires, pour couvrir la demande. Il est important de noter que, dans cette optimisation, le coût moyen du KWh dans le scénario au fil de l'eau est supposé constant. Or, le remplacement progressif des centrales nucléaires existantes par des EPR entraînera une hausse de ce coût moyen. Cela conduit donc la D-CAM à surestimer les coûts d'abattement du secteur de l'énergie.

COURBE D-CAM DU SECTEUR DU TRANSPORT (PASSAGERS ET FRET)

Calibration des paramètres et des contraintes utilisées pour l'optimisation

En 2012, la demande de transport est de 860 milliards de voyageurs.km/an et de 453 Gt.km/an. Une projection de croissance de cette demande de 0,4 %/an pour les voyageurs et de 1,5 % par an pour les marchandises (comme dans les scénarios de la SNBC) est retenue pour construire le scénario au fil de l'eau des émissions. Dans ce scénario, les parts modales restent constantes (80 % de voitures), de même que les taux d'occupation (1,53 passagers/véhicule) ou encore les émissions unitaires des véhicules particuliers (167 gCO₂/km), ce qui conduit à des émissions de 172 MtCO₂eq/an en 2050.

Les données intègrent des mesures de (i) réduction de la demande, (ii) report modal, (iii) augmentation des taux d'occupation, (iv) amélioration de l'efficacité des véhicules, (v) changements d'énergie utilisée ou décarbonation du vecteur énergétique.

L'objectif d'émissions en 2050 est fixé à 42,5 MtCO₂/an, soit une réduction des émissions de 65 % par rapport au niveau de 1990 (121 Mt/an).

Les émissions unitaires de chaque technologie correspondent à des émissions « réelles » du véhicule considéré, et non à des émissions théoriques mesurées sur un cycle d'essai.

Résultats

Les résultats de l'optimisation (figure 5) font apparaître à la fois des mesures qui réduisent la demande de transport (mesures à coût négatif), des mesures d'efficacité énergétique qui réduisent les émissions unitaires des véhicules particuliers, *via* des véhicules hybrides ou basse consommation, des mesures de changement de vecteur énergétique, *via* les véhicules décarbonés et quelques mesures (les plus coûteuses) de report modal vers les transports en commun.

Les mesures telles que le télétravail (premier bâton hachuré) ou le covoiturage (présenté sous le label remplissage VL) sont par construction à coût négatif car elles sont supposées faire éviter un coût de déplacement à celui ou celle qui les pratique. Nul coût (psychologique ou logistique) n'est associé au fait de rester chez soi pour travailler ou de covoiturer. Au cours du temps, en raison de la baisse continue des émissions moyennes des véhicules, le potentiel de réduction des émissions lié à ces mesures diminue.

La contribution des véhicules les moins émissifs (hydrogène et électrique), compte tenu de leur coût d'abattement important, reste modeste avant 2025 puis se massifie jusqu'en 2050. La date de déploiement du gisement, résultat de l'optimisation, est conditionnée par leur vitesse de déploiement limitée.

La chronique de déploiement de ces véhicules bas carbone est un bon exemple des enjeux dynamiques de l'interprétation d'une D-CAM qui permettent de justifier que des gisements au coût moyen relativement plus cher soient déployés avant des gisements au coût moyen relativement moins cher. Par exemple, l'optimisation qui permettrait d'atteindre seulement un objectif intermédiaire en 2030 (63 Mt, figure 6), ne ferait pas apparaître dans la D-CAM les véhicules à hydrogène et électriques, car des véhicules thermiques plus efficaces seraient suffisants pour atteindre l'objectif. L'optimisation par rapport au point de passage 2030 ne permet pas d'anticiper le besoin de ces véhicules pour atteindre l'objectif 2050 et donc le besoin de mobiliser une partie de leur gisement avant 2030. En l'absence d'une telle anticipation, le coût pour atteindre ensuite l'objectif final en 2050 serait plus important. En effet, l'absence de véhicules bas carbone en 2030 et les contraintes sur leur vitesse de déploiement empêcheront ensuite de combler le déficit de ce type de véhicules en 2050 (par rapport au scénario optimisé pour l'objectif en 2050), ce qui demandera de mobiliser d'autres technologies plus coûteuses (métro, tram). C'est pour cela que les « coins » associés aux véhicules à hydrogène et électriques apparaissent avant 2030, alors que les émissions restent élevées et que d'autres solutions moins coûteuses n'ont pas atteint leur potentiel maximal. Ainsi, **la seule courbe de coût** (à droite de la figure 5) **ne permet pas d'apporter cette information dynamique**.

Figure 5 : Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme – Transports

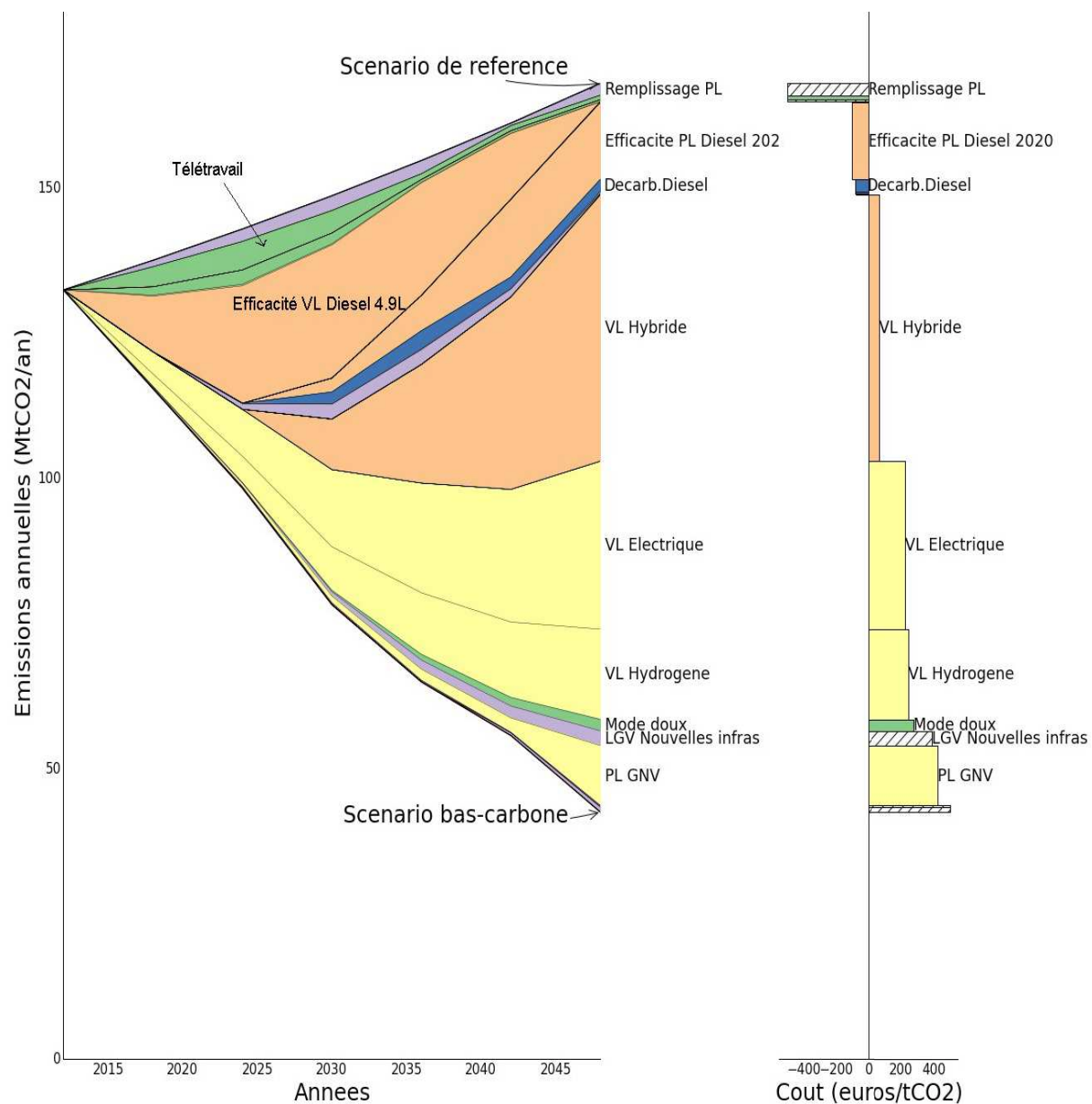


Figure 5bis : Gisements de réduction d'émissions cumulées sur la période 2010–2050

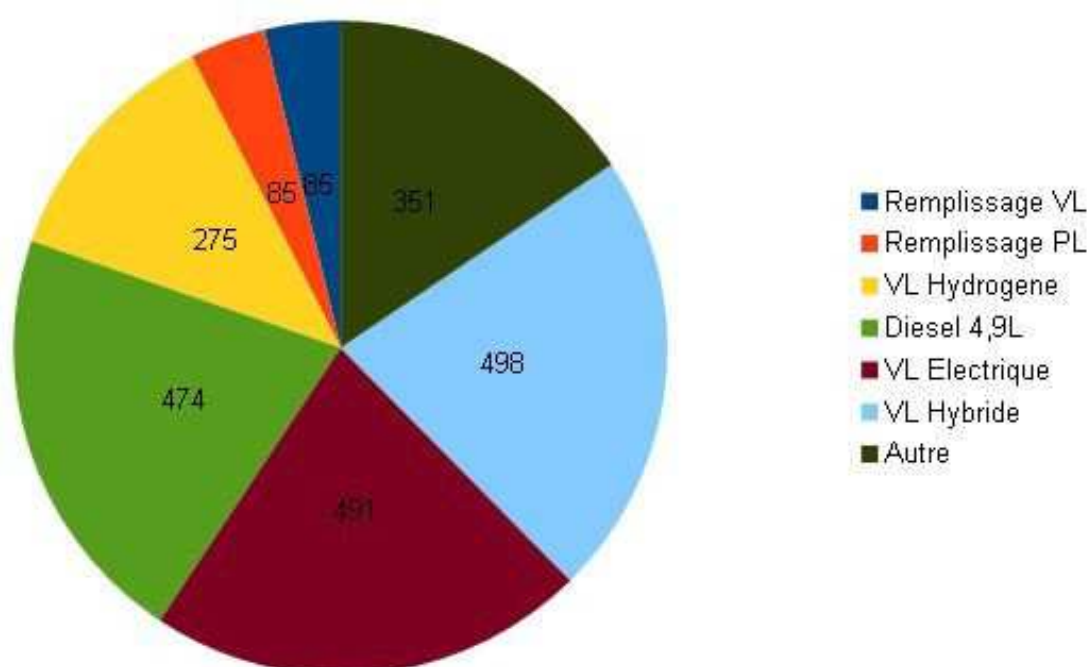


Figure 6 : Courbe de dynamique et de coûts moyens d'abattement en prenant en compte seulement un objectif de moyen terme (2030) – Transports

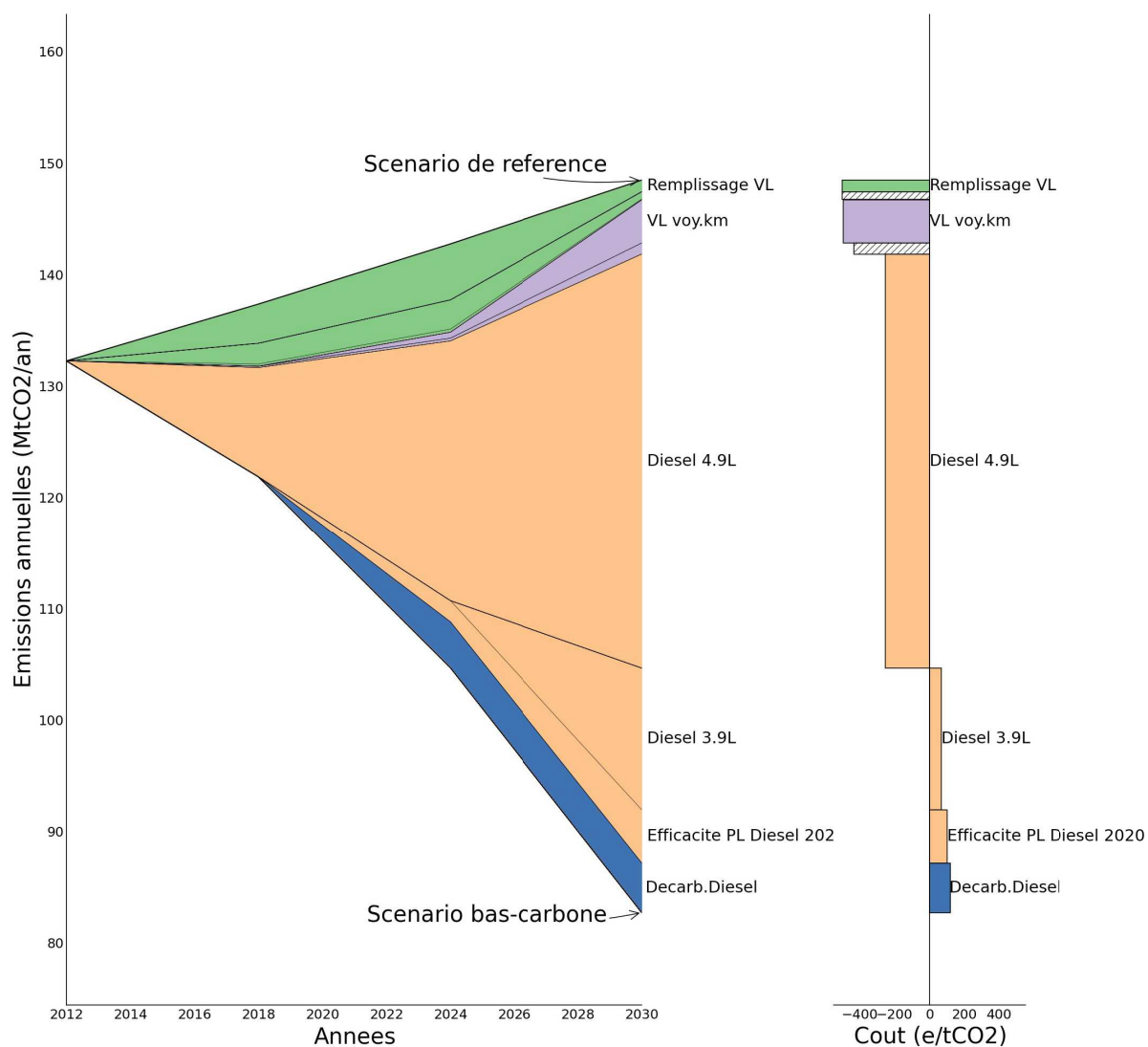
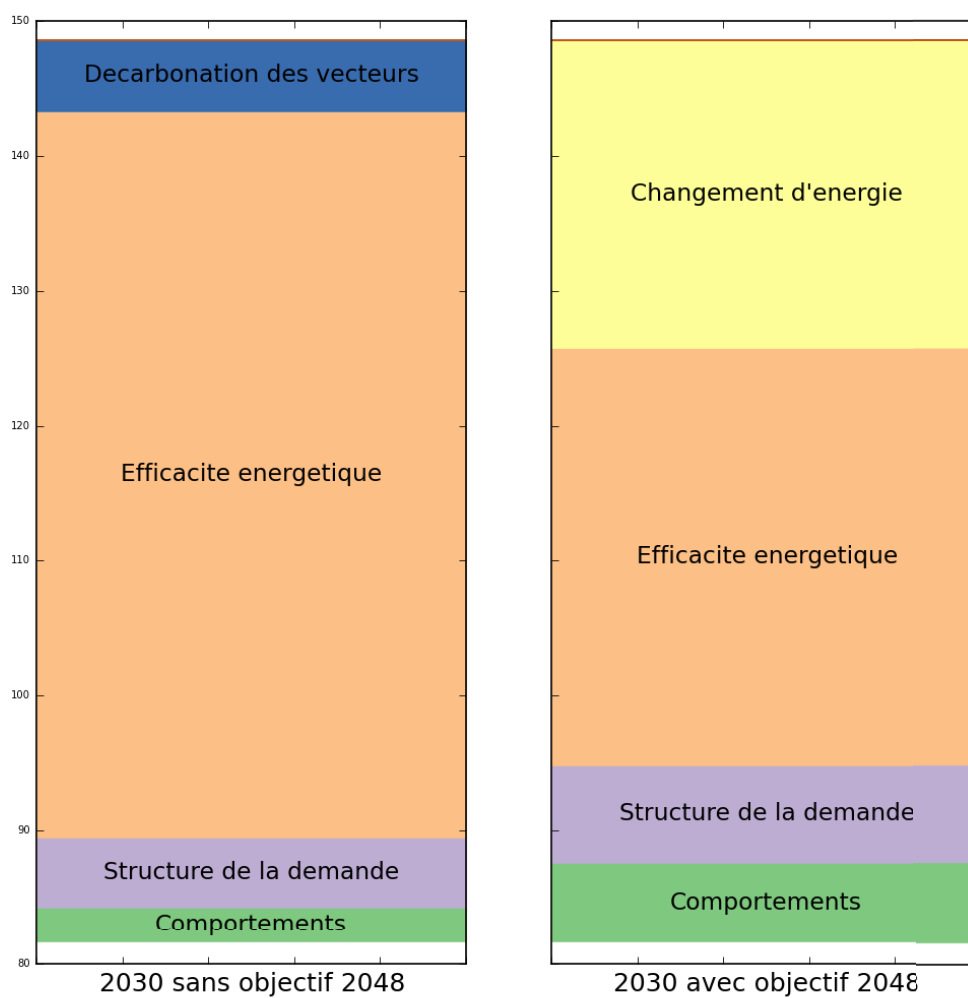


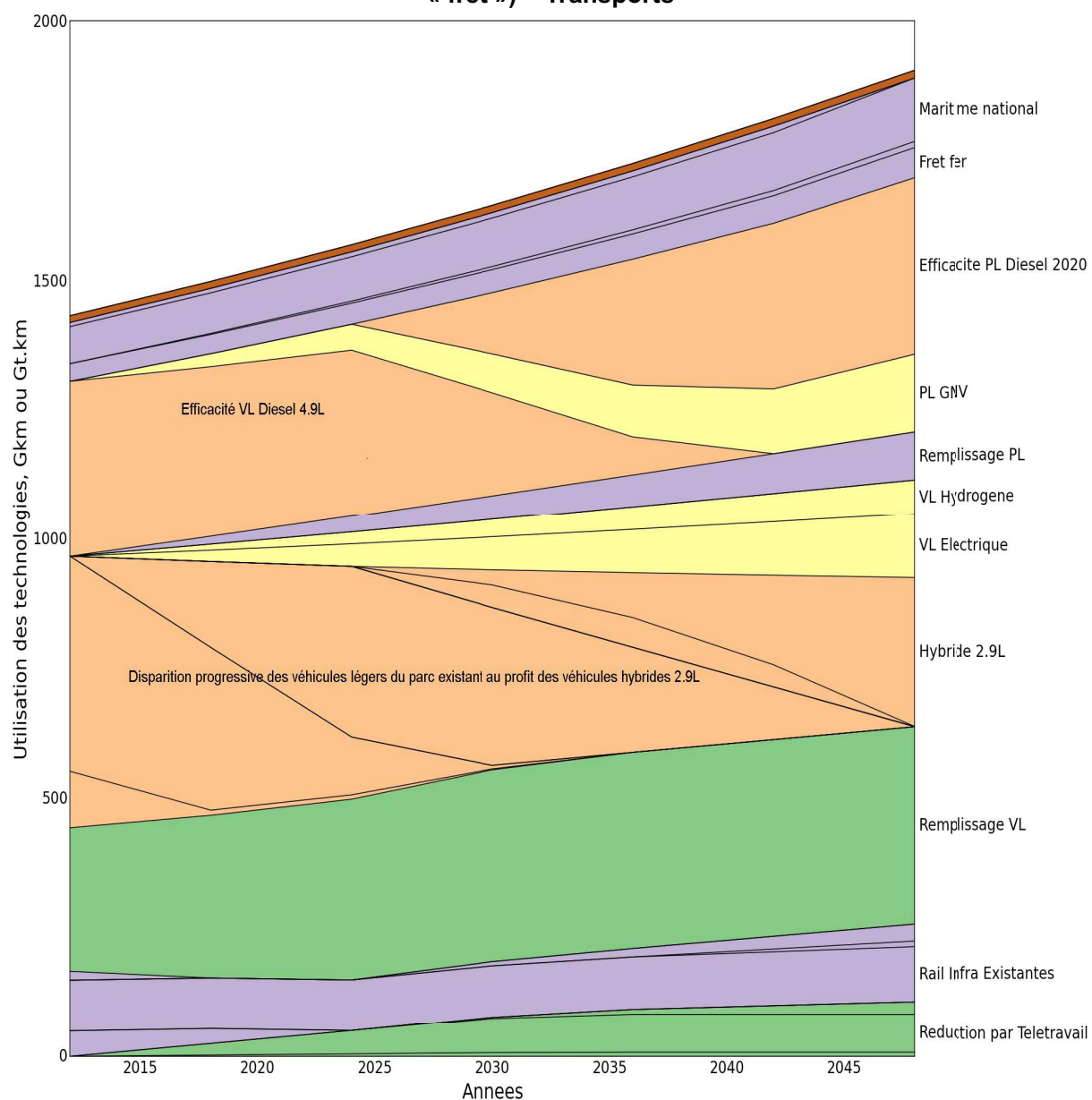
Figure 7 : Type de mesures mises en œuvre en 2030 selon l'horizon temporel de l'objectif poursuivi



La figure 7 qui compare les types de mesures mobilisées en 2030 avec et sans prise en considération d'un objectif de long terme permet également de visualiser ces effets dynamiques. En l'absence d'objectif de long terme, l'objectif 2030 peut être atteint en mobilisant essentiellement des mesures d'efficacité énergétique (diagramme de gauche). Optimiser par rapport à un objectif de long terme déforme la structure des gisements au point de passage (diagramme de droite). La contribution de l'efficacité énergétique est moindre. Tandis que des gisements de type changement d'énergie apparaissent (véhicules électriques ou hydrogène) et ceux relatifs à la structure de la demande (report modal) et aux changements de comportements (remplissage des véhicules, télétravail) sont davantage mobilisés.

La figure 8 qui décrit l'évolution de l'utilisation des technologies/mesures dans un scénario bas carbone à horizon 2050, montre que certaines mesures ne sont que temporaires. Leur contribution à l'objectif de réduction des émissions en 2050 devient nulle, mais elles ont été utilement déployées entre 2012 et 2050 pour à la fois répondre à la demande de transport tout en minimisant le coût de l'objectif de décarbonation en 2050. C'est notamment le cas de la pénétration des véhicules légers diesel 4.9l dans le parc qui représentent la source essentielle des réductions d'émissions jusqu'en 2025 (voir figure 5bis sur les réductions d'émissions cumulées des différents gisements) et dont la contribution se réduit ensuite jusqu'à s'annuler en 2050 (gisement entre PL GNV et remplissage PL). La figure 8 montre que d'autres types de véhicules tels que les véhicules essence et diesel moyen du parc actuel disparaissent également sans pour autant être des sources de réductions d'émissions. Leur disparition correspond à leur remplacement « naturel » par des véhicules plus performants, notamment des véhicules hybrides 2.9L.

Figure 8 : Utilisation des différentes technologies ou mesures au cours du temps dans le scénario bas carbone (en G.km pour la partie « voyageurs », et en Gt.km pour la partie « fret ») – Transports



COURBE D-CAM DU SECTEUR DES DÉCHETS.

Calibration des paramètres et des contraintes utilisées pour l'optimisation

Quatre types de gisements sont considérés pour réduire les émissions de GES du secteur des déchets :

- (i) la réduction des déchets produits ;
- (ii) l'augmentation du taux de recyclage ;
- (iii) l'augmentation de la valorisation énergétique des déchets non recyclés (2/3 des déchets non recyclés) ;
- (iv) l'augmentation du taux de captage du méthane dans les centres de stockage (de 40 % à 77 %).

Les données proviennent en majorité de l'exercice de prospective du plan d'actions déchets (2009).

Pour la partie des déchets stockés, les émissions ne sont pas représentées suivant la cinétique utilisée dans les inventaires. La tonne de déchet est supposée émettre l'intégralité des GES à l'année de la mise en décharge.

La part de bio-déchets parmi ceux mis en décharge (plus émetteurs de CH₄), ou parmi ceux valorisés énergétiquement (partie biogénique du CO₂ non comptabilisée dans les émissions) est supposée constante : un gisement supplémentaire existe si le contenu en bio-déchets se différencie entre incinération et stockage.

Pour le recyclage, les émissions évitées comptées résultent de la quantité de déchets en décharge ou en incinération évités. La partie liée à de la substitution à de la matière vierge (matière première pour fabriquer de l'acier par exemple) peut apparaître dans d'autres secteurs (acier recyclé moins énergivore).

L'objectif d'émissions en 2050 est fixé à 2,5 Mt/an, soit une réduction des émissions de 78 % par rapport au niveau de 1990 (11,5 Mt).

Résultats

Pour lire les courbes D-CAM (figure 9), il est important de rappeler que les émissions évitées, sur l'axe des ordonnées, ne sont pas proportionnelles à l'évolution des quantités traitées par chaque technologie. L'évolution de ces quantités est présentée dans la figure 10. La figure 10 montre que le traitement par incinération (deuxième technologies en partant du haut) devient marginal en fin de période et que la mise en décharge selon les normes en vigueur en 2010 disparaît complètement (technologie fuchsia).

On constate sur la figure 9 une diminution sur la fin de la période des réductions associées à la prévention des déchets et au recyclage (les deux premiers coins en partant du haut). Cela n'est pas dû à une diminution du taux de recyclage : les quantités de déchets « non produits » (par rapport au scénario au fil de l'eau) ou de déchets recyclés augmentent continûment (figure 10). Mais puisque les émissions unitaires associées à la destruction des déchets diminuent, la quantité de GES évités pour une tonne de déchet recyclé diminue elle aussi.

Le gisement associé au captage du méthane apparaît comme particulièrement important puisque les émissions des déchets mis en décharge sont alors divisées par 3 environ.

Figure 9 : Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme - Déchets

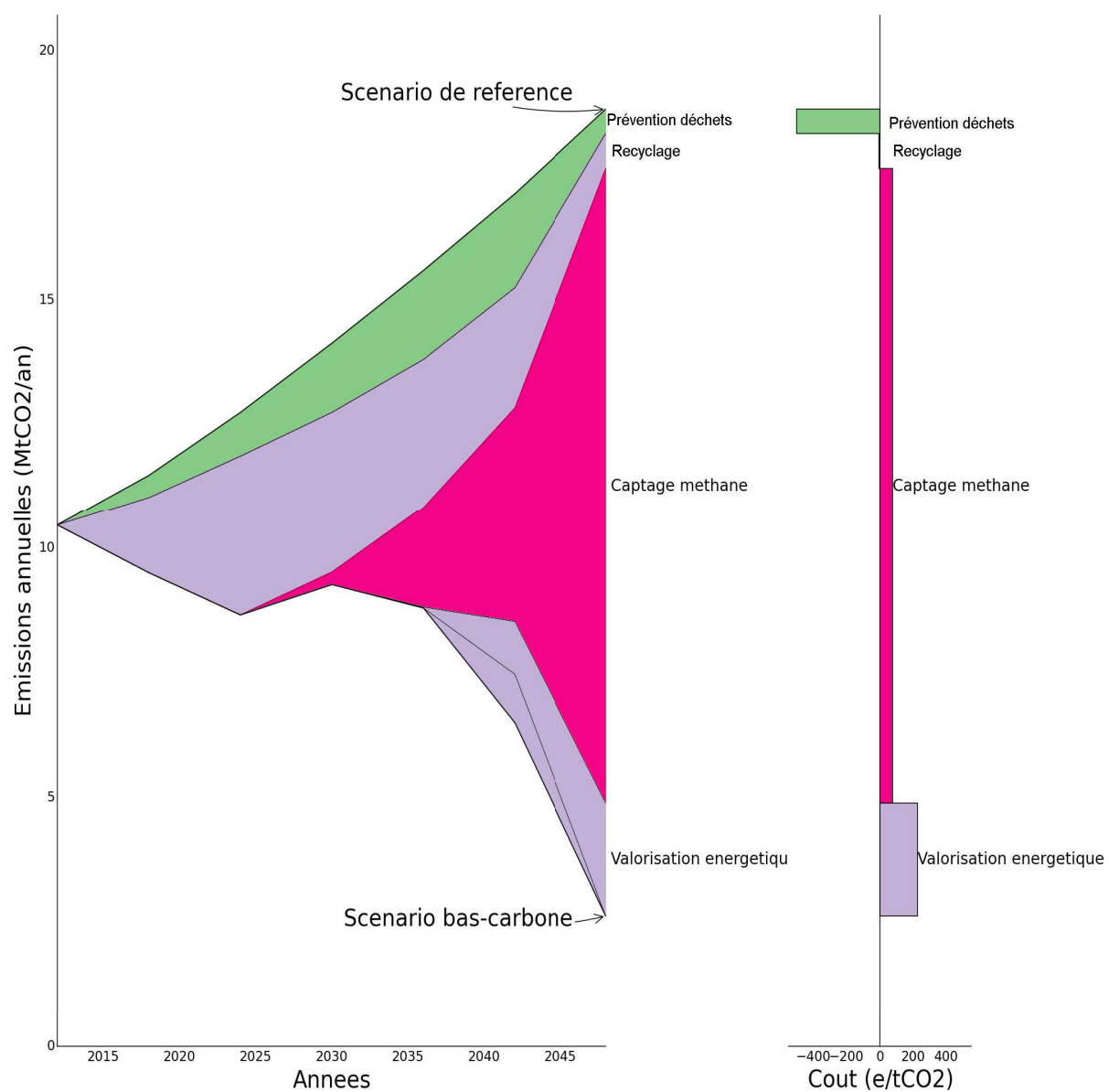
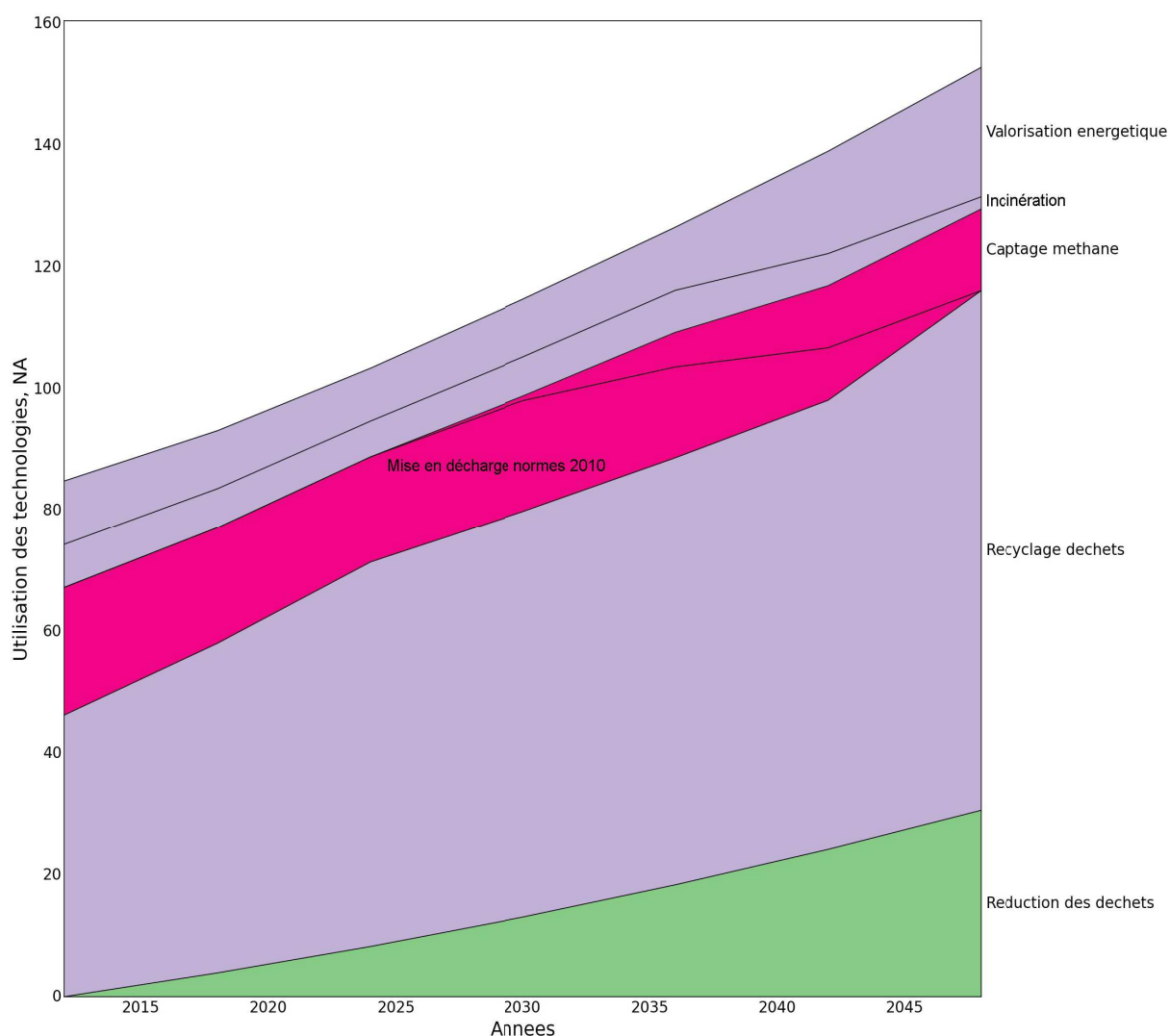


Figure 10 : Quantités de déchets traités par les différentes technologies considérées au cours du temps dans le scénario bas carbone – Déchets



COURBE D-CAM DU SECTEUR DU BÂTIMENT (RÉSIDENTIEL ET TERTIAIRE).

Calibration des paramètres et des contraintes utilisées pour l'optimisation

Un grand nombre de gisements sont considérés pour ce secteur, car le parc existant est désagréé selon : le type de logement (Maison individuelle / Logement collectif), l'énergie de chauffage utilisée et le niveau de performances du bâti. Pour chaque combinaison, on envisage les gisements associés à :

Partie 2 : Courbes D-CAM sectorielles

- la rénovation du bâti, forte ou modérée ;
- le changement d'appareil de chauffage, pour un appareil plus performant ou pour une autre énergie de chauffage.

Le même type de mesure peut ainsi apparaître plusieurs fois sur la courbe car il ne s'applique pas au même segment du parc immobilier.

Dans le neuf, trois niveaux de qualité de construction sont considérés (RT 2005, RT 2012 et RT2020).

D'autres gisements (en bleu sur la figure 11) correspondent à la décarbonation des principaux vecteurs énergétiques (chaleur, électricité, gaz).

Remarque : Articulation avec le secteur de l'énergie

Une partie des émissions liées au secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire sont des émissions indirectes, à travers les consommations électriques et de chaleur. Les gisements liés à de l'électrification, ou à de l'efficacité énergétique sur les postes électriques ou à la décarbonation des vecteurs dépendent ainsi fortement du contenu carbone de l'électricité. Un potentiel est ainsi attribué à un gisement « décarbonation de l'électricité » qui permet de réduire les émissions indirectes de l'électricité consommée par le bâtiment. La chronique des coûts et des contenus carbone est calculée à part pour le seul secteur de l'énergie et dépend de l'objectif qui a été assigné à ce secteur. Les résultats sont utilisés ici comme une donnée d'entrée pour apprécier le potentiel de réduction des émissions indirectes du secteur du bâtiment.

Il est important de noter que ces réductions d'émissions ne font pas double compte avec celles réalisées par le secteur de l'énergie pris à part. Elles découlent d'une production d'électricité additionnelle et donc un effort de décarbonation supplémentaire demandé au secteur de l'énergie.

Les gisements ont été calculés à partir :

- des consommations en énergie finale du parc actuel (données CEREN) ;
- des gains attendus sur la consommation en énergie par les rénovations du bâti (hypothèses DGECC) ;
- des rendements des différents appareils de chauffage considérés (données ADEME) ;
- du contenu en GES de chacune des énergies utilisées, celui-ci pouvant être amené à diminuer au cours du temps. Cette évolution du contenu en CO₂ peut s'accompagner d'une évolution du coût de production de l'énergie associée (déterminé par les courbes d'abattement du secteur « énergie »).

S'agissant des aspects comportementaux, aucun effet rebond sur les consommations énergétiques n'a été pris en considération.

Un coût unitaire est attribué aux rénovations du bâti et aux appareils de chauffage (hypothèses

retenues dans les scénarios de la SNBC). Pour le potentiel, le nombre maximal de logements touchés par chacune des actions a été estimé à partir de la synthèse des trajectoires de réduction proposées dans le cadre du DNTE¹.

Pour la construction du scénario au fil de l'eau, le parc est supposé s'agrandir progressivement par des constructions neuves au rythme de 300 000 logements/an. Les taux d'équipement par les différents types d'appareil de chauffage dans ces logements neufs, dans le scénario « au fil de l'eau », sont ceux relevés en 2012 par l'observatoire des DPE (Diagnostics de Performance Énergétique). Ils sont maintenus constants sur toute la période. Le niveau de qualité de construction dans ce scénario théorique est celui de la RT 2005. L'accélération de ce rythme des constructions neuves, jusqu'à 500 000 logements/an, a été considéré comme un gisement de réduction.

La même démarche a été utilisée pour le secteur tertiaire, mais avec un parc moins désagréé (un seul niveau de performance moyen en 2012 pour chacune des énergies de chauffage considérées).

La trajectoire bas-carbone considérée optimise les coûts sur la période pour atteindre un objectif de réduction de 85 % sur le secteur résidentiel-tertiaire en 2050 par rapport à 1990. Il n'y a pas d'objectif global pour le secteur en termes de consommation d'énergie primaire ou finale, seul le critère carbone est pris en considération.

L'objectif d'émissions en 2050 est fixé à 13,5 Mt/an (directes et indirectes), soit une réduction de 85 % par rapport au niveau de 1990 (90 Mt/an).

Résultats

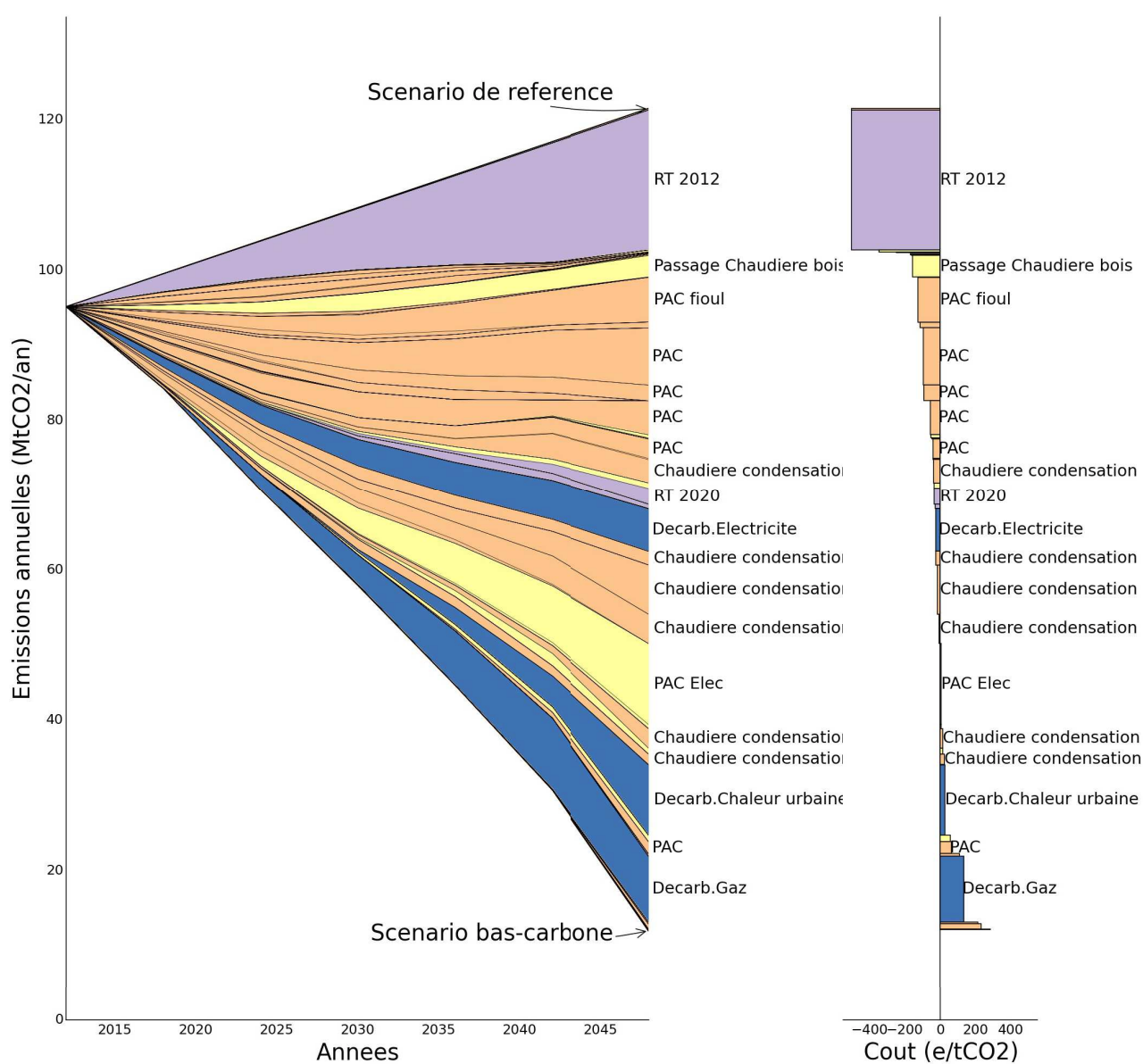
Des gisements identiques de changements d'appareil de chauffage (pompes à chaleur) apparaissent plusieurs fois à la figure 11 avec des coûts (essentiellement négatifs) variables. Cela provient de la décomposition du parc des logements selon l'énergie de chauffage utilisée et le niveau de performances du bâti. Ainsi le coût d'une pompe à chaleur varie avec le niveau de performance initial du logement. En ce qui concerne les rénovations indiquées par la D-CAM, elles sont d'autant plus lourdes que le logement est plus émetteur au départ. Plus le parc initial est désagréé, plus les coûts moyens d'abattement couvrent un large champ de valeurs.

Une partie des gisements (figure 11) apparaît avec un coût négatif. C'est le cas notamment de l'application de la RT2012 pour les constructions neuves et plusieurs technologies de chauffage. Ces coûts négatifs peuvent être liés à des asymétries d'informations sur les économies d'énergie réalisées par ces technologies de chauffage, ou à l'utilisation d'un taux d'actualisation public (4,5 %) inférieur à celui qui serait utilisé par un agent économique privé.

Certains gisements coûteux apparaissent dès le début de la période, compte tenu de leurs vitesses de déploiement très lentes : c'est le cas des rénovations lourdes. La courbe de coût (à droite), ne doit donc pas être lue comme l'ordre de priorité des gisements à exploiter. **La seule courbe de coût (à droite de la figure) ne permet pas d'apporter l'information liée à la vitesse limitée des rénovations ou des constructions neuves.**

1 Hypothèse basse de constructions neuves, issue de la synthèse des trajectoires du Débat National sur Débat National sur la transition énergétique (Carbone 4, 2014)

Figure 11 : Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme - Bâtiments



COURBE D-CAM DU SECTEUR DE L'INDUSTRIE.

Calibration des paramètres et des contraintes utilisées pour l'optimisation

Dans le scénario au fil de l'eau du secteur de l'industrie, les émissions de quatre sous-secteurs sont projetées, par rapport à la croissance de la valeur ajoutée sectorielle des industries :

- des métaux ;
- de la chimie ;
- des matériaux ;
- les autres industries.

Ces quatre secteurs ont en 2012 des niveaux d'émissions comparables.

Les émissions considérées regroupent à la fois celles liées à l'utilisation de combustibles (catégorie 1A.) et celles liées aux procédés (catégorie 2.).

Les principaux types de gisements considérés sont :

- l'efficacité énergétique (source principale : étude ADEME / CEREN sur les gisements d'économies d'énergie) ;
- le changement de source d'énergie (source principale : trajectoires du DNTE) ;
- la décarbonation des sources d'énergie (chaleur, électricité, gaz, avec les données issues des courbes de ces secteurs) ;
- la capture et le stockage de CO₂ (source principale : AIE).

Remarque : Articulation avec le secteur de l'énergie

Une partie des émissions liées au secteur de l'industrie sont des émissions indirectes, notamment à travers les consommations électriques. Les gisements liés à de l'électrification, ou à de l'efficacité énergétique sur les postes électriques ou à la décarbonation des vecteurs dépendent ainsi fortement du contenu carbone de l'électricité. Un potentiel est ainsi attribué à un gisement « décarbonation de l'électricité » qui permet de réduire les émissions indirectes de l'électricité consommée par l'industrie. La chronique des coûts et des contenus carbone est calculée à part pour le seul secteur de l'énergie et dépend de l'objectif qui a été assigné à ce secteur. Les résultats sont utilisés ici comme une donnée d'entrée pour apprécier le potentiel de réduction des émissions indirectes du secteur de l'industrie.

En raison du faible contenu CO₂ de l'électricité en 2050, les émissions indirectes sont marginales.

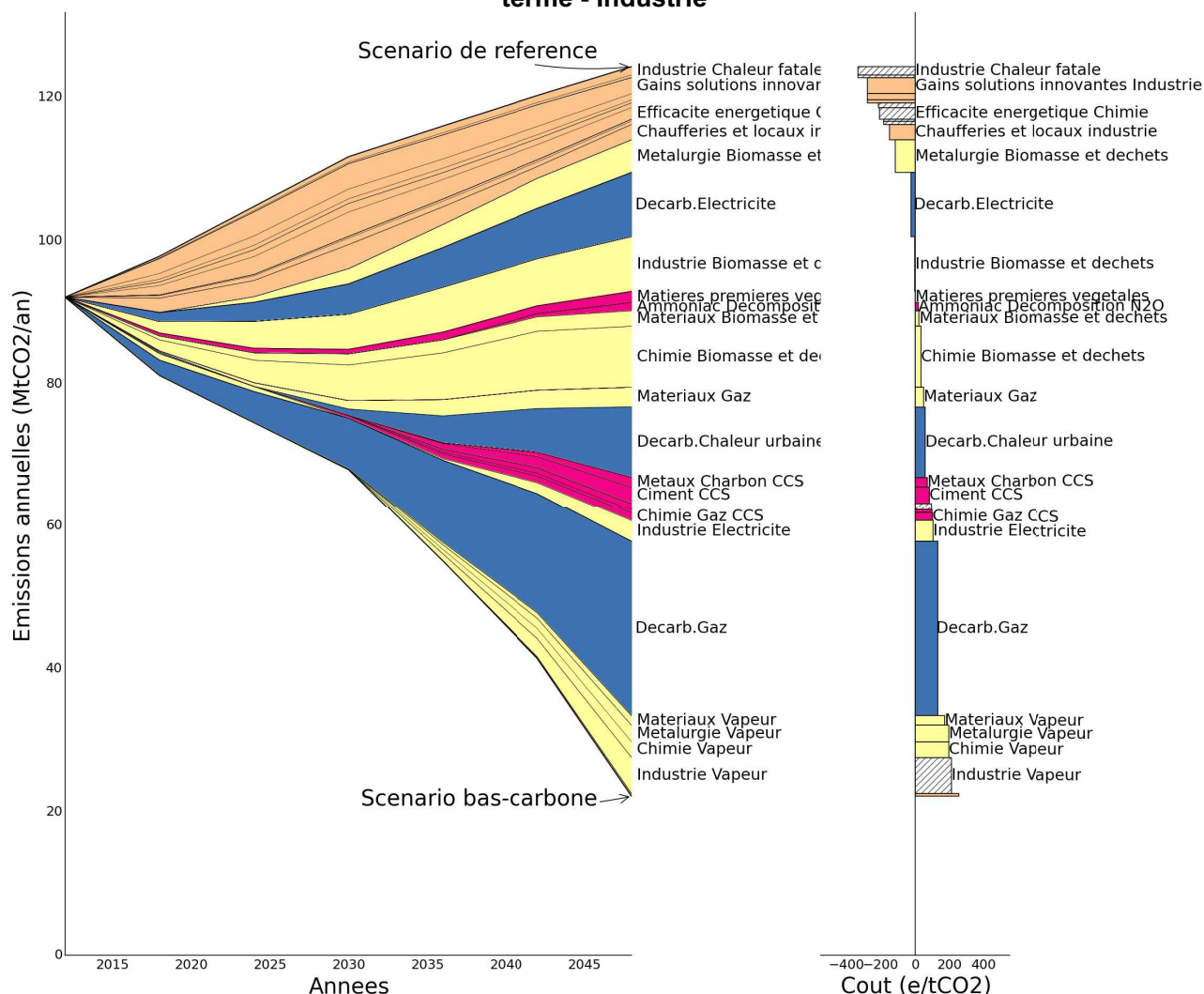
L'objectif d'émissions en 2050 est fixé à 22 Mt/an (directes et indirectes), soit 85 % de réduction des émissions par rapport au niveau de 1990 (148 Mt/an).

Résultats

La figure 14 montre qu'une partie importante des réductions est liée à la décarbonation des vecteurs énergétiques utilisés dans l'industrie (gaz et électricité) qui s'ajoutent aux mesures propres au secteur de changement d'énergie et d'efficacité.

Par ailleurs, la capture et le stockage du carbone apparaissent à partir de 2030, en raison d'un coût d'abattement qui devient alors moins élevé que d'autres mesures de substitution d'énergie.

Figure 14 : Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme - Industrie



COURBE D-CAM DU SECTEUR DE L'AGRICULTURE.

Calibration des paramètres et des contraintes utilisées pour l'optimisation

Les potentiels sont issus de la courbe de coût d'abattement construite par l'INRA (2013). La courbe d'abattement était construite pour un horizon temporel donné : les gisements en 2030). A partir de ces gisements, les trajectoires temporelles optimales ont pu être reconstruites : chacune des actions identifiée pouvait atteindre son assiette maximale à une année donnée, ce qui a

permis d'en déduire une vitesse (les cinétiques de déploiement ont été simplifiées, puisque la diffusion utilisée ici est linéaire au cours du temps).

Les mesures concernent à la fois les émissions de CO₂ des usages énergétiques, les émissions liées au N₂O et au CH₄, ainsi que des composantes de stockage du carbone.

L'objectif d'émissions en 2050 est fixé à 56 Mt/an, soit une réduction des émissions de 50 % par rapport au niveau de 1990 (111 Mt/an).

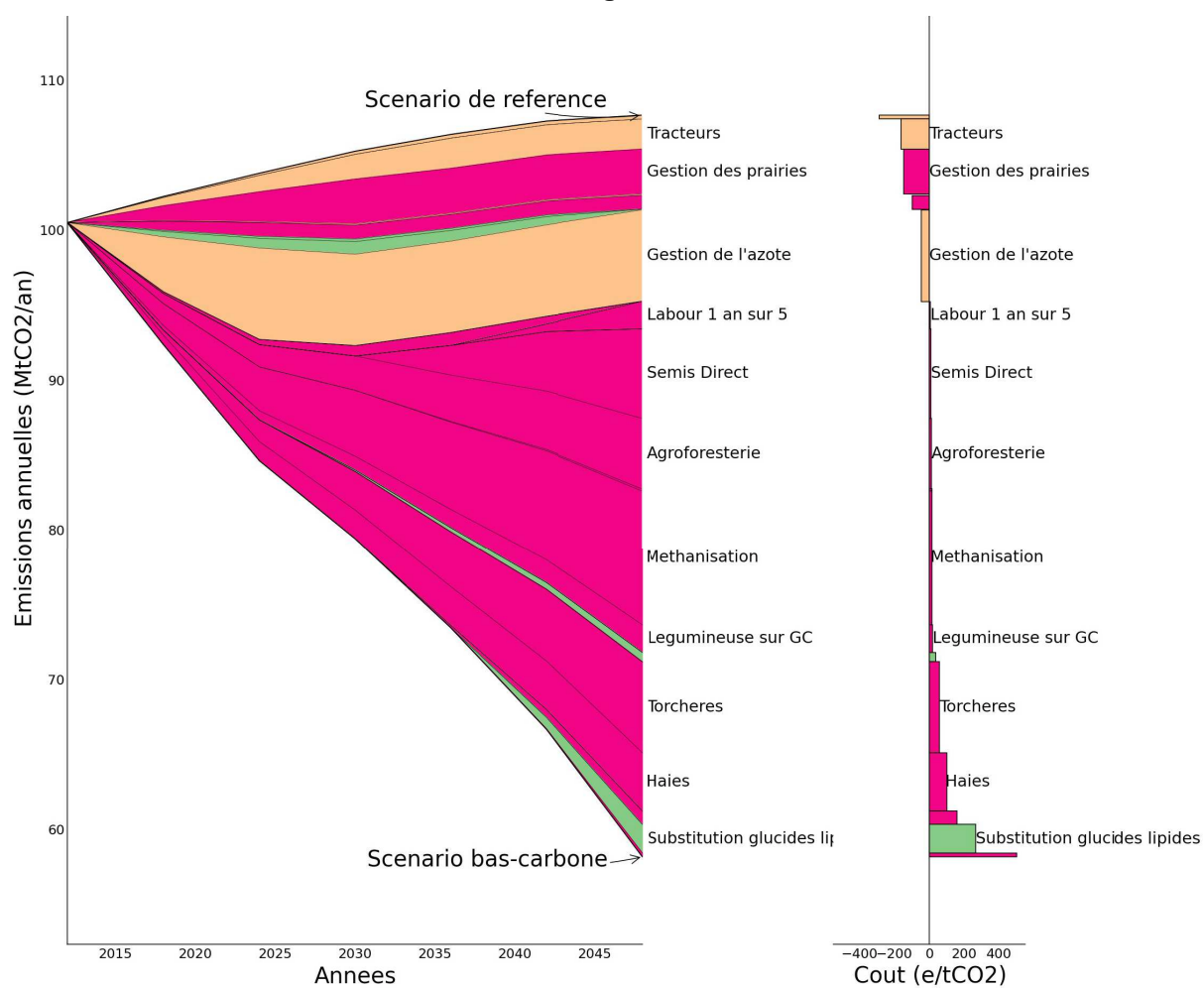
Remarque sur le traitement des mesures liées au stockage du carbone :

Certaines mesures présentées ici, telles que les changements de technique de labour, font intervenir à la fois des réductions d'émissions répétées à l'identique chaque année (telles que les économies de carburant), et des réductions qui varient d'année en année (telles que le stockage de carbone accru dans les sols ou dans les végétaux). Pour ces dernières, l'intégralité des réductions associées n'ont pas été attribuées à l'année de mise en œuvre (approche de type inventaire) mais ont été réparties sur 20 années.

Résultats

Comme l'objectif fixé (division par 2 des émissions par rapport à 1990, soit 56 MtCO₂eq) représente, en début de période au moins, une contrainte faible, certaines mesures à coûts positifs – comme le labour un an sur cinq et le semis direct, les bandes enherbées – se déploient le plus tard possible (figure 15). À l'inverse, les mesures à coûts négatifs apparaissent dès le début de la période. Cette chronologie de mobilisation des gisements de réduction de GES représente la différence principale avec les scénarios de diffusion des actions de l'INRA qui débutent tous en 2012

Figure 15 : Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme - Agriculture



Partie 3

Courbe agrégée et messages clés

L'approche agrégée de l'outil modifie la répartition des efforts de réductions d'émissions entre les secteurs par rapport à l'approche sectorielle. Ils augmentent fortement dans le secteur de l'énergie et diminuent dans les secteurs de l'industrie, du transport et du bâtiment. Le bilan macro de la transition bas carbone ne fait pas apparaître de surcoût évident par rapport au scénario au fil de l'eau. Les courbes D-CAM produisent des trajectoires indicatives et exploratoires de la transition.



COURBE D-CAM AGRÉGÉE AVEC L'OBJECTIF DU FACTEUR 4

Calibration des paramètres et des contraintes utilisées pour l'optimisation

La version agrégée de la D-CAM permet de construire une trajectoire bas carbone qui minimise les coûts pour atteindre l'objectif du facteur 4 en considérant l'ensemble des gisements sectoriels de réduction des émissions. Mais pour chaque secteur, aucune contrainte de budget carbone (c'est-à-dire d'émissions cumulées sur la période) n'est imposée (ni en 2030 ni en 2050). Le traitement des interactions entre secteurs consommateurs et producteurs d'énergies sont détaillées dans l'encadré 5.

Encadré 5 : Secteur de l'énergie et compte des émissions.

Pour construire une courbe agrégée, la transition bas carbone du secteur de l'énergie (électricité et chaleur) doit permettre dans le même temps d'assurer l'équilibre entre la production d'énergie et la demande énergétique des autres secteurs. Les émissions indirectes de ces secteurs sont alors réduites (pour le chauffage urbain ou le chauffage électrique par exemple), mais les réductions d'émissions correspondantes sont associées aux technologies de production d'énergie. En revanche, les gisements associés à des passages à de l'électrique ou à de la chaleur (en remplacement de gaz par exemple) sont bien comptabilisés dans les secteurs correspondants (industrie, résidentiel, transport).

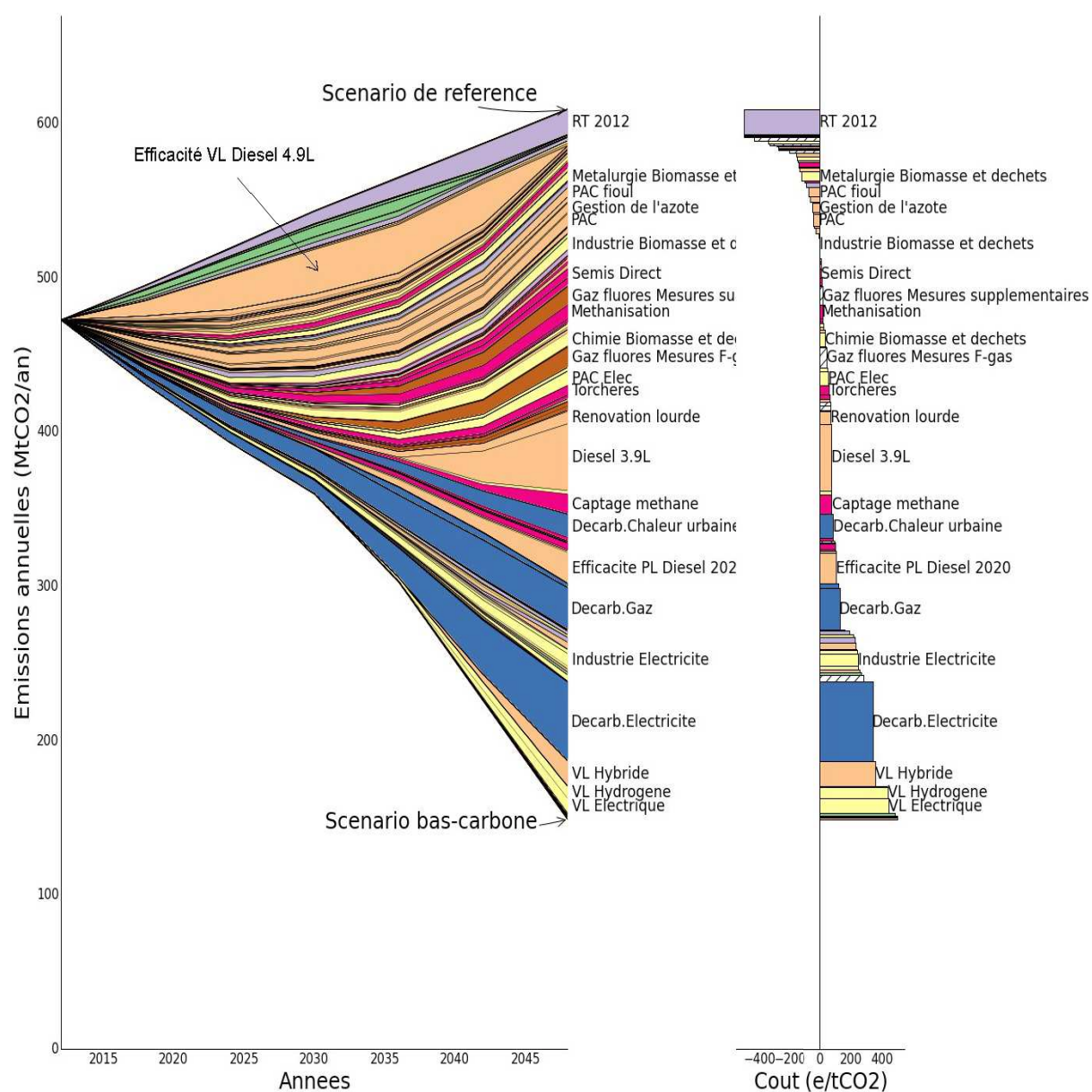
En équilibrant ainsi offre et demande, on évite que les optimisations de chacun des secteurs conduisent notamment à une électrification massive sans économie d'énergie, qui se ferait sans contrepartie sur le contenu CO₂ ou sur le coût de production du kWh.

Le passage du fioul vers l'électricité conduit à un passage d'émissions directes (catégorie CRF 1A4, « Combustion résidentiel ») à des émissions indirectes (catégorie 1A1a « Production centralisée d'électricité ») *via* une demande supplémentaire en électricité, sans risque de double compte.

L'objectif d'émissions en 2050 est fixé à 149 Mt/an, soit une réduction des émissions de 75 % (facteur 4) par rapport au niveau de 1990 (596 Mt/an hors UTCF).

Partie 3 : Courbe agrégée et messages clés

Figure 16 : Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme – Tous secteurs



Utilisations

IDENTIFIER DES GISEMENTS À COÛT POTENTIELLEMENT NÉGATIFS

L'apparition de gisement à coût négatif non exploité en 2012 peut s'expliquer notamment par :

- des asymétries d'informations ;
- l'utilisation d'un taux d'actualisation public plus faible que les taux considérés par les acteurs privés ;
- des taux de retour sur investissement (TRI) inférieurs à d'autres options d'investissements pour les acteurs privés qui ne cherchent pas à financer l'intégralité des projets rentables qui s'offrent à eux ;
- la mesure peut présenter un surcoût positif en 2012, mais conduire à des bénéfices sur la période complète en raison de baisse des coûts de certaines technologies, puisqu'il n'y a pas de progrès technique dans le scénario au fil de l'eau.

FOURNIR DES INDICATIONS SUR LA SÉQUENCE DE MISE EN ŒUVRE DES MESURES.

La figure 16 correspondant à la D-CAM agrégée est moins lisible que les D-CAM sectorielles. Elle fait apparaître cependant l'ensemble des phénomènes observés au sein des résultats sectoriels.

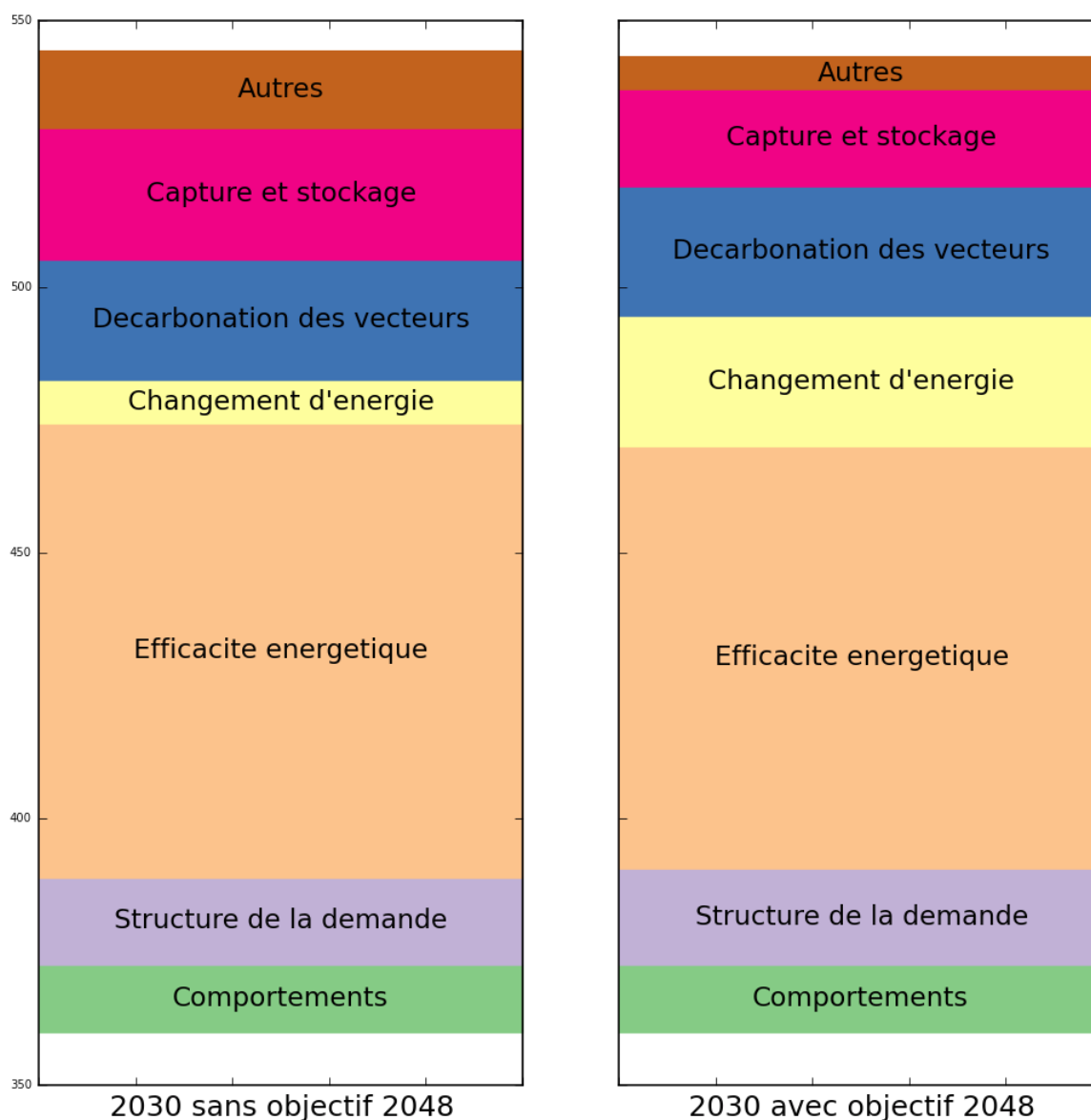
Les gisements à coût négatif sont déployés en priorité. La contribution des mesures comportementales tend à diminuer dans le temps en raison de la croissance de l'efficacité énergétique des technologies.

Les gisements ne sont pas mobilisés par ordre croissant de leur coût moyen mais selon une chronologie propre qui dépend de la contribution optimisée du gisement à l'objectif de réduction d'émissions poursuivi. La date de déploiement souhaitable d'un gisement donné est déterminée par son potentiel et sa vitesse de diffusion. Ces dates donnent en particulier une indication sur la structure des réductions au cours du temps : elles ne se concentrent pas sur les gisements présentant les coûts les plus faibles, mais également sur des gisements à fort potentiel d'abattement mais lents à mettre en œuvre (rénovation du parc de logement, technologies encore au stade pré-commercial).

Comme les cinétiques utilisées sont très frustes, les chroniques de déploiement des gisements qui en découlent ne doivent pas être interprétées littéralement. Elles mettent toutefois clairement en évidence des types de mesures qu'il faut exploiter dès le début de période alors qu'elles ne sont pas nécessaires pour atteindre un objectif de moyen terme. Ce point est particulièrement frappant dans le secteur des transports.

La structure agrégée des gisements présentée dans la figure 17 fait apparaître des changements dans la structure des gisements selon l'horizon temporel de l'objectif. Prendre en considération un objectif de long terme renforce en effet dès le moyen terme la contribution de gisements liés à un changement d'énergie ainsi qu'à la structure de la demande, au détriment des gisements d'efficacité énergétique.

Figure 17 Types de gisements exploités selon la date de l'objectif poursuivi.



COMPARER LES EFFORTS SECTORIELS OBTENUS DANS LE SCÉNARIO AGRÉGÉ AVEC LES EFFORTS DÉFINIS PAR LA SNBC

Par rapport aux scénarios sectoriels où l'optimisation se fait en fonction des contraintes sur les potentiels, les vitesses de diffusion et les coûts des gisements du secteur, dans le scénario agrégé, tous les gisements, quel que soit leur secteur, sont en « compétition » pour atteindre l'objectif du facteur 4 au moindre coût à l'échelle de l'économie française. Ainsi, si un secteur

Partie 3 : Courbe agrégée et messages clés

recèle des gisements à moindre coût que d'autres secteurs, dont le potentiel n'est pas intégralement exploité, alors l'optimisation peut, au-delà de l'objectif sectoriel, approfondir la mobilisation de ces gisements. Le tableau 1 montre ainsi qu'atteindre le facteur 4 au moindre coût à l'échelle agrégée conduit à plus que doubler les efforts du secteur de l'énergie par rapport à ce qui est visé dans la SNBC, en exploitant massivement des gisements d'émissions négatives. Cela relâche ainsi la contrainte sur les autres secteurs, au premier rang desquels l'industrie qui voit ses efforts réduits de 40 %, puis le transport et enfin le bâtiment. Il est intéressant de noter également que la trajectoire agrégée de la D-CAM fait porter moins d'efforts de réduction d'émissions à moyen terme (184 millions de tonnes évitées en 2030) que la somme des efforts issus des D-CAM sectoriels (201 millions de tonnes évitées en 2030). Cela indique un léger report des efforts dans le temps pour atteindre in fine le même objectif agrégé du facteur 4.

Tableau 1 : Comparaison entre la répartition des efforts (en millions de tonnes de CO2 évitées) prévue dans la SNBC et la répartition « efficace » obtenue par la D-CAM agrégée

	Résultats agrégés		Objectifs sectoriels de la SNBC	
	2030	2050	2030	2050
Énergie	27	103	10	48
Industrie	34	61	44	102
Agriculture	26	50	26	50
Bâtiment	41	93	50	109
Transport	45	109	66	126
Autre	11	45	5	26
Total	184	460	201	460

ESTIMER LES COÛTS MACROÉCONOMIQUES DE LA TRANSITION BAS CARBONE

L'optimisation réalisée pour construire les courbes peut donner une indication du coût total de l'utilisation des technologies/mesures à mobiliser au cours de la période considérée dans 4 scénarios : (i) au fil de l'eau, (ii) optimisé par rapport à l'objectif 2050 du facteur 4, (iii) optimisé par rapport à un objectif intermédiaire en 2030, (iv) optimisé sans objectif de réduction d'émissions. Le scénario agrégé sans objectif dont la figure 18 présente la D-CAM permet de fournir un autre point de comparaison au scénario facteur 4 que le seul scénario théorique au fil de l'eau. À la différence du scénario au fil de l'eau qui fige le coût des technologies/mesures utilisées en 2012, le scénario sans objectif mobilise tous les gisements de réduction d'émissions qui lui permettent de satisfaire la demande globale au moindre coût. Ce scénario va ainsi mobiliser l'ensemble des coûts négatifs. Comparer le coût total du scénario facteur 4 au coût total

Partie 3 : Courbe agrégée et messages clés

du scénario sans objectif permet de donner la borne supérieure du coût net de la transition bas carbone sans entrer dans la controverse sur l'existence ou non de coûts négatifs.

Le tableau 2 présente d'abord le coût total de l'utilisation de technologies/mesures qui permettent de satisfaire la demande globale (énergie, transport, bâtiment, industrie) dans ces quatre scénarios, puis le coût (ou le gain) net de la transition selon deux points de comparaison : le scénario au fil de l'eau et le scénario sans objectif.

Tout au long de la période 2012 – 2050, le coût total du scénario facteur 4 reste inférieur à celui du scénario au fil de l'eau en raison d'un nombre important de gisements à coûts négatifs liés essentiellement à de l'efficacité énergétique, exploités durablement (rénovations dans le bâtiment) ou temporairement (utilisation transitoire de véhicule thermique plus efficace). L'écart se réduit en fin de période avec la mobilisation de gisements de plus en plus chers. Donc sur l'ensemble de la période, le scénario bas carbone procure un gain net par rapport au scénario au fil de l'eau. La différence entre le scénario sans objectif et le scénario facteur 4 fait apparaître sans surprise un coût qui augmente tout au long de la période pour atteindre, en 2048, 62 milliards d'euros ce qui représente environ 10 % des dépenses totales d'investissement à cette date.

Tableau 2 : Coûts annuels totaux en milliard d'euros de l'utilisation des technologies/mesures dans quatre scénarios, hors externalités

	Coûts totaux des scénarios (en G€)						
	2012	2018	2024	2030	2036	2042	2048
Coût total_fil de l'eau	207	234	261	289	316	343	370
Coût total_facteur4	207	210	226	246	274	315	362
Coût total_sans-objectif	207	208	235	235	255		
	Coûts nets de la transition bas carbone (en G€)						
Fil de l'eau – facteur 4	0	24	35	43	42	28	8
Sans_objectif – facteur 4	0	-2	-6	-11	-19	-38	-62

Pour interpréter ces chiffres, il est important de rappeler que ces coûts résultent d'une optimisation qui ne prend en compte ni les co-bénéfices ou effets antagonistes des mesures sur d'autres objectifs de politiques publiques, ni les effets sur le développement de filières économiques. En ce sens elle surestime les coûts du scénario bas carbone. Cet effet est renforcé par l'absence de prix du carbone dans le modèle. Mais les hypothèses faites sur le scénario au fil de l'eau, qui figent le coût des technologies/mesures, surestiment également le coût de ce scénario. Une partie des coûts moyens négatifs des technologies/mesures d'abattement provient de ces hypothèses. Il est probable que le scénario au fil de l'eau « réel » aurait exploité, au moins en partie, ces gisements à coûts négatifs. Une façon conservatrice de mesurer le coût net de la transition bas carbone serait de ne considérer que les coûts

d'abattement moyens positifs pour ne se concentrer que sur les « surcoûts » par rapport au scénario au fil de l'eau. Là encore, le signe du bilan net n'est pas immédiatement déterminable. Les changements dans la structure de la demande et dans l'efficacité énergétique des technologies dans le scénario bas carbone peuvent réduire la demande globale et donc limiter les surcoûts par rapport au scénario au fil de l'eau en raison d'une moindre utilisation des technologies/mesures.

LES LIMITES DES COURBES D-CAM

Plusieurs limites ont déjà été évoquées plus haut : la modélisation simplifiée du secteur électrique, le périmètre des émissions considérées. Les deux suivantes sont particulièrement importantes, et il faut les garder à l'esprit lors de l'interprétation des courbes dynamiques de coûts d'abattement moyens telles qu'elles ont été construites ici :

Des cinétiques sommaires

Le déploiement de chacun des gisements a été simplifié à l'extrême, sous forme d'une vitesse unique de déploiement censée synthétiser l'ensemble de freins au déploiement qui ne relèvent pas de la simple contrainte sur les coûts. Cela rend la chronologie de déploiement des mesures essentiellement indicative mais permet toutefois de mettre en évidence de possibles contradictions entre objectifs de moyen et long terme. Trois limites importantes sont à mentionner :

- Dans l'outil, le planificateur est preneur de prix sur chacun des gisements, ce qui revient à supposer que tous les effets d'apprentissage sont exogènes. Il est donc délicat d'utiliser ce type d'approche pour délivrer des messages fins sur des objectifs de recherches sectorielles à conduire.
- Par ailleurs, un certain nombre de technologies sont associées à des choix, potentiellement irréversibles – développement d'un réseau de distribution d'énergie pour les véhicules, choix d'un niveau de rénovation optimal d'un bâtiment, choix en matière d'occupation de l'espace public - À l'inverse, ici il n'y a pas de coûts directement associés à un retour sur l'un de ces choix.
- De la même manière, il n'y a pas de surcoûts associés à l'apparition de gisement tels que des centrales thermiques qui n'entreraient en utilisation que pour une durée nettement inférieure à la durée de vie de l'équipement.

Des courbes de coûts dont l'interprétation n'est pas univoque

Les coûts individuels des mesures peuvent servir de base de discussion, mais ne fournissent pas d'indication sur la hiérarchie des mesures à mobiliser pour plusieurs raisons :

- les arbitrages entre mesures doivent nécessairement intégrer des éléments qui ne peuvent être pris en compte par l'approche utilisée : poursuite d'autres objectifs de politiques publiques, externalités, effets macro-économiques ;
- les coûts ne suffisent pas à montrer les interdépendances entre certains gisements, et leur aspect temporel ;
- ils sont soumis à des incertitudes (en particulier sur l'évolution jusqu'en 2050 liée aux progrès techniques ou aux diffusions massives de technologies).

Par ailleurs, l'optimisation réalisée ne porte que sur un critère de coût financier de chacun des gisements. Il s'agit d'une approche de la transition « au moindre coût », qui omet l'ensemble des co-bénéfices économiques de la transition bas carbone, en termes de niveau d'activité, d'emploi ou d'externalités environnementales (qualité de l'air notamment). En ce sens, l'analyse tend à surestimer les coûts. *A contrario*, elle tend à sous-estimer les coûts en écartant les coûts de transaction privés qui peuvent s'ajouter aux coûts financiers des technologies.

Conclusion

Cette étude du CGDD présente un outil original de modélisation des transformations nécessaires du système productif français pour atteindre l'objectif d'une division par 4 des émissions de GES d'ici 2050 au moindre coût.

Cet outil permet, en première approche, de (i) nourrir des scénarios agrégés ou sectoriels de transition bas carbone ; (ii) offrir des points de comparaison « objectivés » aux budgets carbone retenus par la stratégie nationale bas carbone ; (iii) apprécier la cohérence de points de passage avec l'objectif de long terme du facteur 4 en pointant les risques et les coûts de verrouillages technologiques indésirables ; (iv) définir des chroniques de déploiement efficient des mesures de réduction d'émissions en fonction de leur potentiel et de leur vitesse de déploiement.

Mais les résultats – mis en forme au travers des courbes D-CAM – doivent être interprétés avec précaution. Ils dépendent d'une base de données qui rassemble des informations sur plus de 500 gisements de réduction d'émissions connus dans les secteurs du transport, du bâtiment, de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture et des déchets. Ces gisements prennent la forme de technologies plus efficaces, de nouvelles sources d'énergie mais aussi de mesures comportementales. Chaque gisement est caractérisé par un potentiel, une vitesse de déploiement et un coût. Les larges incertitudes qui demeurent pour quantifier ces critères sur de nombreux gisements réduisent la précision des résultats. Ils permettent ainsi de pointer des tendances mais ne sauraient en aucun cas préconiser des chroniques précises de déploiement des gisements.

La qualité de la base de données qui informe les courbes D-CAM est ainsi tout à fait critique. Pour être évolutive, cette base doit faire l'objet de discussions transparentes entre parties prenantes de la stratégie bas carbone. La construction ouverte et collaborative de la base de données est une condition pour que les courbes D-CAM délivrent des messages appropriables. Cet outil peut alors fournir des points de comparaison utiles aux options retenues par la stratégie nationale bas carbone.

Il a été conçu pour faire dialoguer des visions du monde divergentes dans un cadre cohérent. En utilisant différents jeux de données fondés sur des expertises divergentes, les courbes D-CAM permettent de visualiser les effets de différentes visions du monde sur le rythme et les options efficaces à mobiliser pour la transition bas carbone. La transparence de la base de données utilisée est ainsi un élément déterminant de la crédibilité, de l'acceptation et de la pertinence de l'outil.

RÉFÉRENCES

ADEME (2012). L'exercice de prospective de l'ADEME « Vision 2030-2050 ».

De Perthuis, C., Buba, J., Million, A., Scapecchi, P., & Teissier, O. (2011). Trajectoires 2020–2050 Vers Une Économie Sobre En Carbone: Rapport Du Comité Présidé Par Christian de Perthuis. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement.

European Commission (2013). Trends to 2050.

Gollier, C. (2011). Le calcul du risque dans les investissements publics. Rapport pour le Centre d'Analyse Stratégique.

IEA (2015). Energy technology perspectives.

INRA (2013). Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? <http://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/237958-637ec-resource-etude-reduction-des-ges-en-agriculture-synthese-90-p-.html>

IEA (2014). Energy technology perspectives.

IPCC (2014). Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY.

Johnson, T. M., Alatorre, C., Romo, Z., & Liu, F. (2010). Low-carbon development for Mexico. World Bank

Kesicki, F., & Anandarajah, G. (2011). The role of energy-service demand reduction in global climate change mitigation: Combining energy modelling and decomposition analysis. Energy Policy, 39(11), 7224-7233.

Kesicki, F., Ekins, P. (2012). Marginal abatement cost curves: a call for caution. Climate Policy, 12(2), 219-236.

McKinsey (2009). Pathways to a Low-Carbon Economy Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve.

Vogt-Schilb, A., & Hallegatte, S. (2011). When starting with the most expensive option makes sense: Use and misuse of marginal abatement cost curves. World Bank Policy Research Working Paper Series, Vol.

Vogt-Schilb, A., & Hallegatte, S. (2014). Marginal abatement cost curves and the optimal timing of mitigation measures. Energy Policy, 66, 645-653.



Conditions générales d'utilisation

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille — 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'oeuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1er juillet 1992 — art. L.122-4 et L.122-5 et Code pénal art. 425).

Dépôt légal : septembre 2016

ISSN : en cours



La loi de transition énergétique pour la croissance verte a confirmé l'objectif national du facteur 4 en 2050 et engage ainsi la France dans une trajectoire de décarbonation de son économie.

En pratique, la cible du facteur 4 implique une profonde transformation du système productif qui repose encore, pour une large part, sur les énergies fossiles. Une telle transformation est toutefois possible. Les potentiels des gisements de réduction d'émissions connus dans les secteurs du transport, du bâtiment, de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture et des déchets sont suffisants pour décarboner l'économie française. Ces gisements prennent la forme de technologies plus efficaces, de nouvelles sources d'énergie mais aussi de mesures comportementales. Le défi pour les pouvoirs publics et les acteurs sectoriels de la transition bas carbone consiste alors à mobiliser, parmi ces gisements, ceux qui permettent d'atteindre l'objectif selon une chronologie de déploiement et une répartition sectorielle qui en minimise le coût.

Cette étude du CGDD présente l'outil D-CAM (ou MACC en anglais) de suivi de la dynamique des coûts moyens des mesures de réduction d'émissions en France jusqu'en 2050.

Trajectoires de transition bas carbone en France au moindre coût



Commissariat général au développement durable

Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable
Sous-direction de l'économie des ressources naturelles et des risques
Tour Séquoia
92055 La Défense cedex
Courriel : ernr.seei.cgdd@developpement-durable.gouv.fr

www.developpement-durable.gouv.fr



Annexes



Annexes

Tableau :1 Gisements dans le secteur du transport

Nom	Unité	Potentiel	Utilisation 2012	Utilisation 2050	Réduction CO2 en 2050 (MtCO2eq)	Coût moyen (euros/tCO2)	Réductions cumulées de CO2 de 2012 à 2050 (MtCO2eq)
Diesel 4,9L, Amélioration de l'efficacité du parc actuel de véhicules légers diesel pour atteindre 4,9l/100km	Gkm	79 % de VL km	0	0	0	-316	479
VL voy,km	Gkm,voy	100 % de Demande totale en mobilité	800	859	0,2	121	45
Fret fer Nouvelles infras	Gt,km	13	0	11	0,2	500	9
Télétravail	Gkm,voy	74	0	74	0,4	-500	42
Remplissage VL/covoiturage	Gkm,voy	44 % de VL voy,km	277	380	0,7	-500	85
Mode doux/vélos publics	Gkm,voy	24	0	24	2	488	22
PL GNV	Gt,km	166	0	149	10,3	500	66
Efficacité PL Diesel 2020	Gt,km	100 % de PL	0	340	13,2	105	77
Véhicule léger Hydrogene	Gkm	15 % de VL km	0	66	15,5	447	275
Remplissage poids lourds, +10 % en 2028	Gt,km	103	0	92	2	-433	85
Décarbonation Diesel	TWh	10 000	372	152	2,1	121	45
LGV Nouvelles infras	Gkm,voy	54	0	32	2,5	500	34
Véhicule léger électrique	Gkm	28 % de VL km	0	124	28,9	425	491
Véhicules légers Hybride avec performance énergétique croissantes	Gkm	100 % de VL km	0	288	46	277	498

Annexes

Tableau 2 : Gisements dans le secteur des déchets

Nom	Unité	Potentiel	Utilisation 2012	Utilisation 2050	Réduction CO2 en 2050 (MtCO2eq)	Coût moyen (euros/tCO2)	Réductions cumulées de CO2 de 2012 à 2050 (MtCO2eq)
Réduction des déchets	Mt	28 % de Déchets solides	0	30	0,5	-500	39
Recyclage déchets	Mt	70 % de Déchets produits	46	85	0,7	-5	82
Captage méthane	Mt	100 % de Décharge	0	13	12,8	76	77
Incinération valorisation	Mt	66 % de Déchets solides non recyclés	17	23	0	236	5
Valorisation énergétique de 100 % de la chaleur induite par l'incinération des déchets	Mt	100 % de Incinération valorisation	10	21	2,3	225	13

Annexes

Tableau 3 Gisements dans le secteur du bâtiment

Nom	Unité	Potentiel	Utilisation 2012	Utilisation 2050	Réduction CO2 en 2050 (MtCO2eq)	Coût moyen (euros/tCO2)	Réductions cumulées de CO2 de 2012 à 2050 (MtCO2eq)
Chaleur urbaine	Mm2	15 % de RT 2020	0	13	0,0	-52	0,8
Chaudière bois	Mm2	20 % de RT 2020	0	8	0,0	500	0,5
Chaudière condensation	Mm2	100 % de Non rénové	0	5	0,0	-138	1,5
Rénovation lourde	Mm2	83 % de Logements collectifs élec Énergivore	0	7	0,1	28	0,3
Rénovation intermédiaire	Mm2	50 % de fioul GPL	0	60	0,1	-71	15,6
Chaudière bois	Mm2	20 % de RT 2012	0	11	0,1	438	7,5
Chaudière condensation	Mm2	100 % de Non rénové	0	10	0,1	-197	8,2
PAC	Mm2	100 % de Non rénové	0	0	0,1	284	
Chaudière condensation	Mm2	100 % de Non rénové	0	1	0,1	-246	15,6
Chaleur urbaine	Mm2	15 % de RT 2012	0	21	0,1	-46	1,7
Chaudière condensation	Mm2	100 % de Non rénové	0	4	0,1	-167	24,0
Chaudière gaz	Mm2	100 % de Non rénové	214	264	0,1	-160	0,7
Rénovation modérée	Mm2	100 % de logements collectifs élec Énergivore	0	21	0,2	-38	1,6
RT 2012	Mm2	392	0	134	0,2	-183	18,6
	Mm2	100 % de maisons	0	105	0,2	-500	3,7

Annexes

Nom	Unité	Potentiel	Utilisation 2012	Utilisation 2050	Réduction CO2 en 2050 (MtCO2eq)	Coût moyen (euros/tCO2)	Réductions cumulées de CO2 de 2012 à 2050 (MtCO2eq)
Efficacité Chaudières		individuelles Bois					
Rénovation lourde	Mm2	83 % de logements collectifs gaz moyen	0	30	0,2	65	32,4
Passage Chaudière bois	Mm2	15 % de Non rénové	0	60	0,3	-343	1,4
Rénovation lourde	Mm2	42 % de Gaz	0	28	0,3	213	0,8
PAC	Mm2	50 % de Non rénové	0	0	0,3	111	0,9
Passage Chauffage urbain	Mm2	15 % de Non rénové	0	60	0,4	-51	1,9
Rénovation modérée	Mm2	50 % de Elec	0	78	0,5	6	6,4
PAC	Mm2	50 % de Non rénové	0	14	0,6	232	1,9
PAC	Mm2	100 % de Non rénové	0	4	0,8	-33	13,8
Rénovation lourde	Mm2	42 % de Elec	0	100	0,8	-112	15,6
Passage Chauffage urbain	Mm2	15 % de Non rénové	0	5	0,8	16	18,8
PAC	Mm2	100 % de Non rénové	0	2	0,9	57	13,1
Chaudière condensation	Mm2	100 % de Non rénové	0	84	1,4	23	36,2
PAC	Mm2	50 % de Non rénové	0	84	1,6	63	10,8
Chaudière condensation	Mm2	100% de Non rénové	0	15	1,8	-23	45,0
PAC	Mm2	50% de Non rénové	0	15	2,1	-89	45,9

Annexes

Nom	Unité	Potentiel	Utilisation 2012	Utilisation 2050	Réduction CO2 en 2050 (MtCO2eq)	Coût moyen (euros/tCO2)	Réductions cumulées de CO2 de 2012 à 2050 (MtCO2eq)
RT 2020	Mm2	336	0	161	2,1	-33	17,6
Chaudière condensation	Mm2	100 % de Non rénové	0	130	2,6	14	23,5
PAC	Mm2	100 % de Non rénové	0	98	2,6	-38	45,3
Passage Chaudière bois	Mm2	20 % de Non rénové	0	30	2,9	-155	66,3
Chaudière condensation	Mm2	100 % de Non rénové	0	7	3,1	-37	42,4
Chaudière condensation	Mm2	100 % de Non rénové	0	149	3,9	-6	77,4
PAC	Mm2	50 % de Non rénové	0	149	4,5	-54	90,8
Décarbonation électricité	TWh	10 000	119	178	5,7	-24	118,2
PAC fioul	Mm2	100 % de Non rénové	0	106	6,0	-125	99,7
Chaudière condensation	Mm2	100 % de Non rénové	0	166	6,6	-16	64,5
PAC	Mm2	100 % de Non rénové	0	196	7,6	-93	132,9
Décarbonation Gaz	TWh	10 000	240	195	8,8	134	162,9
Décarbonation Chaleur urbaine	TWh	10 000	17	35	9,3	28	67,9
PAC Elec	Mm2	100 % de Non rénové	0	114	10,8	6	137,7
Construction de logements neufs respectant les exigences de la RT2012	Mm2	1 710	0	954	18,6	-500	316,2

Annexes

Tableau 4 : Gisements dans le secteur de l'agriculture

Nom	Unité	Potentiel	Utilisation 2012	Utilisation 2050	Réduction CO2 en 2050 (MtCO2eq)	Coût moyen (euros/tCO2)	Réductions cumulées de CO2 de 2012 à 2050 (MtCO2eq)
Réduction apports protéiques vaches laitières	MtCo2e	0	0	0	0,0	-94	3,8
Réduction apports protéiques Porcs	MtCo2e	1	0	1	0,0	-84	18,7
Serres chauffées	MtCo2e	0	0	0	0,1	-144	2,2
Culture intercalaires	Mha	0	0	0	0,1	15	1,2
Bâtiments avicoles	MtCo2e	0	0	0	0,3	-285	6,3
Bandes enherbées	Mha	0	0	0	0,3	500	0,96
Ajout de nitrate en rations	MtCo2e	0	0	0	0,6	37	7
Culture intermédiaires	Mha	4	0	3	0,9	158	7
Légumineuse sur prairies	Mha	2	0	2	0,9	-96	28,5
Labour 1 an sur 5	Mha	68 % de Changement techniques de labour	0	4	1,8	7	8,6
Légumineuse sur grandes cultures	Mha	1	0	1	1,8	18	33,1
Substitution glucides lipides	MtCo2e	1	0	1	1,9	267	10,3
Tracteurs	MtCo2e	2	0	2	2,0	-160	50
Gestion des prairies	Mha	10	0	10	3,0	-145	81
Haies	Mha	0	0	0	3,9	99	69,3
Agroforesterie	Mha	0	0	0	4,7	13	82,8

Annexes

Nom	Unité	Potentiel	Utilisation 2012	Utilisation 2050	Réduction CO2 en 2050 (MtCO2eq)	Coût moyen (euros/tCO2)	Réductions cumulées de CO2 de 2012 à 2050 (MtCO2eq)
Semis Direct	Mha	68 % de Changement techniques de labour	0	10	6,0	10	53,6
Torchères	MtCo2e	45 % de Rations actuelles	0	5	6,1	59	94,9
Gestion de l'azote	Mha	12	0	12	6,1	-45	186,7
Methanisation	MtCo2e	62 % de Rations actuelles	0	8	9,0	16	158,4

Tableau 5 : Gisements dans le secteur de l'industrie

Nom	Unit é	Potentiel	Utilisation 2012	Utilisation 2050	Réduction CO2 en 2050 (MtCO2eq)	Coût moyen (euros/tCO2)	Réductions cumulées de CO2 de 2012 à 2050 (MtCO2eq)
Métallurgie Gaz	TWh	18 % de métaux énergie	12	11	0,0	83	0,1
Consommation énergie métaux	TWh	4 % de Demande énergie métaux	0	2	0,3	-181	7,6
Moteurs industrie	TWh	37 % de Industrie électricité	0	9	0,4	254	2,4
Cogénération industrie	TWh	0 % de Consommation énergie Autres industries	0	1	0,4	-331	7,7
Gains organisationnels Industrie	TWh	2 % de Demande énergie autres industries	0	8	0,4	-276	18,3
métaux Gaz CCS	TWh	33 % de métallurgie Gaz	0	3	0,5	97	4,8
Efficacité énergétique métaux	TWh	7 % de Demande énergie métaux	0	5	0,5	-181	21,6
Efficacité énergétique matériaux	TWh	19 % de Demande énergie matériaux	0	14	0,6	-212	28,5
Gains solutions éprouvées Industrie	TWh	5 % de Demande énergie autres industries	0	16	0,9	-276	38,1
matériaux Gaz CCS	TWh	28 % de matériaux Gaz	0	9	0,9	93	10,2
Chimie Gaz CCS	TWh	28 % de Chimie Gaz	0	6	1,1	101	15,8
Ammoniac décomposition N2O	Mt	100 % de Ammoniac	0	1	1,1	19	6,2

Annexes

Nom	Unité	Potentiel	Utilisation 2012	Utilisation 2050	Réduction CO2 en 2050 (MtCO2eq)	Coût moyen (euros/tCO2)	Réductions cumulées de CO2 de 2012 à 2050 (MtCO2eq)
Industrie Chaleur fatale	TWh	2 % de Consommation énergie Autres industries	0	4	1,2	-331	24,4
matériaux Vapeur	TWh	12 % de matériaux Usages thermiques	0	4	1,3	171	10,8
métaux Charbon CCS	TWh	33 % de métallurgie Charbon	0	1	1,4	69	8,2
Matières premières végétales	TWh	12 % de Chimie non énergétique	0	5	1,5	0	27,6
Efficacité énergétique Chimie	TWh	18 % de Demande énergie Chimie	0	23	1,6	-206	77,1
Chaudières et locaux industrie	TWh	12 % de Demande énergie autres industries	0	41	2,1	-150	76,9
matériaux Biomasse et Déchets	TWh	32 % de matériaux Usages thermiques	6	17	2,2	23	48,0
Chimie Vapeur	TWh	12 % de Consommation énergie Chimie	7	12	2,2	196	19,0
Gains solutions innovantes Industrie	TWh	13 % de Demande énergie autres industries	0	43	2,3	-276	99,1
Métallurgie Vapeur	TWh	12 % de métaux énergie	0	7	2,3	196	19,5

Annexes

Nom	Unit é	Potentiel	Utilisation 2012	Utilisation 2050	Réduction CO2 en 2050 (MtCO2eq)	Coût moyen (euros/tCO2)	Réductions cumulées de CO2 de 2012 à 2050 (MtCO2eq)
Ciment CCS	Mt	28 % de procédés ciment	0	4	2,3	83	20,9
matériaux Gaz	TWh	100 % de matériaux Usages thermiques	19	34	2,7	48	48,4
Industrie électricité	TWh	50 % de Consommation énergie Autres industries	61	87	2,9	105	29,1
Métallurgie Biomasse et Déchets	TWh	32 % de métaux énergie	0	19	4,6	-116	75,9
Industrie Vapeur	TWh	12 % de Consommation énergie Autres industries	8	23	5,1	210	36,4
Industrie Biomasse et Déchets	TWh	32 % de Consommation énergie Autres industries	26	64	7,7	-1	161,8
Chimie Biomasse et Déchets	TWh	32 % de Consommation énergie Chimie	0	32	8,5	35	172,2
Décarbonation électricité	TWh	10 000	122	122	9,0	-24	151,3
Décarbonation chaleur urbaine	TWh	10 000	17	48	9,9	59	95,4
Décarbonation gaz	TWh	10 000	142	153	24,4	130	325,8

Tableau 6 : Gisements dans le secteur de l'énergie

Nom	Unité	Potentiel	Utilisation 2012	Utilisation 2050	Réduction CO2 en 2050 (MtCO2eq)	Coût moyen (euros/tCO2)	Réductions cumulées de CO2 de 2012 à 2050 (MtCO2eq)
STEP 2	TWh	1	0	0	0,1	106	0,4
Hydroélectricité lac	TWh	37	30	37	0,3	-52	0,8
Charbon avec capture et stockage du carbone	TWh	3	0	1	0,4	65	1,2
Raffineries CCS	Mt	37 % de Production raffineries	0	14	1,9	61	21,1
Solutions Combustibles solides	MtCo2e	3	0	2	2,2	66	24,0
Décarbonation gaz	TWh	10 000	41	72	2,2	124	18,0
STEP 1	TWh	4	0	4	2,4	-67	43,5
RCU Biomasse	TWh	65 % de Chaleur urbaine	1	18	3,8	-43	45,7
Réduction demande raffinerie	Mt	41	0	41	4,0	0	74,8
RCU Gaz CCS	TWh	30	0	18	4,6	17	26,4
Biomasse Cogénération	TWh	19	0	18	10,5	-28	186,8
Cycles Combinés Gaz avec CCS	TWh	30	0	23	15,8	77	100,8