Rapport

Juin 2021

Les coûts d'abattement

Partie 1 – Méthodologie

Rapport de la commission présidée par
Patrick Criqui

FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

LES COÛTS D'ABATTEMENT

Partie 1 – Méthodologie

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

Rapporteurs

Stéphane Crémel, Direction générale du Trésor

Aude Pommeret, France Stratégie

FRANCE STRATÉGIE

JUIN 2021

PRÉSENTATION

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

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

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

L'objectif des travaux de la commission est triple :

- préciser le sens (ou les) sens que l'on donne au « coût d'abattement » et définir un cadre méthodologique partagé pour les calculs de ces coûts ;

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

- expliquer l'interprétation qui peut être faite d'une évaluation des coûts d'abattement en fonction du mode de calcul retenu, en particulier préciser comment elle peut être comparée à la valeur de l'action pour le climat ;
- présenter les coûts d'abattement harmonisés d'une série de technologies ou d'actions pour la réduction des émissions ainsi que l'utilisation qui pourrait en être faite au service des politiques climatiques et les limites de ces utilisations.

Cette première partie méthodologique explicite le concept et les méthodes de calcul des coûts d'abattement socioéconomiques. Les travaux de la commission seront ensuite publiés de façon séquentielle. Suivront ainsi des parties thématiques présentant des illustrations des coûts d'abattement pour six grands secteurs : transports, électricité, hydrogène, bâtiment, industrie et agriculture.

TABLE DES MATIÈRES

Synthèse 7

Introduction 19

Chapitre 1 – Un indicateur d'efficience, cohérent avec la théorie de l'investissement 23

1. Analyse préliminaire 23

2. Un calcul cohérent avec la théorie économique de l'investissement, fondée sur le calcul de la valeur actualisée nette 24

2.1. Le coût d'abattement « en budget carbone » : un coût d'abattement « intrinsèque » 26

2.2. Le coût d'abattement « ajusté à la VAC » : un coût d'abattement se référant à la SNBC 29

2.3. Le coût d'abattement « à valeur sociale du carbone constante », un calcul sans anticipation 30

3. D'une méthode à l'autre 31

4. Un exemple : véhicule hybride, véhicule électrique et véhicule thermqiue 34

5. Conclusions préliminaires 36

Chapitre 2 – Mise en œuvre pratique 39

1. Le choix de la situation de référence 39

2. L'évaluation en pratique du surcoût socioéconomique 42

2.1. Surcoût (privé) pour le porteur de l'action 42

2.2. Terme correctif de l'impact sur les finances publiques 46

2.3. Coûts externes (et prise en compte des cobénéfices) 47

Chapitre 3 – Replacer les coûts dans une perspective plus large 51

1. Définir les gisements de manière pertinente 51

2. La prise en compte du volume des gisements : un indicateur complémentaire et nécessaire 54

3. L'importance d'une mise en perspective dynamique 56

Chapitre 4 – Synthèse méthodologique et recommandations 59

ANNEXES

Annexe 1 – Membres de la commission et personnes auditionnées 63

Annexe 2 – Illustration numérique du choix entre véhicule hybride et véhicule électrique 65

SYNTHÈSE

Objectifs et approche de la commission

À la suite de l'accord de Paris, la France s'est fixé, dans son plan climat de 2017, l'objectif d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Pour atteindre cet objectif ambitieux, tous les secteurs, et en particulier les plus émetteurs de gaz à effet de serre (GES) – bâtiment, transport, industrie, énergie, agriculture – doivent opérer une transition profonde et déployer de nouvelles solutions à basses ou zéro émissions de GES. La Stratégie nationale bas carbone (SNBC) et la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), qui sont révisées tous les cinq ans, donnent pour chaque secteur les orientations pour atteindre les objectifs d'atténuation.

Pour guider les choix des solutions à déployer et s'assurer de leur efficacité économique, il convient de rapporter le coût des différents projets à une valeur sociale du carbone évité (VSC, en €/tCO_2eq), qui correspond à l'effort que la société dans son ensemble est prête à engager pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Le rapport Quinet en 2019[1] a proposé un tel cadre de référence en identifiant la VSC associée à la SNBC : cette valeur de référence spécifique a été nommée dans le rapport « valeur de l'action pour le climat » ou VAC. Elle doit permettre la prise en compte ou l'internalisation, dans les choix d'investissements publics ou privés, du nécessaire effort collectif pour la réduction des émissions, selon les objectifs de la SNBC. Elle permet également de classer et de sélectionner les actions à mettre en œuvre pour atteindre au moindre coût les objectifs de décarbonation : toutes les actions dont le coût unitaire est inférieur à la valeur de l'action pour le climat sont souhaitables du point de vue de la collectivité et doivent donc être mises en œuvre.

Pour identifier de manière rigoureuse ces actions, il est ainsi essentiel de connaître précisément les coûts d'abattement des différentes solutions, c'est-à-dire leur coût total,

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

rapporté aux émissions évitées. Le rapport de cette commission sur les coûts d'abattement constitue donc une nouvelle étape des réflexions engagées en France pour structurer, en termes économiques, l'élaboration des politiques de réduction des émissions. Il vise notamment à répondre aux recommandations du rapport Quinet (2019) qui préconisait :

- de normaliser les règles de calcul des coûts d'abattement afin de pouvoir comparer le coût des différentes actions sectorielles entre elles et par rapport à la VAC ;
- de mieux prendre en compte les cobénéfices de ces actions, du fait de la réduction des coûts environnementaux, de la diminution des coûts pour la santé ou de la réduction des dépendances extérieures ;
- d'évaluer l'ordre dans lequel ces actions ont vocation à être déployées pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050 de la manière la plus efficace possible.

Les travaux portant sur la VAC s'étaient appuyés sur la mobilisation de modèles économiques pour calculer le « signal-prix » associé à la recherche de la neutralité carbone en 2050 (ce signal-prix devant être distingué d'une éventuelle fiscalité carbone). L'approche de la commission sur les coûts d'abattement est différente et complémentaire, dans la mesure où elle vise :

- à définir un cadre méthodologique cohérent pour évaluer, au cas par cas, les actions de décarbonation à l'aide d'un indicateur en euros par tonne évitée (€/tCO_2eq) ;
- à appliquer cette méthodologie à une sélection d'actions de décarbonation sectorielles bien identifiées.

Alors que l'approche par la VAC visait à calculer une valeur générique pour évaluer l'ensemble des actions sectorielles associées à la SNBC (approche *top-down*), l'approche adoptée par la commission identifie des actions sectorielles précises, tente de calculer leurs coûts anticipés et éventuellement les compare au référentiel que constitue la VAC (approche *bottom-up*).

Les principes

La notion de coût d'abattement socioéconomique d'une action de décarbonation renvoie à un coût unitaire, du point de vue de la collectivité, de la réduction des émissions de GES. Il s'agit de rapporter le coût de mise en œuvre de l'action au volume total des émissions de GES évitées : ce coût d'abattement est donc exprimé en €/tCO_2eq.

En théorie de l'investissement, le coût de « l'option de projet » est toujours appréhendé par comparaison avec le coût de la situation sans projet ou « option de référence ». Il est alors possible de rapporter le surcoût induit par l'option de projet au volume des émissions

qu'elle permet d'éviter. Pour une référence donnée, le coût d'abattement (CA) constitue un indicateur d'efficience qui permet d'identifier les solutions de moindre coût.

$$\mathrm{CA} = \frac{\text{Surcoût de l'option étudiée par rapport à la référence}}{\text{Volume d'émissions évitées par l'option étudiée par rapport à la référence}} \qquad (1)$$

Au numérateur, la nature du surcoût est intrinsèquement liée à la perspective retenue pour l'évaluation. En particulier, les éléments de coût pris en compte et les valeurs qui leur sont attribuées peuvent être très différents selon que le point de vue est celui des pouvoirs publics ou celui d'un décideur privé (ménage ou entreprise). On notera en particulier que le surcoût doit en principe tenir compte des coûts sociaux ou des cobénéfices associés au projet.

Au numérateur comme au dénominateur, et bien qu'il s'agisse dans ce dernier cas de quantités physiques, la question de la « valeur actuelle » des coûts et des réductions, à différents horizons de temps futurs, se pose. On le verra, cette question est déterminante pour l'élaboration et le choix des méthodes de calcul.

Trois méthodes de calcul cohérentes, mais différentes selon les hypothèses sur l'actualisation des émissions évitées

Selon la théorie économique de l'investissement, le calcul de la valeur actualisée nette (VAN) d'un projet permet de déterminer si sa réalisation est créatrice nette de valeur, par rapport à une situation de référence. Il s'agit de comparer l'ensemble des bénéfices actualisés induits sur sa durée de vie avec les coûts actualisés de sa mise en œuvre.

Le coût d'abattement « en budget carbone »

La littérature économique utilise en général une formulation mathématique du coût d'abattement socioéconomique qui découle le plus directement de la définition donnée ci-dessus. Elle consiste à mettre au numérateur le surcoût socioéconomique actualisé associé au projet sur toute sa durée de vie et au dénominateur le volume total des émissions qu'il permet d'éviter. Cette solution revient à considérer que la valeur d'une tonne de CO_2 évitée est indépendante de la date à laquelle elle est évitée : une tonne évitée demain ou après-demain a la même valeur qu'une tonne évitée aujourd'hui[1].

[1] Cette formule peut être présentée alternativement comme l'actualisation des émissions évitées, au moyen d'une valeur sociale du carbone (VSC) qui croît au même rythme que le taux d'actualisation, présentation qui sera utile par la suite.

Méthode 1 – Coût d'abattement calculé « en budget carbone »

$$CA^1{}_i = -\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r\ \ )^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \Delta E_{i,t}} \qquad (3)$$

Où :

- $CA^1{}_i$ est le coût d'abattement « en budget carbone » du projet i
- $\Delta C_{i,t}$ est le coût additionnel (somme des coûts marchands et non marchands hors externalité climatique) du projet i par rapport à l'option de référence à la date t
- r est le taux d'actualisation socioéconomique
- $\Delta E_{i,t}$ est la variation d'émissions de GES du projet i par rapport à l'option de référence à la date t
- N est la durée de vie de l'investissement

Cette formule générique est utile pour comparer deux technologies entre elles comme pour des comparaisons internationales des coûts d'abattement. Comme elle ne fait pas intervenir la VAC, les coûts d'abattement obtenus ne lui sont pas contingents et n'auront pas à être recalculés en cas de révision de la VAC.

Néanmoins, ces coûts d'abattement (notés $CA^1{}_i$) ne sont pas de ce fait directement comparables à la VAC et ne peuvent donc pas être utilisé tels quels pour juger de l'efficience socioéconomique d'une action dans le cadre de la trajectoire française de réduction des émissions, telle que définie par la SNBC.

Le coût d'abattement « ajusté à la VAC » ou pour une VSC augmentant au même taux que la VAC

Si l'on tient compte du contexte spécifique que constitue la SNBC et la VAC qui lui est associée, l'application de la théorie de l'investissement conduit à une deuxième formule de calcul du coût d'abattement qui, elle, dépend de la trajectoire de la VAC sur la période de l'investissement.

Méthode 2 – Coût d'abattement « ajusté à la VAC » à comparer avec la VAC_0 initiale

$$\mathrm{VAN}_{\mathrm{SE,i}} = -\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t} + \mathrm{VAC}_t \times \Delta E_{i,t}}{(1+r\ \ )^t} > 0$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\mathrm{CA}^2{}_i = -\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r\ \ )^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\mathrm{VAC}_t}{\mathrm{VAC}_0(1+r\ \ )^t} \Delta E_{i,t}} < VAC_0$$

Où :

- $\mathrm{VAN}_{\mathrm{SE,i}}$ est la valeur socioéconomique actualisée nette du projet i
- $CA^2{}_i$ est le coût d'abattement « ajusté à la VAC » du projet i
- VAC_t est la valeur de l'action pour le climat à la date t
- VAC_0 est la valeur de l'action pour le climat à la date de lancement du projet
- $\Delta C_{i,t}$ est le coût additionnel (somme des coûts marchands et non marchands hors externalité climatique) du projet i par rapport à l'option de référence à la date t
- r est le taux d'actualisation socioéconomique
- $\Delta E_{i,t}$ est la variation d'émissions de GES du projet i par rapport à l'option de référence à la date t

Le coût d'abattement ainsi obtenu présente l'intérêt de pouvoir être directement comparé à la VAC à la date de l'investissement pour juger de la rentabilité socioéconomique du projet. On désignera par la suite ce $\mathrm{CA}^2{}_i$ comme le coût d'abattement « ajusté à la VAC ». Ainsi, en 2030, toutes les actions dont le coût d'abattement ajusté à la VAC sera inférieur à 250 €/tCO_2eq devront avoir été déployées pour assurer le respect de la trajectoire de décarbonation française.

Cette formule serait équivalente au coût d'abattement « budget carbone » si la VAC croissait au même rythme que le taux d'actualisation. C'est le cas à partir de 2040, mais de 2020 à 2040 la VAC calculée dans le rapport Quinet de 2019 augmente sensiblement plus vite que le taux d'actualisation : la commission Quinet a fait le choix, pour assurer le respect de la SNBC, de partir d'une VAC initiale faible, correspondant au niveau actuel de

la fiscalité carbone, mais croissant plus vite que le taux d'actualisation jusqu'en 2040. Cette formule peut ainsi présenter des difficultés d'interprétation, en particulier parce que deux investissements avec des caractéristiques de coûts et de réduction d'émissions identiques mais réalisés à deux dates différentes n'auront ainsi pas le même coût d'abattement : plus précisément, le coût d'abattement « ajusté à la VAC » est d'autant plus faible que la mise en œuvre est précoce, alors que le coût d'abattement « budget carbone » est indépendant de la date de mise en œuvre (toutes choses égales par ailleurs concernant les coûts et les émissions évitées, bien sûr).

Par ailleurs, les coûts d'abattement obtenus avec cette formule présentent l'inconvénient d'être spécifiques à la France et ne peuvent donc pas être comparés à ceux de la littérature internationale.

D'une méthode à l'autre

De manière générale, le classement des projets selon les coûts d'abattement calculés par les méthodes « en budget carbone » et « ajustée à la VAC » ne peut être considéré comme donnant des résultats identiques, car l'évaluation monétaire de ces bénéfices climatiques diffère, en particulier selon leur répartition dans le temps.

Pour autant, dans le cas particulier où deux projets permettent des baisses d'émissions réparties de manière homogène dans le temps, les deux méthodes de calcul sont équivalentes – à un coefficient multiplicatif près. Ce dernier ne dépend que de la date de mise en œuvre et de la durée de vie du projet. Ainsi par exemple, pour un investissement d'une durée de vie de 30 ans, à mettre en œuvre en 2030 le coût d'abattement « en budget carbone » sera évalué comme 25 % supérieur au coût d'abattement « ajusté à la VAC » :

$$CA^2_i = 0{,}8 \times CA^1_i \text{ pour un projet de 30 ans débutant en 2030}$$

En revanche, les classements des projets selon leur coût d'abattement ou selon leur valeur socioéconomique mesurée par la VAN associée ne sont pas équivalents. En effet :

- le coût d'abattement est un indicateur « intensif » qui détermine le surcoût collectif à consentir pour obtenir un bénéfice climatique unitaire à travers un projet donné ; il mesure donc un effet levier et permet d'identifier les gestes les plus créateurs de valeur pour la collectivité, pour un niveau d'effort donné ;
- à l'inverse, la VAN est un indicateur « extensif » qui mesure la valeur supplémentaire totale créée pour la collectivité, indépendamment du niveau d'effort nécessaire pour mettre en œuvre le geste.

On peut faire ici l'analogie avec les indicateurs permettant d'évaluer la pertinence socioéconomique des grands projets d'investissement public de l'État. On documente

généralement ces choix à l'aide notamment d'indicateurs tels que la « VAN socioéconomique par euro public investi » (indicateur intensif) et la « VAN socioéconomique totale » (indicateur extensif).

Calcul socioéconomique pour la collectivité et calcul pour un décideur privé

Dans un calcul économique privé, il n'y a *a priori* pas de raison de supposer que la trajectoire de valorisation des réductions d'émissions sur la durée de vie de l'investissement étudié sera anticipée par le décideur. Dans ce contexte, certains jugent pertinent d'utiliser, pour calculer les coûts d'abattement privés, une troisième méthode, dans laquelle les émissions au dénominateur sont actualisées. Cette formule donne plus de poids aux réductions d'émissions à court terme, puisqu'elle conduit à réduire la valeur des réductions d'émissions à moyen et long terme.

Méthode 3 – Coût d'abattement « à VSC constante »

$$CA^3{}_i = -\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r\ \ )^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta E_{i,t}}{(1+r\ \ )^t}}$$

Où :

- $CA^3{}_i$ est le coût d'abattement « en budget carbone » du projet i
- $\Delta C_{i,t}$ est le coût additionnel (somme des coûts marchands et non marchands hors externalité climatique) du projet i par rapport à l'option de référence à la date t
- r est le taux d'actualisation socioéconomique
- $\Delta E_{i,t}$ est la variation d'émissions de GES du projet i par rapport à l'option de référence à la date t

La formule de coût d'abattement « à VSC constante », noté $CA^3{}_i$, correspond à une situation dans laquelle c'est la valeur du carbone initiale qui valorise les réductions d'émissions sur toute la durée de vie du projet, et non une valeur augmentant au taux

d'actualisation ou au rythme de la VAC[1]. Contrairement à la formule « en budget carbone » la méthode sans anticipation de la hausse de la VSC conduit à une moindre valeur des réductions futures, du simple fait de l'actualisation. Les coûts d'abattement ainsi évalués pourront être dans ce cas interprétés comme les signaux-prix carbone constants (ou anticipés comme tels) qui permettraient de déclencher les gestes considérés par les agents économiques, avec leur taux d'actualisation propre. Cette formule fait toutefois l'hypothèse que le décideur n'anticipe aucune évolution de la valorisation des émissions de carbone, ce qui est bien entendu discutable. Le coût d'abattement « à VSC constante » n'anticipant pas d'augmentation de la VSC initiale sur la durée de vie de l'investissement, le coût d'abattement ainsi mesuré est supérieur au coût d'abattement « en budget carbone », et donc *a fortiori* au coût d'abattement « ajusté à la VAC ».

Le choix de la situation de référence

Ce choix a un impact très important sur les résultats obtenus. En toute rigueur, il convient de considérer en référence un service équivalent, caractérisé en général par l'association d'un équipement et d'un usage. Cependant, dans certaines actions, l'intensité d'usage peut se trouver modifiée, par exemple en présence d'un effet rebond. Les différentes situations à comparer devront alors être bien caractérisées.

Par exemple, pour calculer le coût d'abattement associé au passage d'un véhicule thermique à un véhicule électrique, il faudra tenir compte de modalités d'utilisation du véhicule éventuellement différentes. De la même manière, dans un logement bénéficiant d'une rénovation énergétique, les gains de consommation théoriques peuvent être en partie compensés par une augmentation de la consigne de chauffage conduisant à une amélioration du confort pour les habitants.

En outre, dans de nombreux cas, des effets systémiques apparaissent lorsque les solutions sont déployées à une échelle non marginale. Pour déterminer le coût d'abattement associé au passage d'une technologie fossile à une technologie renouvelable de production d'électricité, il sera facile de comparer le coût de production actualisé d'une centrale à gaz et celui d'une éolienne, prises isolément. Mais si le cadre de référence suppose un développement massif des énergies renouvelables variables « non commandables », alors il faudra prendre en compte d'autres éléments comme les facteurs de charges et surtout les coûts systèmes : coûts de raccordement, coûts d'équilibrage sur le réseau et coûts de profil de production.

[1] On peut rapprocher cette méthode de celle la plus souvent adoptée dans les calculs de coût actualisé de production de l'électricité (*levelized cost of electricity* – LCOE), lorsque les coûts utilisés sont des coûts instantanés, éventuellement projetés à un horizon de temps futur.

Les composantes du surcoût

On distinguera typiquement trois grandes composantes du surcoût socioéconomique associé à la mobilisation d'un gisement de réduction d'émissions : le surcoût privé, le coût d'opportunité pour les finances publiques (lié notamment aux changements dans les recettes fiscales), enfin l'ensemble des coûts externes engagés ou évités par le projet. Le principe général de la formule de calcul est alors :

$$\text{Coût d'abattement} = \frac{\textbf{Surcoût privé} \text{ pour le porteur de l'action de décarbonation} + \text{Terme correctif de } \textbf{l'impact FiPu} + \textbf{Coûts externes}}{\text{Emissions évitées}}$$

Le surcoût privé est celui supporté par le porteur de l'action de décarbonation, par exemple le particulier qui achète un véhicule électrique plutôt que thermique ; l'entreprise qui rénove thermiquement son parc de bureaux ; ou encore l'énergéticien qui étend ses moyens de production en investissant dans un champ éolien plutôt que dans une nouvelle centrale thermique à gaz.

Le terme d'« impact sur les finances publiques » consiste en réalité à corriger le surcoût privé de l'effet des subventions et dépenses ou avantages fiscaux, qui constituent des transferts neutres du point de vue de la collectivité dans son ensemble.

Le surcoût – ou le bénéfice externe – pour la collectivité consiste principalement en la somme des externalités induites ou évitées par la mise en œuvre de l'action, par exemple la diminution de la congestion et des pollutions qui sont associées au report modal de la voiture vers les modes actifs ou la réduction de la pollution de l'air associée au passage d'un chauffage à bois en foyer ouvert vers une pompe à chaleur.

Les gisements d'abattement

Les gisements de réduction peuvent être identifiés par grand secteur d'activité. On peut définir un gisement de réduction des émissions comme un ensemble d'actions, de toute nature – substitution technologique, évolution comportementale, organisationnelle – permettant de réduire le volume des émissions de GES par rapport à une situation de référence. Un gisement de réduction se caractérise notamment par son potentiel, qui correspond au volume total des émissions évitables du fait de cette action. Il est classiquement exprimé en tCO_2eq ou tCO_2eq/an.

Ces gisements renvoient à trois leviers principaux pour la réduction des émissions : la baisse de la demande de services énergétiques relevant de principes de sobriété,

qu'elle soit individuelle ou collective ; la réduction des consommations d'énergie induite par une plus grande efficacité technique ; et la décarbonation des sources et des vecteurs énergétiques.

Le raisonnement en coûts d'abattement et la hiérarchisation des actions de décarbonation concurrentes sur la base d'un indicateur prenant en compte les potentiels en volume permet de maximiser les réductions effectives d'émissions pour un niveau d'effort donné de la collectivité considérée (approche intensive).

Le calcul de la VAN, qui appréhende l'intégralité de la création de valeur, vient alors compléter utilement celui du coût d'abattement afin d'intégrer la dimension « potentiel de gisement », notamment s'il est susceptible de croître dans le temps (approche extensive). L'existence d'effets d'échelle et d'effets d'apprentissage explique pourquoi il est parfois nécessaire de financer des actions non immédiatement rentables afin de favoriser le développement technologique ou la baisse des coûts. On distinguera alors :

- les gisements socioéconomiquement rentables à court terme et ceux qui ne le sont pas (c'est-à-dire dont les coûts d'abattement sont respectivement significativement inférieurs ou supérieurs à la VAC) ;
- parmi les gisements non encore rentables aujourd'hui, ceux dont les perspectives d'évolution des coûts, à moyen et long terme, laissent pressentir qu'ils pourraient le devenir ;
- aux différents horizons de temps, les gisements rentables sans intégrer les cobénéfices et ceux dont la rentabilité résulte de la prise en compte d'objectifs de politiques publiques autres que climatiques (réduction des externalités environnementales, etc.).

Éléments d'une doctrine

Au-delà d'une apparente simplicité, le concept de coût d'abattement soulève donc de redoutables difficultés dans la définition des coûts à prendre en compte, des méthodes de calcul à appliquer, des interactions et effets systémiques à considérer.

Cette première partie méthodologique[1] examine en détail toutes ces questions. **Elle fait donc apparaître trois méthodes possibles pour le calcul : le coût d'abattement « en budget carbone », le coût d'abattement « ajusté à la valeur de l'action pour le**

[1] Des chapitres sectoriels, présentant des calculs de coût d'abattement dans les transports, la production électrique, la production et l'usage d'hydrogène, la rénovation thermique des bâtiments, l'industrie et l'agriculture seront publiés à la suite de cette partie méthodologique.

climat » et enfin le coût d'abattement « à valeur sociale du carbone constante ». Chacune de ces méthodes peut être pertinente, en fonction du contexte.

Compte tenu des objectifs poursuivis par la commission, il nous semble possible de privilégier de manière générale la méthode du coût d'abattement « en budget carbone » : c'est celle qui se rapproche le plus de la perspective d'une évaluation robuste et d'une comparaison cohérente, y compris à l'international, des différentes options stratégiques pour la réduction des émissions, dans les différents secteurs. Elle propose en quelque sorte une évaluation des coûts d'abattement « intrinsèque » et robuste car elle ne dépend pas de la VAC, qui, comme le recommande le rapport Quinet (2019), est amenée à être révisée régulièrement. L'approche par les coûts d'abattement « en budget carbone » est donc complémentaire mais indépendante des travaux déjà menés, avec d'autres méthodologies et d'autres outils, sur l'économie des stratégies de réduction des émissions.

Cependant, cette approche n'est pas sans rencontrer des limites, en particulier lorsque les choix d'investissement considérés s'inscrivent dans un processus de transformation radicale des systèmes sociotechniques. Le plus souvent, la comparaison terme à terme de deux solutions technologiques – l'option de projet et l'option de référence – apportera des enseignements très utiles sur la nature et l'ampleur des coûts et des impacts respectifs. **Cependant, elle ne rendra que très incomplètement compte des effets systémiques dans la transition environnementale** – effets que seules des modélisations technico-économiques, à la fois globales et détaillées, peuvent tenter d'approcher.

Les calculs des coûts d'abattement « en budget de carbone » gagnent donc à être replacés dans une perspective globale. C'est dans une certaine mesure ce que cherche à faire le calcul « ajusté à la VAC » puisqu'il resitue le calcul du coût d'abattement associé à une option sectorielle par rapport à une valeur de référence, la VAC, estimée en fonction de la Stratégie nationale bas carbone qui constitue le cadre d'ensemble de la politique climatique.

Cette politique se doit évidemment d'identifier les options efficientes du point de vue de la collectivité, et c'est l'objectif des travaux de la commission sur les coûts d'abattement. Mais pour analyser les actions à entreprendre pour la mise en œuvre concrète dans les décisions des acteurs décentralisés, il peut être nécessaire d'analyser les coûts d'abattement du point de vue des acteurs décentralisés – avec en particulier une vision « myope », par utilisation de la VSC au lancement du projet du fait d'une capacité d'anticipation limitée. L'écart entre des « décisions myopes » et ce qui serait utile et nécessaire du point de vue de la collectivité est une indication supplémentaire de la nécessité des politiques publiques et définit leur champ d'action.

On voit donc comment le chantier qui a été ouvert devra probablement s'appuyer sur les différentes approches. **Leurs résultats sont différents, mais on notera qu'en termes pratiques et sous certaines conditions, l'ordre de mérite des différentes options sera préservé et que les équivalences entre les résultats sont assez directes,** ce qui pourra faciliter les applications des différentes démarches.

Quel usage des coûts d'abattement ?

La comparaison des coûts d'abattement de différentes solutions, entre eux et par rapport à la VAC, doit permettre de choisir les technologies les plus efficaces du point de vue de la collectivité, ainsi que l'ordre dans lequel les déployer.

Mais les coûts d'abattement socioéconomiques ne disent rien des outils de politique économique à mettre en œuvre pour faciliter le déploiement de ces différentes solutions. Le décideur public dispose d'un panel d'outils pour favoriser l'adoption d'une technologie – norme, subvention, taxe, marché de quotas – sur la pertinence desquels les coûts d'abattement ne nous renseignent pas. En particulier, ils ne doivent pas être interprétés comme indiquant le niveau de la taxe carbone à partir duquel une technologie serait adoptée. Il y a plusieurs raisons à cela :

- La taxe carbone n'est qu'un élément parmi d'autres qui modifient les prix relatifs des différentes technologies. Par exemple, s'agissant de l'automobile, il existe une taxation spécifique du carburant indépendamment de la taxe carbone, et un système de bonus-malus désincitant à l'achat de véhicules thermiques, si bien que le niveau de taxe carbone nécessaire à déclencher des changements de comportement peut être bien inférieur au coût d'abattement.

- À l'inverse, les coûts d'abattement présentés ici sont des coûts d'abattement socioéconomiques, calculés avec le taux d'actualisation public et intégrant des cobénéfices ou externalités pour la société. Or le taux d'actualisation privé est le plus souvent beaucoup plus élevé que le taux d'actualisation public et les acteurs privés ne valorisent pas de la même manière que la puissance publique les cobénéfices ou externalités négatives de leurs investissements.

- Enfin, dans de nombreux secteurs, la mesure des coûts d'abattement socioéconomiques intègre mal les coûts de transaction auxquels peuvent faire face les acteurs privés. Ces coûts expliquent en particulier pourquoi certains investissements, même s'ils sont théoriquement rentables du point de vue du décideur privé, ne sont pas mis en œuvre en pratique.

INTRODUCTION

Dans son plan climat de 2017, la France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. L'atteinte de cet objectif entraînera des bouleversements profonds dans certains secteurs qui devront déployer des solutions peu ou pas émettrices de gaz à effet de serre (GES), qui sont aujourd'hui à des stades plus ou moins matures. Pour évaluer l'efficacité économique des solutions, la France doit se doter d'un nouveau cadre de référence et de nouveaux outils tenant compte de ses objectifs climatiques.

Le rapport Quinet (2019) sur la valeur de l'action pour le climat constitue le premier élément de cet arsenal d'évaluation. Il établit en effet la valeur sociale du carbone évité (VSC) associée à la trajectoire française de réduction des émissions. Cette valeur, appelée valeur de l'action pour le climat (VAC), correspond à l'effort que la société dans son ensemble est prête à engager pour la réduction des émissions de GES.

Cette valeur doit permettre de classer et de sélectionner les actions à déployer pour atteindre au moindre coût les objectifs de décarbonation : toutes les actions dont le coût d'abattement, c'est-à-dire le coût par tonne de CO_2e évitée, est inférieur à la valeur de l'action pour le climat – c'est-à-dire que leur mise en œuvre est rentable socioéconomiquement – sont souhaitables du point de vue de la collectivité.

La deuxième recommandation du rapport Quinet (2019) a constitué le point de départ des travaux de la commission sur les coûts d'abattement. La valeur de l'action climatique doit constituer

> « … la référence d'un cadre d'évaluation renforcé des actions de décarbonation :
>
> - Normaliser, sous l'égide de France Stratégie, les règles de calcul des coûts d'abattement socioéconomiques, afin de pouvoir comparer les différentes actions sectorielles de décarbonation à la valeur de l'action pour le climat.
> - Mieux prendre en compte, en sus de la décarbonation, les cobénéfices associés à la lutte contre le changement climatique : amélioration de la qualité de l'air et donc de la santé par réduction de la pollution locale, préservation et renforcement de la biodiversité ; meilleurs régimes alimentaires ; réduction de la sensibilité aux chocs pétroliers, voire avance technologique.

- Évaluer, sur la base de la trajectoire pluriannuelle proposée, l'ordre dans lequel ces actions ont vocation à être déployées pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050 de la manière la plus efficace possible, dans une logique de mise en cohérence des politiques publiques et d'accompagnement des transitions économiques et sociales. »[1]

C'est principalement l'approche intégrée par les modèles qui avait permis de déterminer la VAC, signal « miroir » de l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone en 2050. L'enjeu était alors d'établir une trajectoire de référence unique pour tous les secteurs, assise de manière implicite sur le niveau de l'ensemble des actions à mobiliser, permettant ultimement d'évaluer tous les différents gestes de manière décentralisée (en distinguant les efforts justifiés car présentant un coût unitaire inférieur à la VAC et ceux ne l'étant pas).

L'approche de la commission sur les coûts d'abattement est complémentaire dans la mesure où il s'agit :

1. de définir un cadre méthodologique pour caractériser, au cas par cas, les actions de décarbonation par un indicateur en €/tCO_2 et pouvoir évaluer leur pertinence socioéconomique à la lumière de la trajectoire de VAC ;
2. d'appliquer cette méthodologie à une sélection d'actions de décarbonation emblématiques.

Cette approche procède donc dans le sens opposé, en partant des technologies et des usages afin de comparer leurs coûts d'abattement au référentiel intégré qu'est la VAC (voir Graphique 1 page suivante).

L'approche privilégiée dans ce rapport sera donc « microfondée », parfois aussi dite « d'ingénieur ». Elle s'appuiera sur une segmentation fine des gisements et sur leur caractérisation détaillée par des hypothèses explicites. En revanche, l'approche par les modèles (en particulier sectoriels) pourra pallier certaines faiblesses, relatives notamment aux interdépendances / interactions entre mesures, et de s'assurer de la cohérence globale des résultats (le niveau de VAC permet-il bien de justifier d'un point de vue socioéconomique la mobilisation de gisements suffisants pour se placer sur une trajectoire de décarbonation compatible avec nos objectifs climatiques ?).

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

Graphique 1 – Logiques méthodologiques inversées des travaux de la commission Quinet (2019) et de la commission sur les coûts d'abattement (2021)

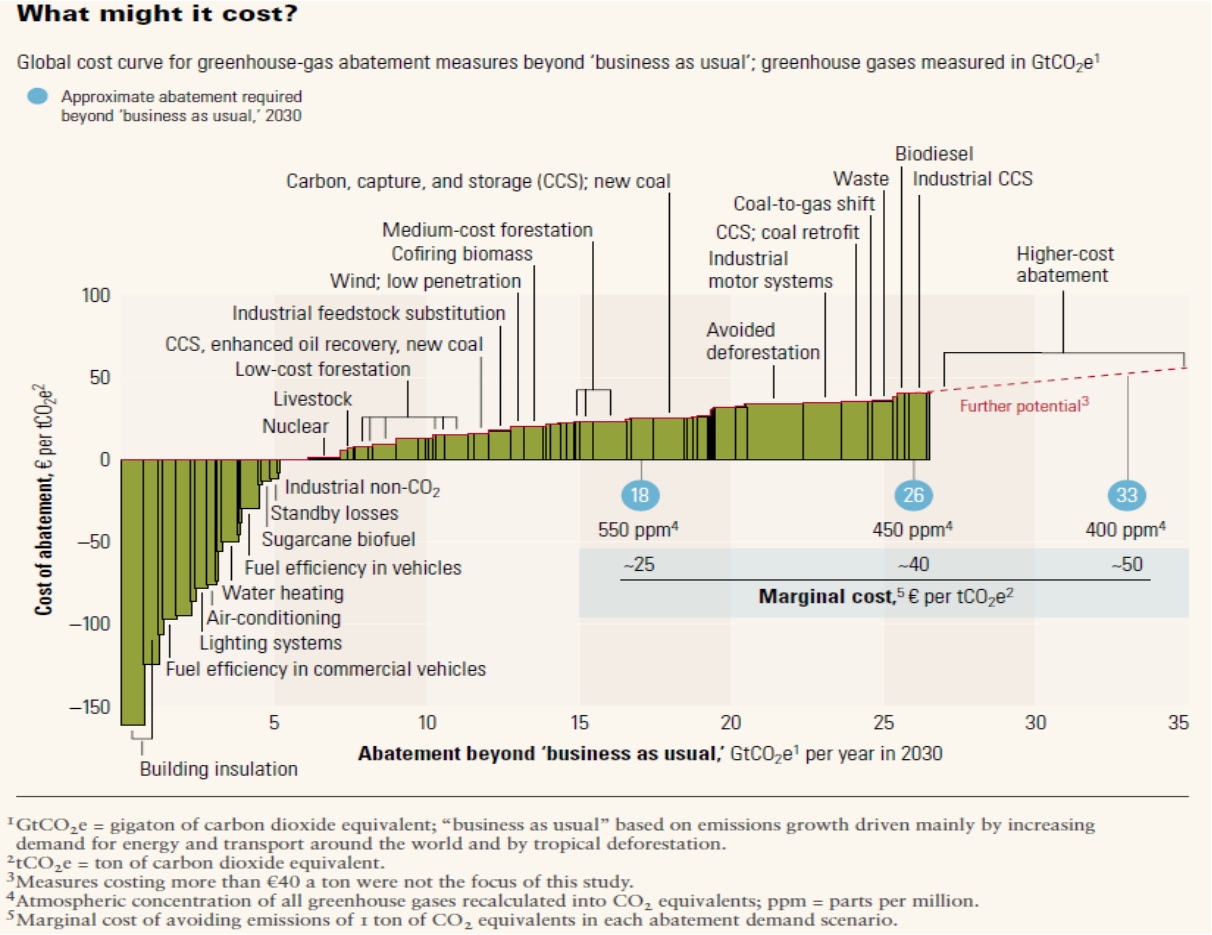
Source : commission sur les coûts d'abattement

À moyen terme, disposer d'un cadre méthodologique robuste pour évaluer de manière décentralisée les coûts d'abattement associés à différentes actions prépondérantes (à différents horizons de temps) pour la décarbonation de l'économie permettra de disposer de davantage d'éléments microfondés pour contribuer à d'éventuelles révisions de la SNBC et de la VAC.

La notion de coût d'abattement socioéconomique d'une action de décarbonation renvoie à un coût unitaire, du point de vue de la collectivité, de réduction des émissions de GES par l'action étudiée ; il s'agit de rapporter le coût de mise en œuvre de l'action (exprimé typiquement en euros) au volume d'émissions de GES qu'elle permet d'éviter (exprimé en tCO_2). Un coût d'abattement est donc exprimé en €/tCO_2. Nous verrons par la suite que la notion n'est pourtant pas univoque et que les valeurs obtenues, exprimées pourtant dans la même unité, peuvent masquer d'importantes différences en matière de choix méthodologiques. Elles doivent donc systématiquement être interprétées en tenant compte des modalités de calcul qui ont permis de les obtenir.

On rapproche fréquemment les données sur les coûts d'abattement et celles sur les potentiels d'émissions évitables, caractéristiques de différents gisements, dans des **courbes de coûts d'abattement marginaux croissants**. Ces outils ont été popularisés par des travaux de McKinsey au milieu des années 2000 et ont suscité un grand intérêt de la part des décideurs publics. Ils doivent néanmoins faire l'objet d'importantes précautions qui apparaîtront tout au long de ces pages.

Graphique 2 – Courbe de coûts marginaux d'abattement croissants, pour l'ensemble de l'économie mondiale à l'horizon 2030, dite courbe « à la McKinsey »



Note : les noms des gisements sont indiqués sur les étiquettes de données : « isolation des bâtiments », « efficacité énergétique des véhicules d'entreprises », etc. ; le coût d'abattement de chaque gisement se lit en ordonnée, en €/$tCO_{2,e}$; les gisements sont juxtaposés de manière discrète par ordre de coût croissant : on peut lire l'abattement (annuel) cumulé permis en 2030 par l'activation de tous les gisements situés à gauche du point d'abscisse.

Source : « A cost curve for greenhouse gas reduction » de P.-A. Enkvist, T. Nauclér et J. Rosander dans The McKinsey Quarterly (2007

CHAPITRE 1

UN INDICATEUR D'EFFICIENCE, COHÉRENT AVEC LA THÉORIE DE L'INVESTISSEMENT

1. Analyse préliminaire

En matière de politique de réduction des émissions, le coût d'abattement (CA) est un indicateur permettant de caractériser l'action que l'on cherche à évaluer en termes économiques (couramment désignée comme l'« option de projet » en théorie de l'investissement) par rapport à une situation dite de référence (« option de référence » en théorie de l'investissement). Cet indicateur est calculé en **rapportant le surcoût qu'induit l'option de projet au volume des émissions de GES qu'elle permet d'éviter**. À situation de référence donnée, il s'agit d'un indicateur d'efficience utile pour identifier les solutions permettant d'éviter au moindre coût une unité d'émission. En première approche, on a donc :

$$\mathrm{CA} = \frac{\text{Surcoût de l'option étudiée par rapport à la référence}}{\text{Volume d'émissions évitées par l'option étudiée par rapport à la référence}} \qquad (1)$$

Au numérateur, la nature du surcoût est intrinsèquement liée à la perspective retenue pour l'évaluation :

– s'il s'agit de documenter un arbitrage auquel est confronté un agent privé, qui veut notamment évaluer le surcoût associé à un projet de décarbonation en tenant compte de son anticipation du signal-prix carbone, on retiendra au numérateur le surcoût économique privé tenant compte notamment de la fiscalité en l'état et actualisé à un taux reflétant la « préférence pour le présent » et le coût du capital pour l'agent concerné ;

– s'il s'agit d'éclairer la décision d'un décideur public (un « planificateur bienveillant »), de manière à identifier les gestes de décarbonation efficients pour la collectivité dans son ensemble, on retiendra plutôt un surcoût socioéconomique, hors taxes (considérées comme des transferts entre agents, neutres du point de vue de la

collectivité au COFP[1] près) et tenant compte des externalités, en actualisant au taux public de 4,5 % actuellement en vigueur en France.

L'analyse d'un geste de décarbonation, d'un point de vue socioéconomique et d'un point de vue privé (c'est-à-dire microéconomique), apporte des informations différentes mais complémentaires, de même que l'évaluation socioéconomique et l'évaluation financière permettent de documenter de manière différente la sélection des projets d'investissement public.

En règle générale, on se placera ici dans une logique d'analyse socioéconomique, du point de vue de la collectivité, sauf lorsque l'on considèrera les éventuels écarts entre perspective publique et perspective des agents privés.

2. Un calcul cohérent avec la théorie économique de l'investissement, fondée sur le calcul de la valeur actualisée nette

Selon la théorie économique de l'investissement, le calcul de la valeur actualisée nette (VAN) d'un projet permet de déterminer si sa réalisation est créatrice nette de valeur, par rapport à la situation de référence, dans laquelle il ne serait pas mis en œuvre. **Il s'agit de comparer l'ensemble des bénéfices actualisés induits sur sa durée de vie avec les coûts actualisés de sa mise en œuvre.**

En pratique, la VAN se calcule en comparant les coûts généralisés actualisés (nets des avantages, donc potentiellement négatifs) de l'« option de projet » et de l'« option de référence ». Selon les composantes prises en compte dans le calcul des coûts et selon les options d'actualisation, on peut calculer une VAN privée aussi bien qu'une VAN socioéconomique. À nouveau, sauf mention contraire, on se référera ici à des VAN socioéconomiques, notées VAN_{SE}.

[1] Le coût d'opportunité des fonds publics (COFP) vise à rendre compte des effets distorsifs sur l'économie des prélèvements nouveaux qu'il sera nécessaire d'introduire pour compenser des pertes de recettes fiscales, induites ici par le projet étudié.

Encadré 1 – Les principes de théorie de l'investissement

Soient trois options à comparer pour rendre un même service économique (typiquement satisfaire une demande donnée de déplacement ou de chauffage), dont une situation de référence (indicée i = 0) et deux alternatives moins carbonées (indicées i = 1 et 2). On notera :

- $C_{i,t}$ la somme des coûts marchands (en particulier coûts d'investissement et de fonctionnement, dont le coût d'alimentation en combustible) et non marchands (en particulier coût des différentes externalités) hors externalités climatiques sous-jacents à l'option i à la date t ;
- $E_{i,t}$ la chronique d'émissions associée à chaque option i ;
- N la durée de vie (supposée identique) des équipements sous-jacents à chaque option i ;
- VSC_t la valeur sociale du carbone[1] utilisée pour valoriser monétairement les externalités climatiques du point de vue de la collectivité ;
- r le taux d'actualisation socioéconomique.

Le coût global actualisé socioéconomique (en t = 0 correspondant à la date de mise en œuvre de chaque option) de chacune des options i, noté CGA_i, s'écrit donc :

$$CGA_i = \sum_{t=0}^{N-1} \frac{C_{i,t} + VSC_t \times E_{i,t}}{(1+r)^t}$$

En notant $\Delta C_{i,t} = C_{i,t} - C_{0,t}$ et $\Delta E_{i,t} = E_{i,t} - E_{0,t}$, on a :

$$VAN_{SE,i} = -\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t} + VSC_t \times \Delta E_{i,t}}{(1+r)^t}$$

Ainsi, si la VAN_{SE} de l'option 1 est positive, elle permet de satisfaire le service rendu à un coût socioéconomique actualisé plus faible que l'option de référence notée 0 : elle a donc une valeur supérieure du point de vue de la collectivité. De même, si la VAN_{SE} de l'option 1 est supérieure à celle de l'option 2, la première sera préférable à la seconde pour la collectivité.

Par souci de cohérence avec la théorie de l'investissement, le coût d'abattement d'un projet (calculé à sa date de mise en œuvre, en t = 0) doit être défini de façon à ce que sa

[1] En toute généralité, on s'en tient à ce stade à la notion générique de valeur sociale du carbone (on aurait aussi pu parler, de manière équivalente, de « valeur tutélaire du carbone »). On précisera plus loin qu'en France, la valeur de l'action pour le climat (VAC) issue des travaux de la commission Quinet et présentée en 2019 est la trajectoire de référence utilisée comme valeur sociale (ou tutélaire) du carbone dans ce type d'évaluations.

comparaison à la VSC permette de déterminer le signe de la VAN socioéconomique. Or, comme la VSC est en toute généralité une trajectoire, **c'est la comparaison du coût d'abattement à sa valeur à la date de réalisation de l'investissement (notée VSC_0) qui doit permettre de déterminer le signe de la VAN_{SE}, ce qui implique que la croissance anticipée de la valeur sociale du carbone soit intégrée dans le calcul**[1]. Le coût d'abattement d'une option i, noté CA_i, doit donc respecter les conditions suivantes pour tout i :

$$\begin{cases} CA_i < VSC_0 \Leftrightarrow VAN_{SE,i} > 0 \\ CA_i = VSC_0 \Leftrightarrow VAN_{SE,i} = 0 \end{cases} \qquad (2)$$

2.1. Le coût d'abattement « en budget carbone » : un coût d'abattement « intrinsèque »

La formulation mathématique du coût d'abattement socioéconomique qui découle le plus immédiatement de la définition donnée en (1), notée CA^1, consiste à mettre au numérateur le surcoût socioéconomique actualisé associé au projet sur toute sa durée de vie et au dénominateur le volume total d'émissions qu'il permet d'éviter :

FORMULE 1

Coût d'abattement calculé « en budget carbone », ou niveau initial (VSC_0) de la VSC augmentant au taux d'actualisation public qui annulerait la VAN_{SE}

$$CA^1{}_i = -\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r\ \ )^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \Delta E_{i,t}} \qquad (3)$$

On a donc, en réécrivant (3) :

$$\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t} + (CA^1{}_i \,.\, (1+r\ \ )^t) \times \Delta E_{i,t}}{(1+r\ \ )^t} = 0$$

[1] Cette question ne se pose pas en ce qui concerne le taux de rentabilité interne : en effet, on le compare usuellement au taux d'actualisation public (ou au coût moyen pondéré du capital en analyse financière), qui est en général un paramètre constant (et non pas une trajectoire), pour déterminer le signe de la VAN.

Il apparaît donc que le coût d'abattement $CA^1{}_i$ ainsi défini mathématiquement correspond au niveau de la valeur sociale du carbone à la date de réalisation du projet (t = 0) qui annule la VAN **si et seulement si la valeur sociale du carbone (utilisée pour calculer la VAN) croît elle-même au taux d'actualisation public.**

En termes d'interprétation qualitative, lorsque l'on place au dénominateur – comme en (3) – la somme totale des émissions évitées de l'option i sans tenir compte de leur chronique temporelle, **on fait l'hypothèse implicite que la valeur actuelle d'une réduction d'émissions est indépendante du moment où elle est réalisée**. Autrement dit, on raisonne selon une logique dite « de budget carbone » (seul compte le volume total d'émissions évitées) qui se traduit théoriquement par une valeur sociale du carbone respectant la règle de Hotelling, c'est-à-dire croissant au taux d'actualisation public. On observe donc sur ce cas particulier que le coût d'abattement ne respecte les conditions (2) de cohérence avec la théorie de l'investissement que si la manière dont il est calculé, et en particulier dont les émissions évitées sont agrégées au dénominateur, suit une logique compatible avec la manière dont celles-ci sont valorisées monétairement dans la VAN.

Dans la suite, on parlera de coûts d'abattement « en logique budget carbone » pour désigner les coûts d'abattement calculés selon la formule mathématique (3).

Encadré 2 – Cas général selon la forme de la trajectoire de la valeur sociale du carbone

Soit la forme mathématique la plus générale de la valeur sociale du carbone (VSC), avec un taux de croissance α_t variable dans le temps :

$$VSC_t = VSC_0 \times \prod_{j=0}^{t-1}(1 + \alpha_j)$$

On peut montrer que :

$$(2) \quad \Leftrightarrow \quad CA_i = -\frac{\sum_{t=0}^{N-1}\frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r\ \ )^t}}{\sum_{t=0}^{N-1}\frac{\Delta E_{i,t} \times \prod_{j=0}^{t-1}(1+\alpha_j)}{(1+r\ \ )^t}} \qquad (4)$$

La formule de calcul du coût d'abattement respectant les conditions de cohérence avec (2) pour toute option i corrige donc la somme des émissions évitées au dénominateur du différentiel entre le taux de croissance de la VSC et le taux d'actualisation socioéconomique. En pratique, le dénominateur n'est plus un volume physique d'émissions évitées sur la durée de vie du projet ; il s'agit de la somme actualisée des « bénéfices climatiques » évalués à l'aune de la VSC, convertie en un équivalent volume en divisant le résultat par VSC_0.

Dans le cas où le taux de croissance de la VSC est constant dans le temps (noté α) et en faisant la double hypothèse que α et r_{SE} << 1, on a :

$$(2) \quad \Leftrightarrow \quad CA_i = -\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r\ \ )^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta E_{i,t}}{(1+r\ \ -\alpha)^t}}$$

Au dénominateur de la formule de calcul du coût d'abattement directement compatible avec la théorie de l'investissement, on trouve donc les émissions évitées « actualisées » au taux défini comme l'écart entre le taux d'actualisation socioéconomique et le taux de croissance de la VSC de référence. Dans le cas où la VSC croît au taux d'actualisation socioéconomique (autrement dit respecte la règle de Hotelling), on retrouve bien la formule $CA^1{}_i$ définie en (3). On remarquera par ailleurs que dans le cas où la VSC croît à un taux supérieur au taux d'actualisation socioéconomique, les émissions évitées au dénominateur sont « sur-actualisées » : la somme obtenue est supérieure à la somme simple calculée au dénominateur de la formule (3).

En France, les travaux de la commission Quinet (2019) ont conduit à définir une trajectoire de référence pour la valeur sociale du carbone, dite « valeur de l'action pour le climat » (VAC_t), qui ne respecte pas strictement la règle de Hotelling. En effet, son taux de croissance α_t est variable et supérieur à 4,5 % jusqu'en 2040. Ce taux ne suit donc pas une logique « budget carbone » mais prend en compte, sur la base de travaux de modélisation essentiellement, le point de départ que constitue la composante carbone actuelle de la fiscalité énergétique, puis l'augmentation du niveau d'effort pour la collectivité qui est impliqué par la trajectoire de baisse des émissions prévue par la SNBC.

Si les émissions évitées sont valorisées à la valeur de l'action pour le climat, alors les coûts d'abattement « en logique budget carbone » (formule (3)) ne sont pas cohérents (autrement dit ne respectent pas les conditions (2)) avec la théorie de l'investissement socioéconomique. On a dans ce cas l'équivalence suivante :

$$\begin{cases} VAN_{SE,i} > 0 \Leftrightarrow CA^1{}_i < \dfrac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta E_{i,t} \times VAC_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \Delta E_{i,t}} \\ \\ VAN_{SE,i} = 0 \Leftrightarrow CA^1{}_i = \dfrac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta E_{i,t} \times VAC_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \Delta E_{i,t}} \end{cases}$$

Pour déterminer le signe de la VAN, il est donc nécessaire, dans le cas général, de comparer le coût d'abattement « en logique budget carbone » à la moyenne, pondérée par la chronique des émissions évitées, de la trajectoire de VAC actualisée sur la durée de vie de l'équipement. Autrement dit, le seuil pour $CA^1{}_i$ qui détermine si la VAN est positive est propre à chaque option i étudiée. Les coûts d'abattement $CA^1{}_i$ ne sont alors pas directement comparables entre eux du point de vue de la théorie de l'investissement.

2.2. Le coût d'abattement « ajusté à la VAC » : un coût d'abattement se référant à la SNBC

Pour que l'indicateur de coût d'abattement soit cohérent (au sens de (2)) avec la théorie de l'investissement socioéconomique dans laquelle la VSC utilisée est la VAC, la formule de calcul (que l'on notera $CA^2{}_i$) doit être ajustée sur la base de la relation (4) de l'encadré 2 :

FORMULE 2

Coût d'abattement « ajusté à la VAC » à comparer avec la VAC_0

$$CA^2{}_i = -\frac{\sum_{t=0}^{N-1}\frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r\ \ )^t}}{\frac{\sum_{t=0}^{N-1}\frac{\Delta E_{i,t}\times VAC_t}{(1+r\ \ )^t}}{VAC_0}} \qquad (5)$$

Le résultat obtenu correspond à la valeur sociale du carbone à la date de réalisation de l'investissement qui, croissante au même taux variable que la VAC, annulerait la VAN. On désignera par la suite comme $CA^2{}_i$ les coûts d'abattement « ajustés à la VAC ».

On remarquera notamment que :

– les $CA^2{}_i$ sont à comparer à une référence unique (VAC_0) indépendante de l'option i pour déterminer le signe de la VAN : leur comparaison directe les uns par rapport aux autres reste donc cohérente avec la théorie de l'investissement socioéconomique :

$$\begin{cases} \mathrm{VAN}_1 > \mathrm{VAN}_2 \Leftrightarrow \sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{1,t} + \mathrm{VAC}_t \times \Delta E_{1,t}}{(1+r)^t} < \sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{2,t} + \mathrm{VAC}_t \times \Delta E_{2,t}}{(1+r)^t} \\ \Leftrightarrow 1 - \frac{1}{\mathrm{CA}^2{}_1} < \frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{2,t}}{(1+r_{SE})^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{1,t}}{(1+r)^t}} - \frac{1}{\mathrm{CA}^2{}_2} \frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{2,t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{1,t}}{(1+r)^t}} \\ \Leftrightarrow \mathrm{CA}^2{}_1 < \mathrm{CA}^2{}_1 \; ssi \; \Delta C_{2,t} = \Delta C_{1,t} \end{cases}$$

– comme évoqué dans l'encadré précédent, les coûts d'abattement « ajustées à la VAC » sont inférieurs aux coûts d'abattement « en logique budget carbone » ;

– à partir de 2040, dès lors que la VAC suit la règle de Hotelling et croît au taux d'actualisation socioéconomique de 4,5 %, les deux méthodes de calcul $\mathrm{CA}^1{}_i$ et $\mathrm{CA}^2{}_i$ convergent et conduisent aux mêmes résultats.

2.3. Le coût d'abattement « à valeur sociale du carbone constante », un calcul sans anticipation

Dans certaines évaluations économiques, on trouve aussi des coûts d'abattement socioéconomiques calculés avec une VSC constante dans le temps. On notera $\mathrm{CA}^3{}_i$ les coûts d'abattement issus de cette formule :

FORMULE 3

Coût d'abattement à comparer avec une VSC constante

$$\mathrm{CA}^3{}_i = -\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta E_{i,t}}{(1+r)^t}}$$

On a donc en particulier :

$$\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t} + \mathrm{CA}^3{}_i \times \Delta E_{i,t}}{(1+r)^t} = 0$$

Il apparaît donc que **le coût d'abattement CA^3_i correspond à la valeur sociale du carbone constante (égale à sa valeur à la date de réalisation du projet, à savoir t = 0) annulant la VAN**, c'est-à-dire que cette définition du coût d'abattement vérifie les conditions de cohérence (2) dans le cas général si et seulement si la valeur sociale du carbone (utilisée pour calculer la VAN) est constante dans le temps. Ceci n'étant pas le cas en règle générale, **on recommandera de ne pas utiliser cette formule pour mener des calculs socioéconomiques**.

Cependant, on peut considérer que cette formule est issue d'une analogie avec les méthodes traditionnelles de calcul de LCOE[1]. Or, le LCOE est un coût de production unitaire et actualisé que l'on compare, pour évaluer la rentabilité d'un investissement, à un niveau de prix de marché observé. En général, il n'est pas fait d'hypothèse explicite sur l'évolution de ce prix de marché sur la durée de vie de l'investissement étudié : il est donc pertinent de calculer ainsi un LCOE pour que le résultat soit directement comparable à cette référence supposée constante dans le temps.

Dans certains cas, il est possible de comparer différents états du système projetés à long terme, par exemple pour le calcul des coûts d'abattement dans le système électrique. Ces projections se distinguent des scénarios classiques par le fait qu'ils ne représentent pas les effets de transition du système mais comparent deux états stables à 2050, comme si le système électrique avait été créé de toutes pièces. Sous ces hypothèses simplificatrices, on évalue alors les coûts et réductions d'émissions pour 2050 uniquement, l'actualisation n'ayant notamment pas à être prise en compte. Le coût d'abattement est alors simplement le ratio du surcoût socioéconomique en 2050 sur les réductions d'émissions en 2050 et peut être directement comparé à la VAC en 2050.

3. D'une méthode à l'autre

Dans le cas général, le classement des projets selon les coûts d'abattement calculés par les méthodes « en budget carbone » et « ajustée à la VAC » ne donne pas des résultats identiques. Dans les deux cas, plus le coût d'abattement est faible, plus le projet permet de dégager de « bénéfices climatiques » à coût donné pour la collectivité. En revanche, la manière dont sont évalués en équivalent monétaire ces bénéfices climatiques diffère, en particulier selon leur répartition dans le temps. Dans le premier cas, les bénéfices climatiques sont estimés sur la base d'une VSC croissante au taux d'actualisation socioéconomique ; dans le deuxième, ils le sont sur la base de la VAC.

[1] LCOE : *levelized cost of electricity*.

Encadré 3 – Le passage d'une méthode à l'autre en pratique

En pratique, à coût donné pour la collectivité, les différences de classement entre projets seront limitées à des cas où les chroniques de réduction des émissions dans le temps sont très différentes.

En particulier, pour un projet permettant des baisses d'émissions réparties de manière homogène dans le temps ($\Delta E_{i,t} = \Delta E_i$ pour tout t), on a :

$$CA^2{}_i = \frac{N \times VAC_0}{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{VAC_t}{(1+r\ \ )^t}} \times CA^1{}_i$$

Dans ce cas, les deux méthodes de calcul sont équivalentes **– à un coefficient multiplicatif près** qui ne dépend que de la durée de vie du projet (la trajectoire de valeur de l'action pour le climat et la date à laquelle est étudiée l'investissement étant fixées).

Autrement dit, lorsqu'on étudie des projets de décarbonation permettant des baisses d'émissions réparties de manière homogène dans le temps et ayant une **même durée de vie**, on pourra les classer selon leur efficience en se référant indifféremment aux coûts d'abattement calculés selon les méthodes « en budget carbone » et « ajustée à la VAC ».

Pour les projets ou gestes de décarbonation permettant des réductions d'émissions réparties de manière homogène dans le temps (ou pour lesquels on peut faire l'approximation que c'est le cas), on pourra donc passer des résultats d'une méthode à l'autre grâce à la table de passage suivante :

Coefficient à appliquer au coût d'abattement obtenu par la méthode de calcul « en budget carbone » ($CA^1{}_i$) pour obtenir le résultat de la méthode « ajustée à la VAC » ($CA^2{}_i$) :

Durée de vie du projet (ans)

Mise en service	5	10	15	20	25	30
2020	0,80	0,68	0,61	0,55	0,52	0,50
2025	0,92	0,84	0,77	0,74	0,72	0,71
2030	0,91	0,86	0,83	0,81	0,81	0,80
2035	0,97	0,95	0,95	0,94	0,94	0,95
2040	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02	1,06

De manière analogue, dans les mêmes conditions (projets ou gestes de décarbonation de même durée de vie et permettant des réductions d'émissions réparties de manière homogène dans le temps), la relation suivante est aussi vérifiée :

$$CA^2{}_i = \frac{VAC_0 \times \sum_{t=0}^{N-1} \frac{1}{(1+r\ \ )^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{VAC_t}{(1+r\ \ )^t}} \times CA^3{}_i$$

Donc l'ordre de classement des projets est invariant selon la méthode de calcul des coûts d'abattement retenue et on peut définir la table de passage suivante :

Coefficient à appliquer au coût d'abattement obtenu par la méthode de calcul « analogue au LCOE » ($CA^3{}_i$) pour obtenir le résultat de la méthode « ajustée à la VAC » ($CA^2{}_i$) :

Durée de vie (ans)

Mise en service	5	10	15	20	25	30
2020	0,74	0,56	0,45	0,37	0,32	0,28
2025	0,84	0,69	0,58	0,50	0,45	0,40
2030	0,84	0,71	0,62	0,55	0,50	0,45
2035	0,89	0,79	0,71	0,64	0,58	0,54
2040	0,92	0,83	0,75	0,68	0,63	0,60

À caractéristiques (et en particulier composantes de coûts) d'un projet constantes, son coût d'abattement « en logique budget carbone » est indépendant de la date à laquelle il est mis en œuvre ; à l'inverse, son coût d'abattement « ajusté à la VAC » dépend de cette date puisque la formule de calcul dépend de la trajectoire de la VAC sur la durée de vie du projet.

Ce n'est pas parce que la méthode de calcul du coût d'abattement est cohérente avec la théorie de l'investissement du point de vue socioéconomique (au sens des conditions (2)) que les classements des projets selon les indicateurs $CA^2{}_i$ et $VAN_{SE,i}$ sont équivalents. En effet :

– le coût d'abattement est un indicateur « intensif » qui détermine le surcoût collectif à consentir pour obtenir un bénéfice climatique unitaire à travers un projet donné. Il mesure donc un effet levier et permet d'identifier les gestes les plus créateurs de valeur pour la collectivité **à niveau d'effort donné** ;

– à l'inverse, la VAN est un indicateur « extensif » qui identifie la valeur supplémentaire totale créée pour la collectivité, indépendamment du niveau d'effort nécessaire pour mettre en œuvre le geste.

On peut faire ici l'analogie avec les indicateurs permettant d'évaluer la pertinence socioéconomique des grands projets d'investissement public de l'État. On documente généralement ces choix à l'aide notamment d'**indicateurs tels que la « VAN**

socioéconomique » et la « VAN socioéconomique par euro public dépensé ». Ces indicateurs sont cohérents entre eux (en l'occurrence, la seconde VAN est nécessairement du même signe que la première, positive ou négative), mais pourtant ne classent pas nécessairement différents projets de manière identique car ils relèvent de points de vue différents. Le premier est un indicateur « extensif » qui rend compte de la création totale de valeur nette pour la collectivité, alors que le second est « intensif » et rend compte de l'effet de levier du projet dans cette création de valeur nette pour la collectivité.

4. Un exemple : véhicule hybride, véhicule électrique et véhicule thermique

Considérons de manière simplifiée deux technologies de véhicules (hybrides non rechargeables et électriques) par rapport à un véhicule thermique de référence :

– le véhicule hybride non rechargeable, qui représente un surcoût à l'achat de 1 700 euros par rapport au modèle thermique, permet des économies de carburant de 50 euros par an sur la durée de vie du véhicule (16 ans) ainsi qu'une réduction des émissions de 0,5 tCO_2/an ;

– le véhicule électrique, qui représente un surcoût à l'achat de 5 000 euros par rapport au modèle thermique, permet des économies de carburant de 150 euros par an sur la durée de vie du véhicule (16 ans) ainsi qu'une réduction des émissions de 1,8 tCO_2/an. En revanche, la production de la batterie représente 10 tCO_2 supplémentaires en phase de production ;

– en 2020, la VAC est d'environ 90 €/tCO_2.

La résolution numérique est consultable dans l'annexe 2 en fin de volume (tableau A). On obtient pour le véhicule hybride : CA^1_H = 139 €, CA^2_H = 85 € et VAN_H = 69,5 €. De même, pour le véhicule électrique : CA^1_E = 172 €, CA^2_E = 87 € et VAN_E = 118 €. On observe que le coût d'abattement du véhicule électrique est supérieur à celui du véhicule hybride, alors même que la VAN associée au véhicule électrique est supérieure à celle du véhicule hybride. Cela s'explique par le fait que le véhicule électrique est plus cher, mais permet de réduire davantage les émissions et donc de créer davantage de valeur.

Comme CA^2_H < VAC ou VAN_H > 0, le choix du véhicule hybride est efficient du point de vue socioéconomique, alors que CA^1_H > VAC. De la même façon, comme CA^2_E < VAC ou VAN_E > 0, le véhicule électrique est efficient du point de vue socioéconomique, alors même que CA^1_E > VAC. Le choix entre les deux options dépend alors de l'objectif : cherche-t-on à maximiser la création de valeur par euro dépensé ou la valeur totale créée ?

Pour maximiser la création de valeur par euro dépensé, ou « à effort donné », on peut raisonner à partir de CA^2, ou de la $VAN_{E,C}$ qui est la VAN d'une dépense de 1 113 euros (correspondant au coût du véhicule hybride) consacrée au véhicule électrique[1]. Comme on a $CA^2_H < CA^2_E$, ce qui revient au même $VAN_H > VAN_{E,C}$, l'hybride est préférable à l'électrique.

Pour maximiser la création de valeur totale (c'est-à-dire sans contrainte de ressources), on doit raisonner à partir des VAN[2]. L'électrique est alors préférable à l'hybride car $VAN_H < VAN_E$.

On peut modifier à la marge l'exemple précédent :

– le véhicule électrique ne permet plus qu'une réduction des émissions de 1,4 tCO_2/an,

– et on ignore maintenant les émissions engendrées en phase de production de la batterie du véhicule électrique.

Dans cet exemple, on suppose que les émissions évitées sont réparties de manière homogène dans le temps pour tous les projets. La résolution numérique est consultable en annexe 2 (tableau B).

Les résultats sont inchangés pour le véhicule hybride (CA^1_H = 139 €, CA^2_H = 85 € et VAN_H = 69,5 €). Ceux relatifs au véhicule électrique deviennent : CA^1_E = 144,5 € : CA^2_E = 88 €, VAN_E = 72 € et $VAN_{E,C}$ = 25 €.

Véhicule hybride et véhicule électrique sont toujours efficients du point de vue socioéconomique (CA^2_H < VAC ou VAN_H > 0 alors que CA^1_H > VAC, et CA^2_E < VAC ou VAN_E > 0 alors que CA^1_E > VAC).

Le choix entre les deux technologies **pour maximiser la création de valeur par euro dépensé** peut maintenant être opéré en considérant indifféremment CA^1 ou CA^2. On vérifie bien que $CA^2_H < CA^2_E$, tout comme $CA^2_H < CA^2_E$ (et $VAN_H > VAN_{E,C}$). Par ailleurs, en utilisant la table ci-dessous pour une mise en service en 2020 et une durée de vie de 15 ans (proche des 16 ans considérés dans cet exemple) on observe que le coefficient de passage entre CA^1 et CA^2 est 0,61. On retrouve en effet bien que $CA^1_H \cong 0{,}61\ CA^2_H$ et $CA^1_H \cong 0{,}61\ CA^2_H$. On retrouve cependant que **pour maximiser la création de valeur totale** (c'est-à-dire sans contrainte de ressources), l'électrique est alors préférable à l'hybride car $VAN_H < VAN_E$.

---

[1] $\mathrm{VAN}_{E,C} = \mathrm{VAN}_E \frac{surcoût\ financier\ actualisé\ de\ l'hybride}{surcoût\ financier\ actualisé\ de\ l'électrique}$

[2] On peut remarquer que VAN_H,< $VAN_E \Leftrightarrow (VAC - CA1_H) < (VAC - CA1_E) \frac{\sum VAC.\Delta CO_{2E}/(r\ \ +1)^t}{\sum VAC.\Delta CO_{2H}/(r\ \ +1)^t}$

5. Conclusions préliminaires

Le coût d'abattement socioéconomique d'un projet i, mis en œuvre à l'instant t ne peut s'interpréter au regard de la valeur sociale du carbone à cet instant-là sans tenir compte de la forme de la trajectoire de la VSC sur l'ensemble de la durée de vie du projet. Cette trajectoire rend elle-même compte de l'anticipation de l'évolution de la valeur des émissions évitées, qui dépend de la trajectoire et du budget d'émissions visés.

La formule de calcul d'un coût d'abattement socioéconomique la plus immédiate, dite « en budget carbone » (selon l'équation (3)) sera cohérente avec la théorie de l'investissement du point de vue socioéconomique si les émissions évitées sont valorisées par une VSC dont la dynamique respecte la règle de Hotelling (croissante au taux d'actualisation socioéconomique).

Les principes de l'analyse socioéconomique en France et en particulier la VAC définie dans le rapport Quinet (2019) s'écartent de ce cadre théorique strict pour tenir compte des contraintes sur le niveau de départ du prix du carbone dans la fiscalité et sur la trajectoire nationale de baisse des émissions de la SNBC. La comparaison directe des coûts d'abattement « en budget carbone » à la VAC à la date de réalisation des projets ne permet pas alors de déterminer s'ils sont créateurs de valeur pour la collectivité ou non (autrement dit, de déterminer immédiatement le signe de leur VAN).

Pour que les coûts d'abattement soient directement comparables entre eux et à la VAC à la date de réalisation des projets, il est nécessaire d'ajuster le volume d'émissions inscrit au dénominateur de l'indicateur en tenant compte de la chronique des émissions évitées et de la valeur qui leur est accordée dans le temps, comme dans la formule (5).

En pratique :

- Considérant que les VSC suivent le plus généralement la règle de Hotelling, **la formule dite « en budget carbone » (équation (3)) semble la plus claire pour calculer un coût d'abattement socioéconomique**. En particulier, elle donne des résultats indépendants de la date de mise en œuvre des options. Elle sera certainement utile pour la comparaison avec des *benchmarks* internationaux.

- Néanmoins, la VAC considérée en France ne suivant pas strictement la règle de Hotelling, de manière à suivre la contrainte spécifique à la trajectoire de baisse des émissions de la SNBC, **la formule « en budget carbone » n'est pas immédiatement cohérente avec les principes de l'évaluation socioéconomique pour la France**.

- Dès lors qu'il s'agira de comparer des gestes de décarbonation entre eux **à niveau d'effort donné** sur la base de leur coût d'abattement et surtout par rapport au niveau

de la VAC à la date de mise en œuvre du geste – soit **dans la quasi-totalité des cas – , la formule « ajustée à la VAC » (équation (5)) sera à privilégier.**

- Sous certaines conditions, en général acceptables en première approximation, les gestes de décarbonation seront classés de la même manière selon que l'on considère le coût d'abattement « en budget carbone » ou « ajusté à la VAC ». En revanche, c'est le « niveau » des résultats et donc leur comparaison à la référence fixe que constitue la VAC qui devra être examiné attentivement ; **ce qui justifie la préférence accordée à la méthode « ajustée à la VAC ».**

- Il faut garder en tête que le coût d'abattement « ajusté à la VAC » est cohérent avec la « VAN socioéconomique par euro public dépensé » mais pas la « VAN socioéconomique » : **si l'on souhaite classer les projets du point de vue de la création totale de valeur nette pour la collectivité, il faut comparer leur VAN**, ou comparer l'écart entre leur coût d'abattement et la VAC pondéré par la somme actualisée de la valeur des émissions.

Encadré 4 – Le cas des coûts d'abattement privés

On a vu que les coûts d'abattement socioéconomiques se comparent systématiquement à une valeur sociale du carbone, et plus exactement à une trajectoire de VSC, éventuellement rapportée à un point unique s'il est fait une hypothèse claire sur son taux de croissance. **Bien qu'ils partagent en général une même unité, il n'y a donc pas de sens à comparer un coût d'abattement socioéconomique à un signal-prix carbone.**

Cependant, tout le raisonnement présenté plus haut peut être transposé de l'approche socioéconomique à un point de vue de décideur privé :

– du point de vue d'un agent privé, le choix entre une option de projet (indicée i = 0) et des alternatives moins carbonées (indicées i = 1 et 2) peut se traduire par une comparaison des coûts généralisés actualisés économiques privés CGA_p_i qui s'écrivent :

$$\mathrm{CGA}_{p_i} = \sum_{t=0}^{N-1} \frac{C_{i,t} + P_t \times E_{i,t}}{(1 + r_p)^t}$$

où $C_{i,t}$ est désormais la somme des seuls coûts marchands (coûts d'investissement, de fonctionnement – dont le coût d'alimentation en combustible – et des externalités hors climat explicitement tarifées), P_t le prix donné au carbone et r_p le taux d'actualisation privé (qui peut varier d'un agent à l'autre en fonction de ses préférences) ;

– de la même manière, on peut donc définir aussi la valeur actualisée nette privée :

$$\mathrm{VAN_p_i} = -\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t} + P_t \times \Delta E_{i,t}}{(1+r_p)^t}$$

– le coût d'abattement privé $\mathrm{CA_p^1}_i$ défini ci-dessous correspond donc au signal-prix carbone initial qui, croissant au taux d'actualisation privé r_p sur la durée de vie de l'équipement, annulerait la VAN_p_i, c'est-à-dire rentabiliserait l'option de projet i :

$$\mathrm{CA_p^1}_i = -\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r_p)^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \Delta E_{i,t}}$$

– le coût d'abattement privé $\mathrm{CA_p^2}_i$ défini ci-dessous correspond donc au signal-prix carbone initial qui, croissant au même taux que la trajectoire de VAC sur la durée de vie de l'équipement, annulerait la VAN_p_i, c'est-à-dire rentabiliserait l'option de projet i :

$$\mathrm{CA_p^2}_i = -\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r_p)^t}}{\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta E_{i,t} \times VAC_t}{(1+r_p)^t}}{VAC_0}}$$

– le coût d'abattement privé $\mathrm{CA_p^3}_i$ défini ci-dessous correspond donc au signal-prix carbone constant sur la durée de vie de l'équipement qui annulerait la VAN_p_i, c'est-à-dire rentabiliserait l'option de projet i :

$$\mathrm{CA_p^3}_i = -\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta C_{i,t}}{(1+r_p)^t}}{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta E_{i,t}}{(1+r_p)^t}}$$

Or, contrairement à la VSC (qui dans le rapport Quinet renvoie directement à la VAC), il n'y a *a priori* pas de raison de supposer que la trajectoire du signal-prix carbone anticipée sur la durée de vie de l'investissement étudié suive une augmentation au taux d'actualisation propre à une catégorie d'agents économiques donnée (ici r_p) ou au taux de croissance de la VAC (dont la vocation est de rendre compte d'un niveau d'effort global nécessaire, et non pas spécifiquement d'une trajectoire cible des instruments fiscaux). Dans ce contexte, il peut s'avérer plus pertinent d'utiliser la 3e méthode (notée ici $\mathrm{CA_p^3}_i$) pour déterminer des coûts d'abattement privés. Ceux-ci pourront être dans ce cas interprétés comme les signaux-prix carbone constants (ou anticipés comme tels) permettant de déclencher les gestes considérés pour les agents économiques dont le taux d'actualisation est utilisé au numérateur.

CHAPITRE 2

MISE EN ŒUVRE PRATIQUE

1. Le choix de la situation de référence

Une première recommandation forte pour le calcul des coûts d'abattement doit porter sur la définition cohérente de la situation et/ou des options de référence (ou du cadre « contrefactuel » dans la littérature anglo-saxonne). En réalité, cette recommandation est difficile à mettre en pratique, compte tenu notamment de l'**hétérogénéité des scénarios décrits en référence**, ainsi que de la manière dont ils le sont dans les différents exercices. On pourrait par exemple préférer considérer que la situation de référence soit celle prévalant actuellement, projetée dans le futur à caractéristiques inchangées hormis une baisse annuelle des coûts à un taux défini pour chaque secteur (ou sous-secteur, qui rendrait compte des hausses de productivité dans le secteur dans un scénario tendanciel). Dans le secteur électrique, et compte tenu de l'anticipation de réduction des coûts des renouvelables, cette démarche pourrait conduire à des coûts d'abattement négatifs.

Du point de vue de la cohérence théorique stricte des travaux, les situations de référence devraient être définies sur la base des scénarios de référence des modèles utilisés pour calculer la VAC : par construction, **la VAC rend compte du niveau maximal d'effort qui sépare les scénario AME (avec mesures existantes) des scénarios AMS (avec mesures supplémentaires)**. Il serait naturel de prendre en référence les technologies du scénario AME.

Le choix de la situation de référence a une incidence très significative sur les résultats obtenus. En toute rigueur, il convient de considérer en référence un service équivalent caractérisé en général par l'association d'un équipement et d'un usage ; cependant dans certaines actions l'usage peut se trouver modifié, par exemple en présence d'un effet rebond. Les différentes situations devront être bien caractérisées. Par exemple :

– pour calculer le coût d'abattement associé au passage d'un véhicule thermique à un véhicule électrique, on considérera généralement une utilisation semblable, que l'on raisonne sur un usage moyen ou que l'on cherche à mettre en évidence les différences de rentabilité des motorisations électriques selon les usages, mais il est aussi possible

par exemple que le passage au véhicule électrique s'accompagne d'un raccourcissement des voyages effectués du fait du manque d'autonomie des batteries ;

– de la même manière, pour déterminer le coût d'abattement associé au passage d'une technologie fossile à une technologie renouvelable de production d'électricité, plus les besoins de l'analyse seront précis et plus il conviendra de mettre en regard les technologies pour des usages spécifiques semblables (production de pointe ou de base, possibilité de composer avec l'intermittence ou non, etc.).

On pourra considérer que **pour le court terme la situation de référence est celle qui prévaut actuellement**. Pour le moyen et long terme, la question de la définition de la situation de référence (soit celle qui prévaudrait en l'absence de politiques climatiques) est plus difficile à résoudre. Il convient de définir des règles précises pour pouvoir comparer les coûts de différents gisements au sein d'un secteur, entre les secteurs et vis-à-vis de la VAC (voir Chapitre 3) :

– le choix de la référence affecte le niveau du coût d'ajustement et donc la désirabilité de la mise en œuvre d'une option donnée ; en ce qui concerne le classement des options en revanche, comme on raisonne en différentiel, la référence que l'on utilise est sans conséquence ;

– il serait même possible de prendre en référence une situation déjà largement décarbonée et de calculer des coûts d'abattement pour des réductions d'émissions à la marge autour de cette solution centrale (voir l'encadré « Coûts marginaux vs. coûts moyens ») ;

– en revanche, pour pouvoir comparer les coûts d'abattement calculés dans différents secteurs, il sera nécessaire que les références utilisées dans chaque cas soient cohérentes entre elles.

Encadré 5 − Coûts marginaux vs. coûts moyens

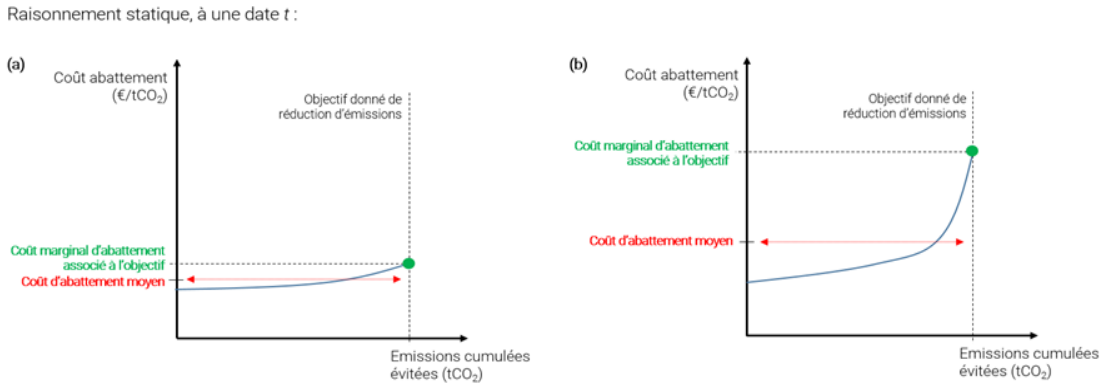
Les courbes « à la McKinsey » sont en fait des « courbes de coûts marginaux d'abattement » (CMA), construites pour un état du monde à un instant donné (en 2030 pour le graphique 2). Le caractère marginal s'interprète au regard de l'abattement cumulé global permis par les différents gisements étudiés : on dit que les coûts présentés sont marginaux au sens où, en se plaçant en abscisse à un volume cible de réduction d'émissions, on peut lire le coût d'abattement associé au dernier gisement à mobiliser pour atteindre l'objectif à la période étudiée. Autrement dit, un coût d'abattement marginal ne peut être interprété qu'au regard d'un objectif de réduction d'émissions à un horizon donné.

Selon la manière dont les courbes de CMA sont construites (notamment si elles le sont en agrégeant une série de gisements étudiés séparément), il est possible qu'elles rassemblent des gisements concurrents ou exclusifs les uns des autres. On représente alors graphiquement plusieurs options de décarbonation entre lesquelles il est nécessaire de choisir : la lecture de l'abattement cumulé devient alors problématique puisqu'il juxtapose les émissions potentiellement évitées par la mise en œuvre de gisements interdépendants.

La notion de « coût moyen » doit être définie avec précaution : elle peut renvoyer au périmètre d'un ensemble de gisements considérés. Par opposition au coût marginal, on ne considère plus le coût du dernier gisement d'un périmètre donné mais la moyenne des coûts au sein du périmètre ; elle peut aussi renvoyer à l'évolution dans le temps du coût d'un gisement donné (voir Chapitre 3, section 3).

En ce qui concerne le périmètre, par exemple à l'échelle d'un secteur, on peut s'intéresser au coût moyen de l'ensemble des gisements à mobiliser (pondéré par les réductions d'émissions de chaque gisement) pour atteindre un objectif de réduction donné. Au contraire, le coût marginal est le coût associé au gisement le plus cher à mobiliser. La comparaison du coût marginal au coût moyen peut donner une idée de la plus ou moins grande hétérogénéité des gisements qui sera reflétée par la plus ou moins forte convexité des courbes de CMA.

Graphique 3 – Distribution des coûts d'abattement associés à l'atteinte d'un objectif de réduction d'émissions, coût marginal et coût moyen



Source : commission sur les coûts d'abattement

2. L'évaluation en pratique du surcoût socioéconomique

Dans l'approche microfondée, le principe de calcul du coût d'abattement socioéconomique associé à un gisement de réduction d'émissions, en €/tCO_2, s'appuie sur le même arsenal méthodologique que l'évaluation socioéconomique des grands projets d'investissement public. **Il consiste à sommer l'ensemble des composantes de coûts** (ou plutôt de surcoûts par rapport à la situation de référence, sans présumer de leurs signes, positifs ou négatifs) pour tous les « acteurs » affectés par la mise en œuvre de l'action de décarbonation, et de **rapporter ce surcoût agrégé à un volume d'émissions évitées**, **le tout sur une période de temps définie au préalable.**

On distinguera typiquement trois grandes composantes de surcoût socioéconomique associé à la mobilisation d'un gisement de réduction d'émissions :

- **Un surcoût privé pour le porteur de l'action de décarbonation** : par exemple le particulier qui achète un véhicule électrique plutôt que thermique, l'entreprise tertiaire qui isole thermiquement son parc de bureaux, ou l'énergéticien qui étend ses moyens de production d'électricité en investissant dans un champ éolien plutôt qu'une nouvelle centrale thermique à gaz ;
- Un terme d'impact sur les finances publiques, qui consiste en réalité à corriger le surcoût privé de l'effet des subventions et dépenses/avantages fiscaux, qui sont des transferts neutres du point de vue global de la collectivité ;
- **Un surcoût ou inversement un bénéfice externe pour la collectivité, qui consiste principalement en la somme des externalités** générées par la mise en œuvre de l'action : par exemple la diminution de la congestion routière associée au report modal de la voiture vers les modes actifs, ou la réduction de la pollution de l'air associée au passage d'une cheminée à bois avec foyer ouvert à une pompe à chaleur.

Principe général de la formule de calcul :

$$\text{Coût d'abattement} = \frac{\text{Surcoût privé pour le porteur de l'action de décarbonation} + \text{Terme correctif de l'impact FiPu} + \text{Coûts externes}}{\text{Emissions évitées}}$$

2.1. Surcoût (privé) pour le porteur de l'action

En première approche, on peut considérer que le surcoût privé pour le porteur de l'action de décarbonation est une **composante du coût d'abattement socioéconomique** au sens où le porteur fait partie (au premier plan) des acteurs de la collectivité (dans son ensemble) directement affectés par l'action de décarbonation.

De manière alternative, **il indique (de manière indirecte) le niveau d'intervention publique (soit un coût intrinsèquement collectif) nécessaire** – quelle que soit sa forme – pour déclencher la mise en œuvre de l'action. En effet, si le surcoût privé est positif, le porteur n'a pas naturellement intérêt à adopter une action de décarbonation pourtant souhaitable pour la collectivité, cette dernière doit intervenir par la mise en place d'instruments de politiques publiques (y compris d'obligations réglementaires qui n'en représentent pas moins des coûts pour les acteurs qui y sont soumis et, donc, pour la collectivité) dont le niveau du signal doit au moins compenser le surcoût pour le porteur afin d'infléchir ses choix (d'investissement, d'usage, etc.).

Lorsque le surcoût privé pour le porteur est négatif, cela signifie qu'il est dans son propre intérêt de mettre en œuvre l'action de décarbonation. On sort donc en quelque sorte du champ de nos travaux puisqu'on se trouve face à des gisements qui ne nécessiteraient pas en théorie d'intervention publique – des campagnes d'information peuvent être cependant nécessaires – ni donc de choix sur les gisements à encourager prioritairement. Ces situations posent alors la question des coûts apparemment négatifs dans l'évaluation socioéconomique et par conséquent de l'existence de « coûts cachés » implicitement pris en compte dans les décisions des acteurs privés. Ces coûts cachés sont la raison la plus souvent invoquée pour expliquer les phénomènes d'*efficiency gap*.

La manière la plus immédiate d'évaluer le surcoût privé pour le porteur de l'action est de comparer l'ensemble des coûts (après les avoir recensés avec le plus d'exhaustivité possible) qui lui sont imputés entre la situation avec projet et la situation de référence : on parle classiquement de **méthode des coûts généralisés**. Les composantes de coûts les plus courantes et les plus simples à quantifier sont les achats d'équipements et les dépenses d'utilisation (carburant / combustible, entretien, etc.).

- *Exemple : Un particulier choisissant d'acheter un véhicule électrique plutôt que thermique fait face à un investissement initial plus important. Il anticipe en revanche des économies sur ses dépenses de carburant, d'entretien, voire d'assurance sur la période d'utilisation du véhicule.*

D'un point de vue théorique, **la variation du bien-être retiré par l'usager est une composante à part entière des coûts généralisés**. En pratique, lors de la mise en œuvre d'une action de décarbonation, il existe une infinité de dimensions susceptibles d'entraîner des variations de bien-être pour l'usager, dont certaines que nous serons incapables d'expliciter lors du calcul des coûts d'abattement dans les autres chapitres.

- *Suite de l'exemple : la contrainte d'autonomie limitée (ou de durée longue de recharge) d'un véhicule électrique affecte le bien-être d'un éventuel acheteur de manière très différenciée selon l'usage qu'il fait de sa voiture. Typiquement, elle dépend du nombre de trajets au-delà de l'autonomie du véhicule réalisés chaque*

année, des pratiques de recharge, de la valorisation du temps par l'usager, etc. De même, d'un point de vue théorique, le coût d'abattement socioéconomique dépend aussi de la manière dont les acheteurs valorisent le fait d'être vertueux écologiquement dans leurs habitudes de déplacements (c'est-à-dire internalisent la contrainte climatique sur cet aspect de leur consommation), etc. Comme il sera a priori *très difficile d'expliciter ces aspects, on les rassemble généralement sous l'expression de « coûts et avantages cachés ».*

Lorsque l'on étudie des gisements strictement technologiques, et plus généralement lorsque l'usage n'est pas modifié entre la situation étudiée et la situation de référence, on limite significativement l'ampleur de la variation des « coûts et avantages cachés » entre situation de référence et situation avec action de décarbonation mise en œuvre, sans nous assurer pour autant qu'elle soit négligeable.

- *Suite de l'exemple : lorsqu'il choisit effectivement un véhicule électrique plutôt que thermique, on peut raisonnablement faire l'hypothèse que l'acheteur ne modifiera pas ses usages (kilométrage annuel, trajets suivis, etc. – pas d'effet « rebond » en quelque sorte). Les « coûts cachés » (typiquement la valorisation du bien-être tiré du fait d'avoir adopté un comportement écologiquement vertueux) peuvent être négligés en première approche.*

En revanche, lorsqu'on souhaite déterminer un coût d'abattement associé à un changement d'usage ou à un changement technologique dont on sait qu'il induira nécessairement un changement d'usage, la variation du bien-être devient une composante centrale du coût privé. Il demeure pourtant très difficile de la quantifier sur ces seules bases normatives (pas de valeurs tutélaires semblables au cas des externalités).

- *Suite de l'exemple : lorsqu'on étudie une action de report modal (typiquement le passage d'un trajet avec son véhicule personnel, seul, à un trajet en covoiturage), la variation de bien-être pour l'usager (perte de temps ? de confort ? de flexibilité ?) devient centrale : il est beaucoup plus périlleux de considérer que la variation des « coûts et avantages cachés » est négligeable.*

Dans ces conditions (ou pour ces types de gisements en particulier), les travaux économétriques peuvent permettre de palier une partie des limites des approches en coûts généralisés. En particulier, ils peuvent contribuer :

- **à quantifier des variations de bien-être** qu'il serait impossible d'apprécier de manière explicite ;
- **à mettre en évidence / quantifier des changements d'usages induits** (non intrinsèques à l'action en elle-même, typiquement des effets rebond), et les variations de bien-être qui en découlent. Par exemple, Glachant et Blaise (2019)

montrent que la rénovation énergétique ne serait ni efficace, ni rentable pour réduire les consommations d'énergie[1].

Il apparaît donc que la partie du surcoût privé la plus simple à déterminer concerne la comparaison des coûts généralisés bien identifiés, en particulier techniques. La variation du bien-être pour le porteur est d'une part moins explicite donc moins fiable, et d'autre part beaucoup plus dispersée compte tenu de l'hétérogénéité des agents. Dès cette première composante du calcul global, on s'aperçoit que la méthode microfondée risque de présenter des limites importantes pour étudier des gisements de nature comportementale, que ce soit de réduction/augmentation de la demande ou de changement d'usage. Dans ce cas, l'approche intégrée par des modèles dans lesquels les choix comportementaux sont représentés et calibrés économétriquement pourrait permettre d'obtenir des informations pertinentes.

L'intervention publique nécessaire pour compenser le surcoût pour le porteur de l'action et donc mobiliser un gisement sera d'autant plus importante que le porteur valorise peu les économies que l'action peut lui faire réaliser à long terme. **Il semble opportun que le taux d'actualisation utilisé pour déterminer le surcoût privé reflète la « préférence pour le présent » effective des porteurs de l'action**. Le taux d'actualisation rend compte du temps attendu de retour sur investissement : il pourra varier significativement d'un secteur à l'autre, ou en fonction de la nature du porteur (particulier, entreprise, entité publique).

On peut considérer que le taux d'actualisation socioéconomique (établi à 4,5 % dans le rapport Quinet de 2013) en constitue la base, à laquelle doit être ajoutée une composante reflétant la « myopie » caractérisant généralement les acteurs privés. Cette démarche est cohérente avec celle qui consiste à intégrer dans le calcul les « coûts d'aménité » (temps, confort, sécurité, etc.), correspondant à des coûts et avantages cachés. **Dans ce cas, on pourra parler de « taux d'actualisation généralisé »**[2].

En suivant l'approche microfondée, il convient aussi de considérer les « coûts de système » : ce seront typiquement les coûts d'infrastructure de transport, de distribution et d'équilibrage des réseaux pour les vecteurs énergétiques décarbonés (électricité, gaz biosourcé, hydrogène, etc.). La détermination des coûts de système devra faire l'objet d'approches spécifiques, en l'absence de « valeurs tutélaires » préétablies.

Enfin, la prise en compte des effets d'apprentissage (*learning effects*, Arrow, 1962) doit être une dimension essentielle de l'évaluation dans une perspective de long terme.

[1] Glachant M et Blaise G. (2019), « Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ? », *La revue de l'énergie*, n° 646, septembre-octobre, p. 46-60.

[2] Cela consiste à attribuer au taux d'actualisation ce qu'on n'arrive pas à expliquer autrement, et s'obtient par le biais de travaux économétriques.

En pratique, si on ne peut prendre en compte les effets d'apprentissage de manière endogène au calcul, le calcul du coût d'abattement d'une même action à différents horizons de temps doit au moins considérer des valeurs projetées (à partir de dires d'ingénieurs) pour les différentes options technologiques. Cela afin notamment de distinguer les actions rentables dès aujourd'hui de celles encore peu efficaces mais avec d'importantes perspectives d'amélioration.

En résumé

- Le surcoût privé est à rapprocher du coût d'abattement socioéconomique dans la mesure où **il indique le niveau des incitations que les pouvoirs publics doivent mettre en œuvre** pour conduire les porteurs à déclencher les actions de décarbonation étudiées.
- L'approche la plus simple pour déterminer le surcoût privé est celle de la comparaison des coûts généralisés : **recenser l'ensemble des coûts et comparer leurs sommes agrégées** entre la situation de projet et celle de référence (dans une logique analogue à celle des méthodologies d'évaluation socioéconomique des grands projets d'investissement).
- Lorsqu'on considère des gisements comportementaux ou des gisements technologiques qui entraînent d'importants changements d'usage, **la variation de bien-être retiré par le porteur de l'action de décarbonation devient une composante centrale du surcoût privé**, dont tout ou partie ne pourra souvent pas être déterminé explicitement.
- Le recours à des travaux économétriques ou l'utilisation de modèles plus agrégés (avec des élasticités de substitution entre différents comportements) peut permettre de mieux apprécier ces aspects.
- Le taux utilisé pour actualiser les surcoûts privés s'appuie sur le taux socioéconomique de référence de 4,5 %, corrigé d'une composante rendant compte d'une perception du futur différente pour les acteurs privés.
- Les « coûts et avantages cachés » peuvent également être intégrés sous la forme d'une composante additionnelle au taux d'actualisation. Il convient alors de s'assurer qu'ils ne sont pas double-comptés.

2.2. Terme correctif de l'impact sur les finances publiques

Le surcoût (privé) pour le porteur de l'action de décarbonation tient compte du système fiscal existant qui, dans le scénario de référence, peut déjà intégrer des incitations en faveur (ou défaveur) de l'action de décarbonation étudiée, typiquement la plus forte taxation des énergies fossiles que l'électricité, qui incite déjà à l'électrification de

certains usages. **Si une diminution de la charge fiscale lors de la mise en œuvre d'une action de décarbonation donnée est une incitation pour le porteur**, **elle est neutre pour le coût de l'action du point de vue de la collectivité**. En effet, s'il est déjà institué, ce différentiel fiscal ne réduit pas intrinsèquement le coût de l'action pour la collectivité ; il diminue simplement le niveau de l'incitation additionnelle nécessaire pour déclencher l'action.

Il convient cependant d'intégrer dans le calcul un terme de correction des effets sur les finances publiques afin d'obtenir un coût socioéconomique indépendant de l'état actuel du système fiscal. Pour neutraliser dans le calcul du coût d'abattement socioéconomique les transferts entre le porteur de l'action et les finances publiques dans l'état actuel du système, on ajoute au surcoût privé un **terme correctif équivalent à la somme actualisée des transferts des finances publiques vers le porteur** (donc comptés négativement si la mise en œuvre de l'action engendre des recettes publiques supplémentaires). Cette composante représente un impact sur les seules finances publiques et pourra être **actualisée au taux socioéconomique de 4,5 %**. Au même titre que le surcoût privé pour le porteur de l'action, ce terme devra être corrigé pour tenir compte d'un éventuel effet rebond.

2.3. Coûts externes (et prise en compte des cobénéfices)

Le recensement des coûts externes doit être fait à l'échelle de chaque secteur, puis discuté plus spécifiquement pour chaque action. De la même manière qu'on compare les coûts généralisés pour le porteur dans le surcoût privé, le terme agrégé rendant compte de la variation des coûts externes (et des cobénéfices autres que climatiques) de l'action de décarbonation étudiée est obtenu en comparant leur niveau entre la situation avec l'action réalisée et la situation de référence. Comme pour l'impact sur les finances publiques, les externalités constituent des coûts purement collectifs, que l'on actualisera au taux de 4,5 %.

La plupart des coûts externes sont mesurés en valorisant une grandeur physique (typiquement un volume d'émissions) à l'aide une valeur tutélaire. C'est notamment le cas pour la plupart des externalités environnementales. L'externalité climatique sera prise en compte lorsque le coût d'abattement sera comparé à la VAC. Les autres externalités seront prises en compte dans le calcul lorsqu'une valeur tutélaire robuste est disponible.

Les coûts externes environnementaux sont les externalités que l'on retrouve à travers les effets des actions de réduction des émissions sur la pollution de l'air ou la pollution sonore, pour lesquelles des valeurs tutélaires sont établies dans le rapport Quinet (2013) et ses annexes. Les impacts sur la consommation de ressources rares, la préservation de la biodiversité ou l'artificialisation des sols entrent dans ce champ mais sont plus difficiles à

quantifier. Comme indiqué plus haut, un certain nombre d'autres externalités seront spécifiques à chaque secteur. C'est par exemple **le cas des coûts liés à la congestion ou à l'usure des infrastructures dans le secteur des transports.**

Pour des actions de substitution technologique, par exemple de passage d'un véhicule thermique à un véhicule électrique, et si l'usage reste identique, ces externalités-là resteront inchangées entre la situation nouvelle et la situation de référence (et n'affecteront pas le coût d'abattement socioéconomique). Comme pour les deux composantes précédentes (surcoût pour le porteur et terme correctif de l'impact sur les finances publiques), la variation des coûts externes entre la situation de référence et l'action étudiée devra tenir compte des changements d'usage et des éventuels effets rebond.

Les incertitudes sur la valorisation et la variation des coûts externes entre l'action et la situation de référence peuvent être de natures variées (recensement partiel, incertitude sur les grandeurs physiques, absences d'outils méthodologiques de type « valeurs tutélaires » pour les monétariser, etc.), et d'autant plus significatives. L'intérêt est avant tout d'évaluer leur ordre de grandeur par rapport au surcoût privé (pour le porteur de l'action), ce qui pourrait permettre notamment de différencier les actions efficientes selon le seul objectif de décarbonation des actions peu efficaces du point de vue climatique mais néanmoins pertinentes car permettant par ailleurs de contribuer (de manière significative) à l'atteinte d'autres objectifs de politique publique.

En cohérence avec le périmètre de la valeur de l'action pour le climat et des inventaires nationaux d'émissions, **il semble pertinent de tenir compte des coûts externes dans une logique « empreinte territoriale »** (de même, d'ailleurs, que pour quantifier les émissions évitées). En ce sens, pour une action donnée, il conviendrait de considérer les coûts externes et émissions dans une logique « cycle de vie » (en tenant compte des phases amont de production et aval de recyclage éventuel) mais restreinte au territoire national (la VAC n'a pas été construite pour neutraliser l'empreinte carbone de la France, qui inclurait notamment les émissions induites, à l'horizon 2050).

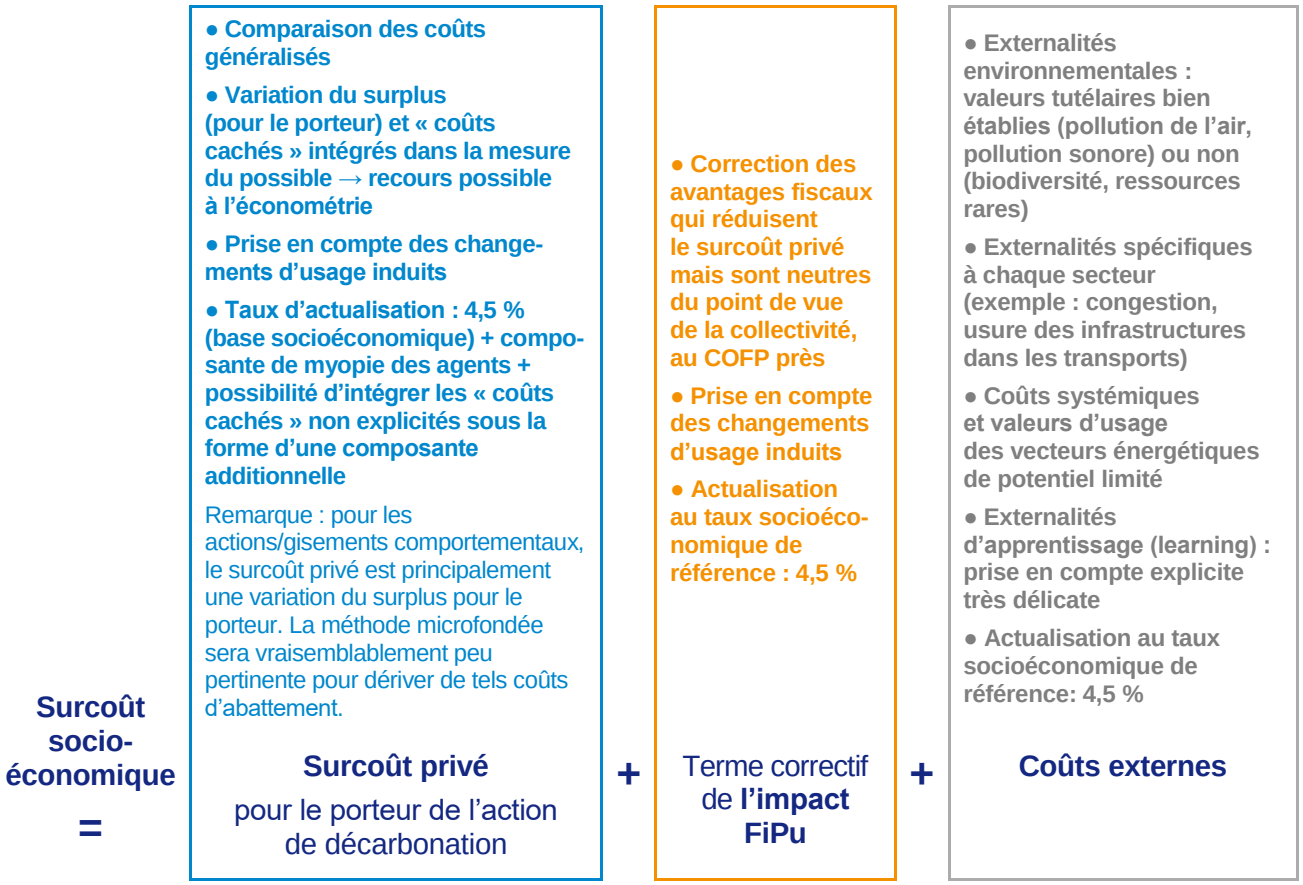
Par exemple, pour évaluer le coût d'abattement associé à l'achat d'un véhicule électrique plutôt que thermique, on tiendra compte des externalités de production du véhicule (notamment de sa batterie) et de l'électricité lorsque celles-ci sont comptabilisées dans l'inventaire national. Les émissions de GES associées à une batterie produite en Asie ne seront donc pas intégrées.

Pour autant, compte tenu de l'attention croissante portée à l'évolution de l'empreinte carbone nationale (à juste titre, d'autant plus du fait du caractère global des externalités climatiques), on pourra présenter aussi à titre indicatif des coûts d'abattement en logique « empreinte complète » qui intégreront toutes les externalités et émissions sur le « cycle

de vie » de l'action, quel que soit le territoire où elles adviennent. Leur comparaison à la VAC ne sera en revanche pas justifiée.

Il conviendrait aussi d'intégrer dans cette approche microfondée certains effets d'apprentissage (*learning*) sous la forme d'« avantages externes » négatifs (externalités positives). En effet, la mise en œuvre d'une action contribue à réduire le coût de sa diffusion dans le futur, ce qui constitue un bénéfice pour la collectivité (d'autant plus important que la mise en œuvre de l'action permet effectivement des baisses de coûts et que la technologie sera utilisée massivement dans le futur). En pratique, la quantification précise de ces effets pourrait dépasser le champ de nos travaux.

Graphique 4 – Principe de calcul de l'approche microfondée et synthèse des recommandations pour le calcul de chacun des termes



Source : commission sur les coûts d'abattement

CHAPITRE 3

REPLACER LES COÛTS DANS UNE PERSPECTIVE PLUS LARGE

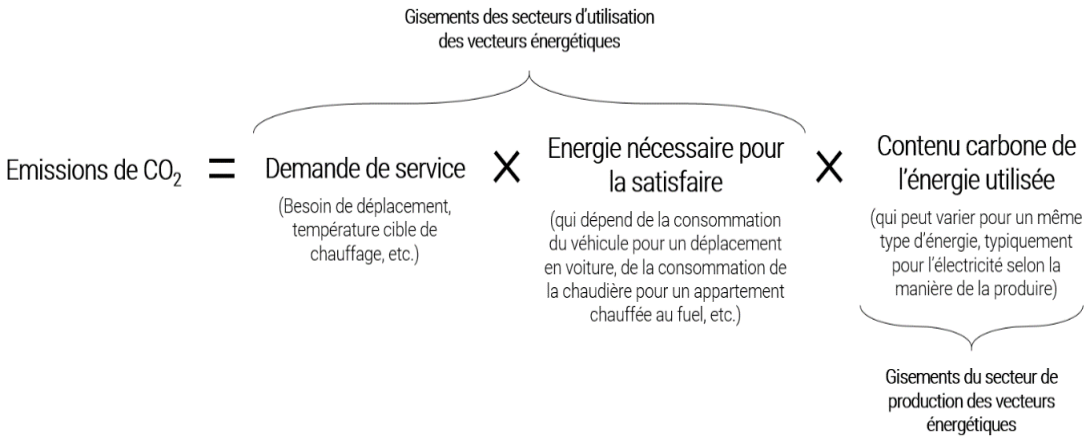
1. Définir les gisements de manière pertinente

On peut évaluer des coûts d'abattement marginaux associés à des objectifs de réduction d'émissions dans un sous-secteur (coût d'abattement marginal d'une réduction des émissions du transport routier de 30 % en 2030), un secteur (coût d'abattement marginal d'une réduction des émissions du secteur des transports de 60 % en 2040) ou pour l'économie dans son ensemble (coût d'abattement marginal d'une réduction des émissions territoriales françaises de 95 % en 2045). En particulier, la trajectoire de la VAC correspond à la trajectoire des coûts marginaux d'abattement associés à la trajectoire de réduction des émissions françaises permettant la neutralité carbone en 2050. Notre objectif est d'identifier les technologies ayant un coût d'abattement cohérent avec la VAC.

Les gisements de réduction peuvent être identifiés par grand secteur d'activité. On peut définir un gisement de réduction des émissions comme un ensemble d'actions, de toute nature (substitution technologique, évolution comportementale, organisationnelle) permettant de réduire le volume de GES émis par rapport à une situation de référence. **Un gisement de réduction d'émissions se caractérise notamment par son potentiel, qui correspond au volume total d'émissions évitables par cette action**. Il est classiquement exprimé en tCO_2eq ou tCO_2/an.

Encadré 6 – Nature des gisements : une ébauche de classification

Dans une approche analogue à celle de l'équation de Kaya, on peut écrire les émissions de CO_2 associées à la satisfaction d'un « service énergétique » (se déplacer, se chauffer, etc.) à l'aide d'une égalité simple :



Sur la base de cette écriture, valable pour l'ensemble des secteurs de consommation finale d'énergie (et que l'on pourra étendre sans difficulté aux autres secteurs émetteurs tels que l'agriculture ou les procédés industriels), on peut établir une première grille de classification des différents gisements de réduction d'émissions que l'on rencontrera. En effet, la réduction des émissions peut passer par :

- une réduction de la demande de service, qui est à l'origine des émissions induites : toutes choses égales par ailleurs, réduire par exemple sa demande de déplacement ou la température de chauffage de son logement permet de réduire ses émissions de CO_2. Il s'agit de gisements de nature comportementale ou organisationnelle, souvent qualifiés comme relevant de la sobriété énergétique ;
- une réduction de l'énergie nécessaire pour satisfaire un service final donné : cela peut passer par des choix technologiques (utiliser un appareil de chauffage plus efficace ou un véhicule moins consommateur) ou comportementaux (emprunter le bus ou pratiquer le covoiturage plutôt qu'utiliser seul son véhicule particulier). On parlera dans ce cas d'actions d'efficacité énergétique ;
- une réduction du contenu carbone de l'énergie utilisée, soit en changeant de vecteur énergétique (passer du chauffage au fuel au chauffage électrique), soit en réduisant le contenu carbone d'un vecteur donné (en diminuant par exemple la part d'électricité produite à partir de sources fossiles). Dans tous les cas, ces gisements sont de nature technologique.

En pratique, la segmentation ne sera pas toujours aussi simple et certaines actions pourront combiner plusieurs de ces leviers. Typiquement, le changement d'un équipement pour passer d'un vecteur énergétique carboné (par exemple le fuel) à

un vecteur moins émetteur (par exemple le biogaz) s'accompagnera généralement d'une variation de la consommation énergétique unitaire. Il pourra s'agir à la fois d'un gisement d'efficacité énergétique et de réduction du contenu carbone de l'énergie utilisée (par substitution du vecteur énergétique lui-même).

Au contraire, des gains d'efficacité énergétique (voitures moins consommatrices d'essence) pourront s'accompagner de modifications comportementales dans le sens d'une demande accrue pour le service (davantage de déplacements en voiture), c'est-à-dire d'un effet rebond, avec un effet net *a priori* indéterminé sur les émissions totales de CO_2.

D'un point de vue théorique, **les caractéristiques d'une action de décarbonation « type » (en particulier son coût) dépendent de l'usage auquel elle s'applique**. Il y a donc en quelque sorte autant de coûts d'abattement pour une action de décarbonation donnée que d'usages effectifs auxquels elle s'applique.

- ***Exemple 1 – le véhicule particulier électrique***

La rentabilité (privée comme socioéconomique) d'un véhicule électrique est très dépendante de la manière dont celui-ci est utilisé : kilométrage annuel, nombre annuel de trajets à longue distance, milieux de circulation, etc. Plus le véhicule est utilisé, plus il permet d'éviter des émissions s'il est électrique (i.e. son potentiel de réduction d'émissions est important). Par ailleurs, les économies de carburant sont alors d'autant plus importantes et le surcoût qui lui est associé diminue.

- ***Exemple 2 – l'énergie éolienne* offshore**

De manière analogue, la rentabilité de l'énergie éolienne offshore *dépend notamment des zones d'implantation possibles et de leurs caractéristiques météorologiques. Le coût d'abattement associé à la mise en service d'une éolienne dépend des conditions locales dans lesquelles elle fonctionnera (et des caractéristiques des équipements installés).*

À chaque fois que cela est pertinent, on pourra chercher à définir un gisement de réduction d'émissions comme le croisement d'une action de décarbonation (toujours quelle que soit sa nature) avec un ensemble « homogène » d'usages, de telle sorte qu'une valeur centrale de coût d'abattement (déterminé sur l'usage moyen du segment) reste caractéristique du gisement dans son ensemble.

- ***Suite de l'exemple 1 – le véhicule particulier électrique***

Le coût peut théoriquement être différencié selon une « infinité » d'usages. En pratique, on pourra par exemple fractionner le gisement selon des segments de kilométrage annuel (du type < 10 000, 10 à 20 000 et > 20 000 km/an), en croisant éventuellement avec un milieu de circulation moyen (parmi par exemple : urbain très dense, urbain et rural). Il subsistera nécessairement une hétérogénéité (parcourir 10 000 ou 20 000 km/an n'est pas équivalent) mais elle sera réduite car circonscrite à un sous-ensemble d'usages proches : l'idée est de pouvoir montrer que certaines options sont à privilégier sur des segments d'usages bien particuliers (et donc d'affiner le raisonnement).

- ***Suite de l'exemple 2 – l'énergie éolienne* offshore**

On pourra segmenter les espaces marins susceptibles d'accueillir des champs en un nombre réduit de catégories (par exemple « très favorables », représentant x % de la surface totale, « favorables », représentant y % et « défavorables », représentant z %) selon la vitesse moyenne des vents, la profondeur des eaux, ou tout autre paramètre d'intérêt.

La délimitation d'ensembles d'usages homogènes comporte une part d'arbitraire ; elle doit être discutée au cas par cas, selon notamment la disponibilité des données pour réaliser la segmentation ou le niveau de précision des informations attendues. La disparité (résiduelle et par construction limitée) des usages (et donc des coûts) sous-jacents au gisement pourra toujours apparaître dans un intervalle d'incertitudes plus global.

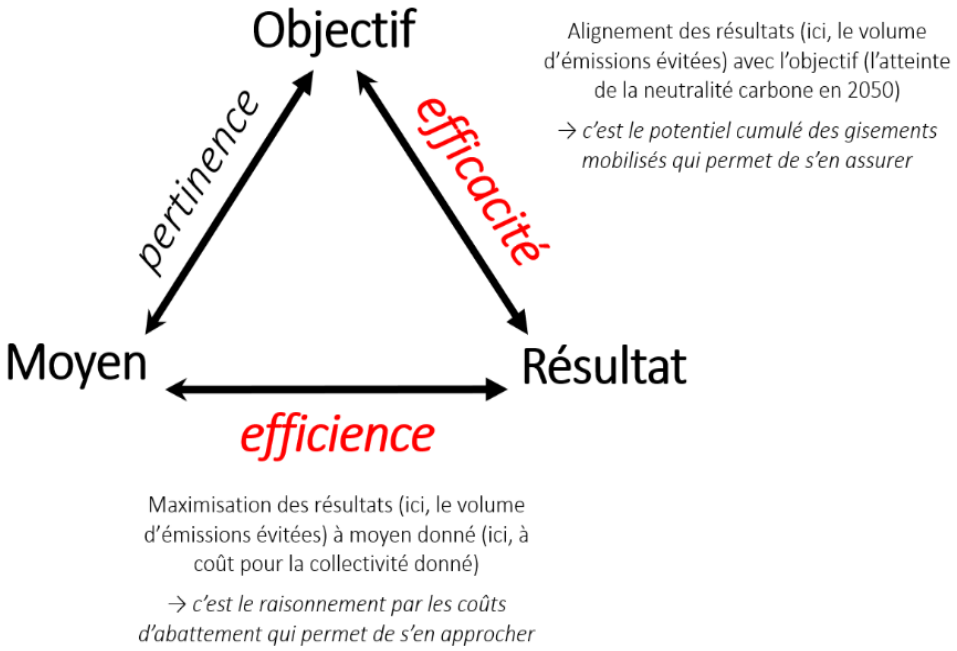
Dans la courbe « à la McKinsey » (graphique 2), les gisements restent décrits à un niveau très agrégé, sans distinguer différents usages pour une même technologie (même si la distinction entre « véhicules d'entreprise » vs. « véhicules particuliers » pour le gisement d'efficacité des motorisations peut par exemple s'en approcher). La représentation fait l'hypothèse de coûts homogènes sur chaque gisement, ce qui masque en réalité des disparités internes. Plus le niveau de description est agrégé, plus les disparités internes peuvent être fortes et plus il est souhaitable de faire apparaître un intervalle de variabilité intégrant cet aspect.

2. La prise en compte du volume des gisements : un indicateur complémentaire et nécessaire

Le recours au coût d'abattement pour hiérarchiser différentes actions de décarbonation est donc cohérent avec la méthodologie classique d'évaluation socioéconomique des grands projets d'investissement public. Néanmoins, il conviendra de s'assurer que la mise

en œuvre des actions rentables / prioritaires (c'est-à-dire dont les coûts d'abattement sont les plus faibles) permet bien des réductions d'émissions (en volumes) compatibles avec la trajectoire conduisant à la neutralité carbone en 2050. Autrement dit, l'étude des potentiels (y compris cumulés) des différents gisements avec une vision systémique doit servir de « corde de rappel » pour s'assurer que la recherche d'efficacité économique ne menace pas l'atteinte même de l'objectif de décarbonation.

Graphique 5 – Objectif, résultat, moyen : principes des indicateurs d'efficience et d'efficacité



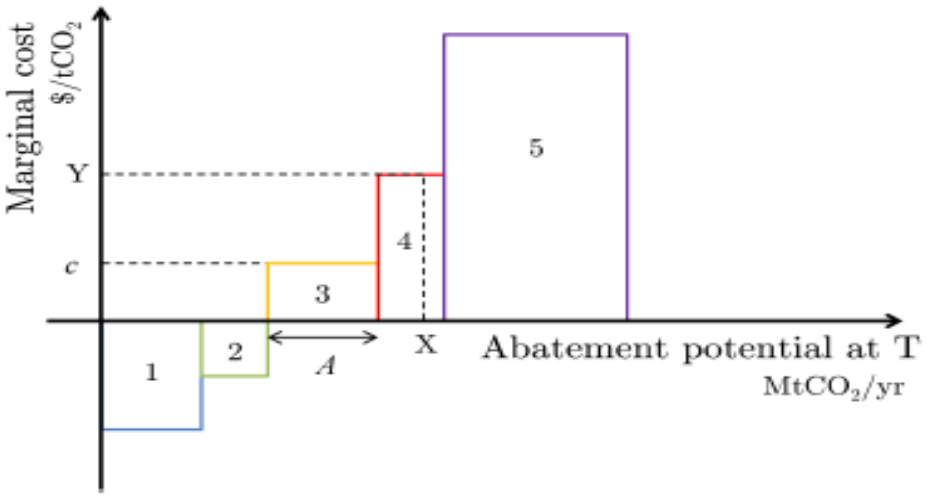
Source : commission sur les coûts d'abattement

Le raisonnement en coûts d'abattement et la hiérarchisation des actions de décarbonation concurrentes sur la base de cet indicateur permettent de **maximiser les réductions effectives d'émissions à niveau d'effort pour la collectivité considérée**. Par ailleurs, d'un point de vue théorique, la comparaison des coûts d'abattement à la VAC doit permettre, si celle-ci est correctement calibrée, d'identifier les gisements nécessaires à l'atteinte de la neutralité carbone (et d'écarter le cas échéant ceux qui correspondent à un effort sous-jacent trop important). L'évaluation des potentiels des gisements doit permettre de s'assurer que ceux choisis permettent bien de se placer sur une trajectoire compatible avec la neutralité carbone (autrement dit que la trajectoire de VAC telle qu'établie ne conduit pas à écarter trop de gisements, rendant l'atteinte de l'objectif climatique impossible).

3. L'importance d'une mise en perspective dynamique

Entendu sous un angle temporel, le coût d'abattement moyen renvoie au coût unitaire des émissions évitées permises par un gisement progressivement déployé (et dont les coûts évoluent dans le temps) sur une période donnée : le coût moyen est calculé en divisant le coût total d'un gisement par le volume d'émissions évitées. Typiquement, le coût d'abattement moyen (temporel) permet d'éclairer utilement le cas de technologies à forts potentiels de réduction d'émissions, dont les coûts sont élevés en début de période mais sont amenés à significativement baisser, et pour lesquels la mise en œuvre d'actions à court terme (lancement de la filière) conditionne le succès (et la mobilisation du gisement complet) à long terme. Autrement dit, le coût d'abattement moyen ainsi calculé est un indicateur qui intègre des éléments de l'évolution dynamique anticipée de la technologie[1] et de ses caractéristiques (en particulier ses coûts).

Graphique 6 – Courbe de coût d'abattement marginal

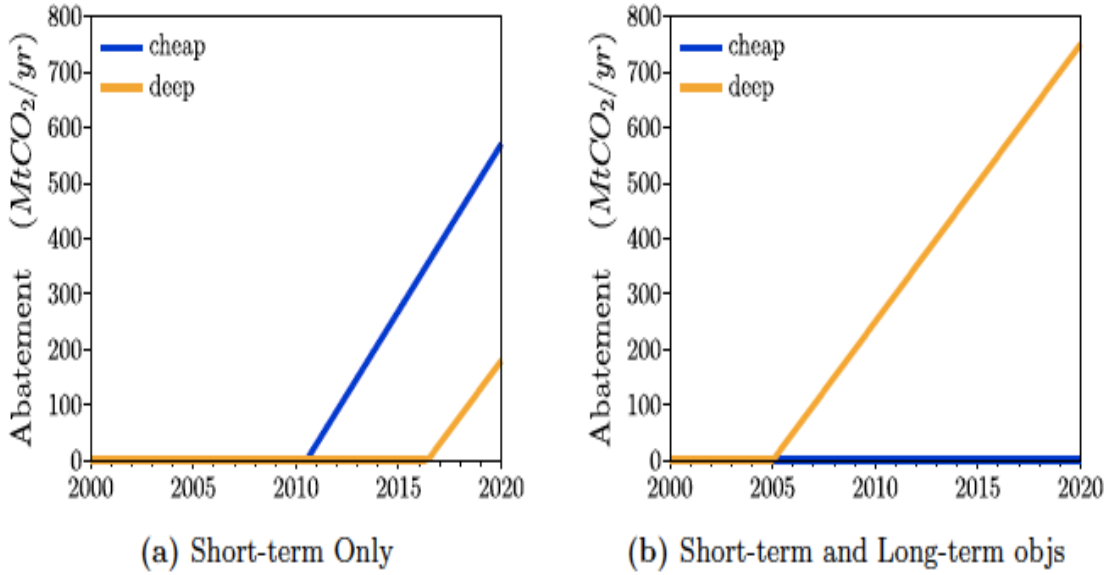


Lecture : l'allure de la courbe de coût marginal d'abattement est facilement mal interprétée, comme une courbe d'offre d'abattement qui conduirait à une demande d'abattement X satisfaite par les mesures 1 à 4 seulement.

Source : Vogt-Schilb A., Hallegatte S. et De Gouvello C. (2014), Marginal Abatement Cost Curves and Quality of Emission Reductions: A Case Study on Brazil. Climate Policy, Taylor & Francis, p.15

[1] « *Because the measures required to achieve ambitious emission reductions cannot be implemented overnight, the optimal strategy to reach a short-term target depends on longer-term targets.* » Voir Vogt-Schilb A. et Hallegatte S. (2014), « Marginal abatement cost curves and the optimal timing of mitigation measures », *Energy Policy*, vol. 66, issue C, p. 645-653.

Graphique 7 – Sentier d'abattement optimal selon l'horizon temporel retenu



Lecture : comparaison des stratégies optimales d'abattement pour atteindre le même objectif en 2020 (a) en ignorant un potentiel objectif de long terme (b) en intégrant un objectif pour 2050.

Source : Vogt-Schilb A. et Hallegatte S. (2014), op. cit.

En toute cohérence, la notion de potentiel à mettre en regard d'un coût d'abattement instantané ou d'un coût d'abattement moyen (du point de vue temporel) n'est pas la même.

- Il est pertinent d'analyser un coût d'abattement instantané au regard du flux d'émissions évitées permises (typiquement le volume d'émissions que le gisement permet d'éviter annuellement) ;
- le coût d'abattement moyen sera mieux complété par un volume d'émissions évitées cumulées sur toute la trajectoire de déploiement d'un gisement (l'intégrale des émissions évitées sur toute la période considérée).

Le calcul de la VAN, qui appréhende l'intégralité de la création de valeur, vient donc compléter utilement celui du coût d'abattement afin de lui donner une dimension « potentiel de gisement », notamment s'il est susceptible de croître dans le temps. Il est ainsi parfois nécessaire de financer des actions non immédiatement rentables pour favoriser le développement technologique ou la baisse des coûts.

CHAPITRE 4

SYNTHÈSE MÉTHODOLOGIQUE ET RECOMMANDATIONS

Le coût d'abattement « ajusté à la VAC » est celui qui peut être directement comparé à la VAC pour déterminer si une option est souhaitable d'un point de vue socioéconomique. **Le coût d'abattement dit « en budget carbone »** sera certainement utile pour la comparaison avec des *benchmarks* internationaux. Les gestes de décarbonation seront classés sous certaines conditions – en général acceptables en première approximation –, de la même manière selon que l'on considère le coût d'abattement « en budget carbone » ou « ajusté à la VAC », si l'on raisonne « à effort donné ». **Cependant, si l'on souhaite classer les projets du point de vue de la création totale de valeur nette pour la collectivité, il faut comparer leur VAN**.

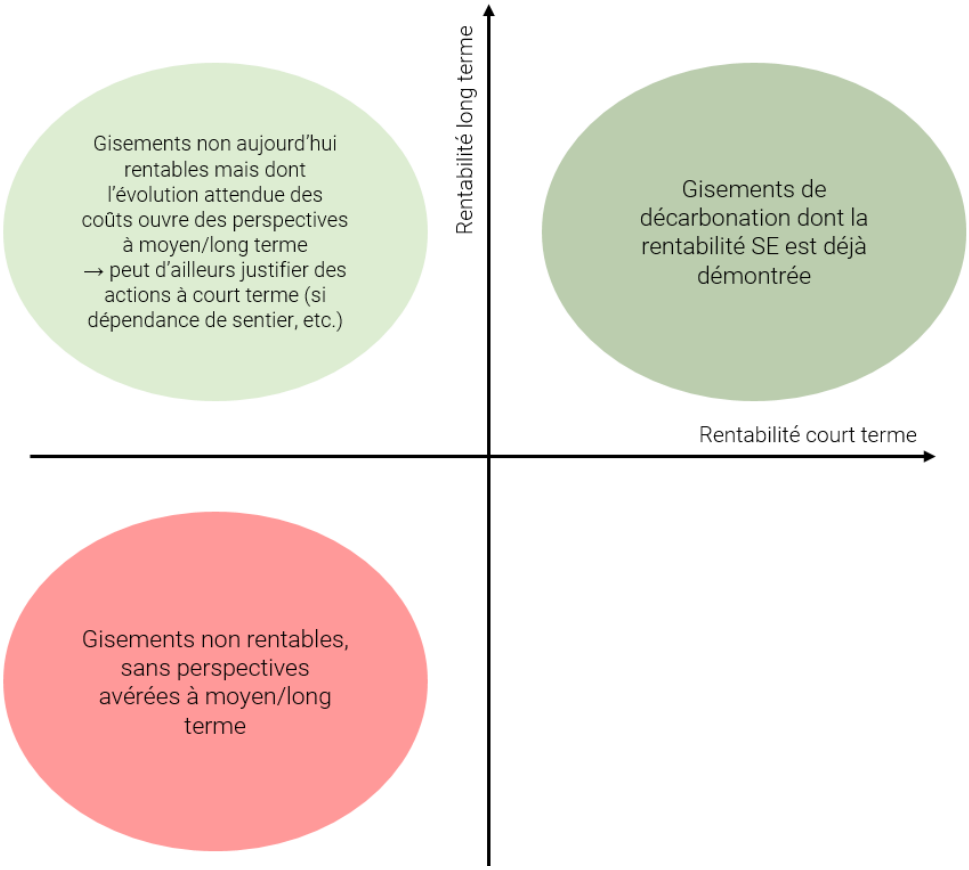
Compte tenu des sources multiples d'incertitudes et des limites méthodologiques qui contraindront la prise en compte de certaines dimensions des coûts socioéconomiques (notamment de certaines externalités), c'est donc **un élément d'aide à la décision en plus, mais pas une boussole absolue**. Par ailleurs, il pourrait être davantage pertinent d'utiliser la métrique des coûts d'abattement pour **classifier les gisements d'abattement par grandes catégories**, en distinguant notamment :

– à court terme, les gisements socioéconomiquement rentables de ceux qui ne le sont pas (c'est-à-dire dont les coûts d'abattement sont respectivement significativement inférieurs ou supérieurs à la VAC) ;

– parmi les gisements non encore rentables, ceux dont les perspectives d'évolution des coûts laissent pressentir qu'ils le seront à moyen / long terme ;

– aux différents horizons de temps, les gisements rentables sans intégrer de cobénéfices et ceux dont la rentabilité résulte de la prise en compte d'objectifs de politiques publiques autres que climatiques (réduction des externalités environnementales, etc.).

Graphique 8 – Rentabilité à court terme et à long terme des gisements



Source : commission sur les coûts d'abattement

ANNEXES

ANNEXE 1

MEMBRES DE LA COMMISSION ET PERSONNES AUDITIONNÉES

Président

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

Secrétariat

Bérengère Mesqui, coordinatrice, France Stratégie

Julien Bueb, France Stratégie

Stéphane Crémel, Direction générale du Trésor

Maxime Gérardin, France Stratégie

Olivier de Guibert, Commissariat général au développement durable

Silvano Domergue, Commissariat général au développement durable

Boris Le Hir, France Stratégie

Aude Pommeret, France Stratégie

Gauthier Vermandel, France Stratégie

Membres

Émilie Alberola, directrice Innovation et Recherche, Eco'Act

Yasmine Arsalane, Agence internationale de l'énergie

Emmanuel Combet, ADEME

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

Antoine Dechezleprêtre, OCDE

Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, I-Tesé

Matthieu Glachant, professeur d'économie, Mines Paristech

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

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

David Marchal, ADEME

Yves Marignac, association Négawatt

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

Yannick Pérez, CentraleSupélec

Cédric Philibert, université Paris-Dauphine

Philippe Quirion, CNRS-CIRED

Personnes auditionnées

Gilles Aymoz, ADEME

Laure Bamière, INRAE

Jean-Pierre Birat, IF Steelman

Jean-Michel Cayla, EDF

Christian Couturier, Solagro

Stéphane de Cara, INRAE, AgroParisTech

Jérémy El Beze, Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)

Thomas Gourdon, ADEME

Olivier Guerrini, ENGIE

Pierre-Laurent Lucille, ENGIE

Simon Métivier, Solagro

Dominique Osso, EDF

Aurélien Schuller, Carbone 4

Paul Serrat, ENGIE

Jean-Michel Trochet, EDF

Claire Tutenuit, Entreprises pour l'environnement (EPE)

Thomas Veyrenc, RTE

ANNEXE 2

ILLUSTRATION NUMÉRIQUE DU CHOIX ENTRE VÉHICULE HYBRIDE ET VÉHICULE ÉLECTRIQUE

Tableau A – L'utilisation du véhicule électrique réduit les émissions de 1.8 tCO_2/an et la production de la batterie du véhicule électrique émet 10 tCO_2

Véhicule hybride		Véhicule électrique			
Surcoût achat	1700,00	Surcoût achat	5000,00	Émissions construction	10,00
Gain annuel	50,00	Gain annuel	150,00		
Durée de vie	16,00	Durée de vie	16,00		
Émissions évitées/an	0,50	Émissions évitées/an	1,80		
Taux actualisation	0,045	Taux actualisation	0,045		

Années	VAC	Bénéfice financier actualisé	Bénéfice climatique actualisé	Années	VAC	Bénéfice financier actualisé	Bénéfice climatique actualisé
0	90,00	-1650,00	45,00	0	90,00	-4850,00	-738,00
1	106,00	47,85	50,72	1	106,00	143,54	182,58
2	122,00	45,79	55,86	2	122,00	137,36	201,09
3	138,00	43,81	60,46	3	138,00	131,44	217,67
4	154,00	41,93	64,57	4	154,00	125,78	232,45
5	170,00	40,12	68,21	5	170,00	120,37	245,55
6	186,00	38,39	71,41	6	186,00	115,18	257,09
7	202,00	36,74	74,22	7	202,00	110,22	267,18
8	218,00	35,16	76,65	8	218,00	105,48	275,93
9	234,00	33,65	78,73	9	234,00	100,94	283,43
10	250,00	32,20	80,49	10	250,00	96,59	289,77
11	275,00	30,81	84,73	11	275,00	92,43	305,02
12	300,00	29,48	88,45	12	300,00	88,45	318,42
13	325,00	28,21	91,69	13	325,00	84,64	330,10
14	350,00	27,00	94,50	14	350,00	81,00	340,18
15	375,00	25,84	96,89	15	375,00	77,51	348,79

Somme	**-1113,02**	**1182,57**	**-3239,07**	**3357,25**
			au budget de l'hybride	**1153,63**
VAC_eq	147,82			178,58
Somme émissions évitées	8,00		18,80	
CA[1]	**139,13**		**172,29**	
CA[2]	**84,71**		**86,83**	
Bilan socioéconomique	**69,55**			**118,19**
			au budget de l'hybride	**40,61**

Tableau B – L'utilisation du véhicule électrique réduit les émissions de 1,4 tCO_2/an et on néglige les émissions lors de la production de la batterie du véhicule électrique

Hybride		Électrique			
Surcoût achat	1700,00	Surcoût achat	5000,00	Émissions construction	10,00
Gain annuel	50,00	Gain annuel	150,00		
Durée de vie	16,00	Durée de vie	16,00		
Émissions évitées/an	0,50	Émissions évitées/an	1,40		
Taux actualisation	0,045	Taux actualisation	0,045		

Années	VAC	Bénéfice financier actualisé	Bénéfice climatique actualisé	Années	VAC	Bénéfice financier actualisé	Bénéfice climatique actualisé
0	90,00	-1 650,00	45,00	0	90,00	-4 850,00	126,00
1	106,00	47,85	50,72	1	106,00	143,54	142,01
2	122,00	45,79	55,86	2	122,00	137,36	156,41
3	138,00	43,81	60,46	3	138,00	131,44	169,30
4	154,00	41,93	64,57	4	154,00	125,78	180,79
5	170,00	40,12	68,21	5	170,00	120,37	190,98
6	186,00	38,39	71,41	6	186,00	115,18	199,96
7	202,00	36,74	74,22	7	202,00	110,22	207,81
8	218,00	35,16	76,65	8	218,00	105,48	214,61
9	234,00	33,65	78,73	9	234,00	100,94	220,44
10	250,00	32,20	80,49	10	250,00	96,59	225,37
11	275,00	30,81	84,73	11	275,00	92,43	237,24
12	300,00	29,48	88,45	12	300,00	88,45	247,66
13	325,00	28,21	91,69	13	325,00	84,64	256,74
14	350,00	27,00	94,50	14	350,00	81,00	264,59
15	375,00	25,84	96,89	15	375,00	77,51	271,28

Somme	**-1113,02**	**1182,57**	**-3239,07**	**3311,20**
			au budget de l'hybride	**1137,81**
VAC_eq	147,82			147,82
Somme émissions évitées	8,00		22,4 0	
CA[1]	**139,13**		**144,60**	
CA[2]	**84,71**		**88,04**	
Bilan socioéconomique		**69,55**		**72,13**
			au budget de l'hybride	**24,79**

Directeur de la publication
Gilles de Margerie, commissaire général
Directeur de la rédaction
Cédric Audenis, commissaire général adjoint
Secrétaires de rédaction
Olivier de Broca, Gladys Caré, Anaïs Teston
Contact presse
Matthias Le Fur, directeur du service Édition/Communication/Événements
01 42 75 61 37, matthias.lefur@strategie.gouv.fr

RETROUVEZ
LES DERNIÈRES ACTUALITÉS
DE FRANCE STRATÉGIE SUR :

www.strategie.gouv.fr

@Strategie_Gouv

france-strategie

FranceStrategie

@FranceStrategie_

StrategieGouv

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

FRANCE STRATÉGIE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

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

FRANCE STRATÉGIE – 20, AVENUE DE SÉGUR – TSA 90725 – 75334 PARIS CEDEX 07 – TÉL. 01 42 75 80 00