



AVIS ET RAPPORT DE L'ACADEMIE DES TECHNOLOGIES

Quel prix de référence du CO₂ ?

Pourquoi définir un prix de référence du CO₂ ?

Comment le définir (méthodologie) ?

En pratique, quel prix adopter ?

Table des matières

Avis sur la détermination d'un prix de référence du carbone.....	3
Quel prix de référence du CO ₂	7
1. Introduction – Pourquoi définir un prix de référence du CO ₂	7
2. Comment définir le prix du carbone (ou du CO ₂)	7
2.1. Les principales définitions du prix du CO ₂	7
2.2. Les difficultés de calcul et leurs conséquences	10
3. Les principales études relatives au prix du CO ₂	12
3.1. Propositions de coût socio-économique	12
3.2. Propositions de coût d'abattement.....	13
3.3. Estimations de prix effectifs.....	16
4. Quelques observations sur la situation française.....	17
4.1. Les objectifs	17
4.2. Les subventions.....	18
4.3. La taxation.....	19
5. Conclusions et recommandations	20
5.1. La France	20
5.2. Le monde	22
Annexe 1 - Comparaison entre les objectifs français de réduction de gaz à effet de serre et les recommandations du GIEC	23
Annexe 2 - Une difficulté méthodologique majeure : l'actualisation	24
Annexe 3 – Différentes évaluations du prix du carbone	27
1. Evaluations du coût socio-économique.....	27
2. Evaluations directes du prix d'abattement.....	28
3. Evaluations du prix effectif du carbone.....	33
3.1. Les taxes carbone.....	33
3.2. Le prix effectif apprécié par l'évaluation du montant des subventions	37
3.3. Les prix du CO ₂ retenus par les entreprises.....	39
Glossaire	40

Avis sur la détermination d'un prix de référence du carbone

L'Académie des technologies dans son rapport consacré aux « technologies et au changement climatique » [Réf. 1] a recommandé que soit déterminé un prix à la tonne de CO₂ équivalent (dit « prix du carbone »), et suggéré que ce prix soit utilisé pour optimiser les investissements des acteurs publics ou privés, fixer le niveau d'une éventuelle taxe carbone, ou déterminer rationnellement le niveau des aides publiques à la transition énergétique. Alors que les années récentes, et particulièrement 2016, donnent des indications inquiétantes sur la poursuite du réchauffement climatique, et dans l'attente d'un fonctionnement effectif du marché européen d'échanges de permis d'émissions (EU-ETS), la tarification des émissions du CO₂ devient un élément essentiel de leur maîtrise.

Plusieurs définitions du prix de référence du carbone (ou du prix à la tonne de CO₂ équivalent) sont possibles :

- i. Le prix socio-économique du carbone représente le coût des conséquences dommageables d'une émission additionnelle d'une tonne de CO₂ ; c'est le prix de l'externalité carbone.
- ii. Le prix d'abattement suppose la définition préalable d'une trajectoire de réduction d'émissions ; c'est le coût à dépenser pour éviter l'émission de la tonne marginale qui conduirait à dépasser la trajectoire. Ce serait le prix du carbone sur un marché d'échanges de permis d'émission fonctionnant parfaitement.
- iii. Le prix effectif du carbone est celui qu'on peut constater en observant les décisions publiques ; on les suppose rationnelles, et on en déduit la valeur implicite que ces décisions ont attribuée à une réduction des émissions.

L'établissement du prix socio-économique et du prix d'abattement impliquent de comparer des coûts ou recettes à différentes périodes dans le temps, qui peuvent être fort éloignées. Il y a donc une nécessité d'actualisation. La théorie économique montre qu'un taux d'actualisation assez bas (2 à 3%, voire moins) doit être retenu si l'on veut s'approcher de l'égalité intergénérationnelle (traiter également les générations actuelles et futures), prendre en compte l'aversion à l'inégalité et tenir compte des incertitudes sur les perspectives de croissance. France Stratégie^a a proposé en 2013 de retenir un taux sans risque de 2,5% décroissant dans le temps, et une méthodologie de prise en compte du risque conduisant à un taux d'actualisation complet de 4,5% [Réf. 2]. Ces recommandations très novatrices mériteraient d'être révisées, probablement dans le sens de la baisse du taux sans risque, pour tenir compte de l'évolution de l'environnement économique. Il reste que le choix du taux d'actualisation est une décision politique, sous tendue par des considérations éthiques ; il devrait faire l'objet d'un débat public.

Les évaluations du prix socio-économique nécessitent des hypothèses sur des données en réalité très incertaines telles que l'impact du réchauffement climatique sur la croissance, les migrations, les catastrophes climatiques (typhons, etc.) et les destructions associées. De très nombreuses études académiques ont été faites dans ce domaine, qui concluent à une large fourchette de prix socio-économiques allant de moins d'une dizaine à une trentaine d'euros par tonne de CO₂ équivalent. Quelques gouvernements étrangers, notamment les

^a France Stratégie est la désignation abrégée du Commissariat général à la Stratégie et à la Prospective, qui succède au Conseil d'analyse stratégique et au Commissariat général au plan.

Etats-Unis et le Royaume-Uni, se sont cependant donnés des prix socio-économiques du carbone, utilisés pour les optimisations d'investissements publics.

En marge de la Conférence des Parties qui s'est tenue à Marrakech en novembre 2016, une commission de haut niveau animée par Nicholas Stern et Joseph Stiglitz a été mise en place, sous impulsion française ; cette commission doit proposer d'ici avril 2017 des corridors de prix du carbone cohérents avec les ambitions de l'accord de Paris. Les résultats seront présentés en avril 2017 à l'occasion des réunions de printemps du FMI et de la Banque mondiale. On doit s'attendre à une consolidation de résultats existants, notamment sur coût socio-économique du CO₂ et le taux d'actualisation à retenir pour l'établir, ainsi qu'à des recommandations politiques pour mettre en place des instruments de tarification du carbone alignés avec les intentions de réduction déclarées par les Parties à l'accord de Paris.

La France s'est donnée une trajectoire de réduction d'émissions de gaz à effet de serre. Le Conseil d'analyse stratégique a proposé en 2009 le coût marginal d'abattement associé à cette trajectoire ; les conclusions de cette étude ont été confirmées en 2013 par France Stratégie (rapports Quinet [Réf. 2 et 3]). Il convient que les résultats de ces études soient systématiquement pris en compte dans l'évaluation économique des investissements publics, en donnant une valeur monétaire à la tonne de CO₂ produite ou évitée. Il convient aussi que ces conclusions soient revisitées assez fréquemment, compte tenu de la rapidité d'évolution des domaines en cause.

Cependant ces études ne sont pas directement fondées sur la prise en compte des coûts d'abattement des différentes options technologiques envisageables. Il est souhaitable d'établir un coût sectoriel d'abattement, par technologie, ce qui permettrait de les classer par ordre de mérite comme l'ont fait par exemple la Suède ou la Grande-Bretagne en suivant une méthodologie introduite par McKinsey [Réf. 4 et 5]. Les économistes de l'environnement pourraient s'y consacrer. La tâche est urgente d'autant que les différentes politiques publiques françaises, au regard de leurs coûts et des quantités de CO₂ évitées, sont extrêmement irrationnelles.

La détermination des prix sectoriels d'abattement devrait permettre de mieux optimiser les mécanismes d'aides et de subventions français, en donnant une meilleure place à certaines bioénergies, peu soutenues mais dont le coût marginal d'abattement est plus faible que celui du photovoltaïque et de l'éolien en mer. Et pourtant le fort soutien français à ces dernières énergies n'a pas permis de développer des filières industrielles nationales.

On doit s'attendre à ce que le prix moyen d'abattement ou prix de référence de la tonne de CO₂ équivalent **se situe autour, voire au-delà de 50 €/tCO₂eq**. Ce prix devrait être périodiquement révisé à la hausse, le coût d'abattement étant d'autant plus élevé qu'un effort important a déjà été fait. Ce prix est supérieur aux prix d'abattement considérés par les pays étrangers pour deux raisons :

1. La France vise à réduire ses émissions du même pourcentage que ses voisins, alors que son niveau de départ est sensiblement plus faible ; or le coût d'abattement est d'autant plus élevé que le niveau d'émission de départ est faible
2. De nombreux pays, à l'instigation du GIEC, font l'hypothèse que la séquestration du CO₂ (Carbon capture and storage - CCS) sera aisément disponible et très largement mise en œuvre ; le prix d'abattement considéré par ces pays est en conséquence réduit. Cependant, les incertitudes technologiques sont encore nombreuses pour garantir des stockages de très longue durée ; en outre, la géologie de différentes parties du monde ne permettra pas d'y séquestrer le carbone. C'est, par exemple, le cas de la Chine et l'Inde.

Le prix de 50 €/tCO₂eq est également supérieur aux prix effectifs que l'on peut déduire des taxes mises en œuvre à l'étranger, ou de l'observation du fonctionnement de marchés de permis d'émission existants. L'impact sur la compétitivité de l'économie française sera donc supérieur à l'impact accepté par les principaux pays développés. **Le prix de référence du CO₂ en France (au moins 50 €/tCO₂eq) ainsi que le taux d'actualisation (un peu plus de 2%), devraient être soumis à un large débat public allant au-delà de la concertation traditionnelle au sein des commissions mises en place par France Stratégie, et retenant la méthode « Livre Vert – Livre Blanc – pratiquée avec succès au Royaume-Uni.** Le maintien de l'ambition française en matière de réduction d'émissions de CO₂ est en effet un choix politique majeur, qui peut peser sur la croissance ; il nécessite une grande continuité dans sa mise en œuvre et donc un consensus national.

Si une taxe (ou un prix plancher du carbone) était définie au niveau de 50 €/tCO₂, elle représenterait environ vingt milliards d'euros, soit à peu près le produit de la Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques – (TICPE). Une telle somme ne saurait être prélevée sans se substituer à des taxes existantes.

Les choix publics structurants (choix du mix énergétique ; politiques orientant les modes de chauffage ; développement des infrastructures de transport (route, rail, voie d'eau), etc.) devraient donner lieu à une étude de sensibilité avec un prix plus faible (30 €/tCO₂) ; l'étude de sensibilité permettra de s'assurer de la robustesse des choix.

Un prix de référence de la tonne de CO₂ ne suffira pas à rendre rationnelles les décisions des agents économiques. Certaines consommations ont en effet une élasticité très faible au regard du prix de l'énergie et à sa taxation ; elles impliquent souvent des décisions à moyen et long terme peu sensibles aux taxes en vigueur en raison de la myopie et des asymétries d'information des marchés et des comportements stratégiques des macro-acteurs ; c'est en particulier le cas du transport routier. D'autres décisions économiquement pertinentes ne sont cependant pas prises faute de capacité à investir : les propriétaires privés ne peuvent aisément financer des travaux substantiels d'isolations de logement. **La seule détermination d'un prix de référence, ou même d'une taxe ne suffira donc pas à assurer le respect de la trajectoire de réduction d'émissions visée. Il conviendra d'accompagner la fixation d'un prix de référence par d'autres incitations sous forme de réglementations ou de subventions (tarifs garantis, etc.). L'établissement des prix d'abattement par technologie devrait permettre de mieux optimiser ces incitations.**

Ce sera donc toujours une combinaison de mécanismes qui permettront d'assurer en France la transition énergétique au rythme souhaité, en veillant à définir des politiques globales et proches de l'optimum. Le prix de référence du carbone permettra de vérifier la cohérence de ces politiques.

La problématique du réchauffement climatique est mondiale ; quelque vertueuse que se propose d'être la France, ses émissions ne représentent que moins de 2% du total mondial, et leur réduction n'aura qu'un effet marginal sur la planète.

Comme la Conférence de Paris l'a confirmé, une politique mondiale reste impérative. Le coût socio-économique du carbone est mondial, puisque le CO₂ émis ne s'arrête pas aux frontières. Cependant, les conséquences du réchauffement n'ont pas le même impact selon les pays ; elles sont moindres pour les pays tempérés que pour les pays chauds ; et les possibilités d'adaptation sont plus fortes pour les pays développés que pour les pays en voie de développement. Différencier le prix selon les pays aurait cependant de nombreux effets pervers [Réf. 6 et 7].

Pour optimiser l'effort au niveau mondial, il eût été pertinent d'allouer à chaque pays des droits d'émission négociables dont la quantité respecterait la trajectoire de réduction projetée (voir par exemple Jean Tirole [Réf. 7] et Réf. 8). L'équité commanderait sans doute de tendre vers une situation où le montant des émissions par habitant serait le même dans tous les pays, ce qui est très éloigné de la situation actuelle. Mais le système de Gouvernance mondiale permettant d'atteindre cet objectif nécessiterait de vaincre bien des égoïsmes.

Une alternative [Réf. 8] est la définition d'un prix universel du CO₂ compatible avec l'objectif de limitation à 2°C de l'augmentation de la température. Outre le prix, les Etats devront se mettre d'accord sur des mécanismes de gouvernance et de contrôle, et de redistribution interne et internationale (fond vert) : il reste du travail !

Références de l'avis

1 *Les technologies et le changement climatique : des solutions pour l'atténuation et l'adaptation – Académie des technologies – avril 2016*

2 *Rapport de la mission présidée par Émile Quinet - Evaluation socio-économique des investissements publics – Commissariat général à la stratégie et à la prospective – Septembre 2013.*

La méthodologie de prise en compte du risque dans la détermination du taux d'actualisation est elle-même fondée sur les travaux de l'économiste belge Ch. Gollier (*Le calcul du risque dans les investissements publics - Centre d'analyse stratégique - La Documentation française – 2011*).

3 *Rapport de la commission présidée par Alain Quinet - La valeur tutélaire du carbone - Centre d'Analyse Stratégique – Documentation française - 2009*

4 *McKinsey – Pathway to a low carbon economy – Version 2 of the global greenhouse gas abatement curve - September 2013*

5 *Stockholm Environment Institute - Use of McKinsey abatement cost curves for climate economics modeling - Frank Ackerman and Ramón Bueno - January 25, 2011*

6 *Le climat, à quel prix ? La négociation climatique – Chrisian de Perthuis – Raphael Trotignon – 2015 – Odile Jacob – 2015*

7 *Economie du bien commun – Jean Tirole – PUF - 2016*

8 *Politique climatique : une nouvelle architecture internationale - Jean Tirole - La Documentation française. Paris, 2009 - ISBN : 978-2-11-007872-8*

Quel prix de référence du CO₂

1. Introduction – Pourquoi définir un prix de référence du CO₂^a

Dans le cadre de l'accord de Paris (11 décembre 2015) qui a conclu la vingt et unième Conférence des Parties sur le climat (COP 21), les Parties se sont entendues sur un objectif global de maîtrise de l'augmentation de la température terrestre. Cependant les objectifs individuels que chaque pays s'est assigné pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre (Intended Nationally Determined Contributions - INDC) sont nettement insuffisants pour assurer le respect de l'objectif global ; et l'accord de la COP 21 ne traite pas des mécanismes qui encourageraient ou contraindraient à atteindre les INDC. On sait qu'il en existe essentiellement deux : la création d'un marché d'émissions de gaz à effet de serre, et la mise en œuvre d'une taxation de ces émissions. Ces mécanismes sont généralement complétés par des systèmes de subvention (à l'isolement des logements, à la production d'énergie « verte ») ou de réglementation (interdiction des centrales au charbon, etc.).

L'insuffisance ou l'inefficacité des marchés d'émissions, et des mécanismes de taxation, ont été étudiées par l'Académie des technologies dans l'annexe II à son rapport « Les technologies et le changement climatique » [Réf. 1]. Dans son avis rendu à la suite de ce rapport, l'Académie recommande que soit déterminé un prix à la tonne de CO₂ équivalent, et suggère que ce prix soit utilisé pour optimiser les investissements des acteurs publics ou privés sur des bases économiques compréhensibles par tous, ou déterminer rationnellement le niveau des aides publiques à la transition énergétique.

C'est à l'établissement d'un tel « prix de référence » du carbone qu'est consacrée la présente note.

L'établissement d'un prix du carbone a fait l'objet de très nombreux travaux ; les objectifs visés par l'établissement d'un tel prix sont généralement les mêmes que ceux proposés par l'Académie ; il s'y ajoute parfois la volonté d'utiliser ce prix pour comparer les différentes INDCs et les efforts sous-jacents de chaque pays [Réf. 2].

L'établissement d'un prix du carbone nécessite cependant de convenir d'une méthode (§ 2^{ème}), et d'analyser les résultats qui en résultent (§ 3^{ème}) avant de tirer quelques conclusions.

2. Comment définir le prix du carbone (ou du CO₂)

2.1. *Les principales définitions du prix du CO₂*

Le concept de prix de référence, apparemment très simple, peut cependant être abordé sous différents angles [CO₂ Price Report – Synapse – Printemps 2014 - Réf. 3].

- i. **Le prix socio-économique du carbone** est estimé de façon directe. C'est en réalité le coût des conséquences présentes et futures de l'émission d'une tonne additionnelle

^a IMPORTANT : dans cette note, on utilise indifféremment les expressions « émissions de carbone » et « émissions de CO₂ ». Il serait plus correct de parler systématiquement de « émissions de gaz à effet de serre converties en CO₂ équivalent ».

En revanche il est clairement précisé si les données quantitatives sont exprimées par tonne de carbone ou tonne de CO₂.

On rappelle que l'équivalence de nocivité du carbone et du CO₂ est dans le rapport des masses molaires soit : 1 eq C = 3,67 eq CO₂ 1 eq CO₂ = 0,272 eq C (soit 12/44 (C=12 CO₂ = 44))

de CO₂. Sa détermination nécessite de quantifier ces conséquences, ce qui est particulièrement difficile dans un avenir lointain et incertain. Ce coût socio-économique est le coût de l'externalité carbone, c'est-à-dire le coût des conséquences négatives résultant de l'émission de CO₂. Il dépend des mesures d'adaptation : si celles-ci sont largement mises en œuvre, le prix socio-économique baisse.

Le prix socio-économique du carbone est mondial : certes, certains pays peuvent bénéficier du réchauffement climatique, alors que d'autres en subissent les conséquences. Mais par convention, le prix socio-économique est sous-tendu par un principe de solidarité, et correspond à l'intégralité des dommages subis à l'échelle mondiale, net des éventuels bénéfices.

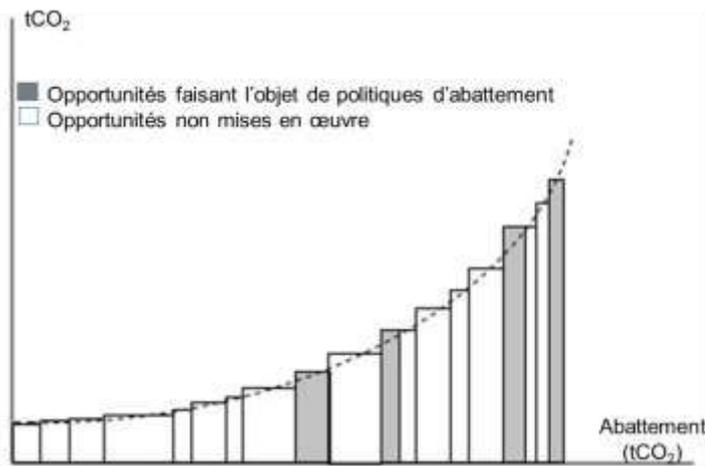
- ii. **Le prix d'abattement ou d'évitement** est le prix à payer pour réduire d'une quantité donnée les émissions de CO₂. Sa détermination suppose de se fixer préalablement un objectif de réduction d'émissions à un horizon déterminé. Par exemple la loi du 17 août 2015 sur la transition énergétique a assigné l'objectif français de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 (conformément à l'objectif collectivement accepté par les pays européens) et de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050 (Réf. 4 – il n'y a pas d'objectif européen pour 2050). Les objectifs français et les recommandations du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) sont cohérents comme le démontre l'annexe 1.

Le prix d'abattement est un prix national, ou commun à un ensemble de pays s'ils ont conjointement convenu d'un objectif de réduction d'émissions, et d'un partage de l'effort.

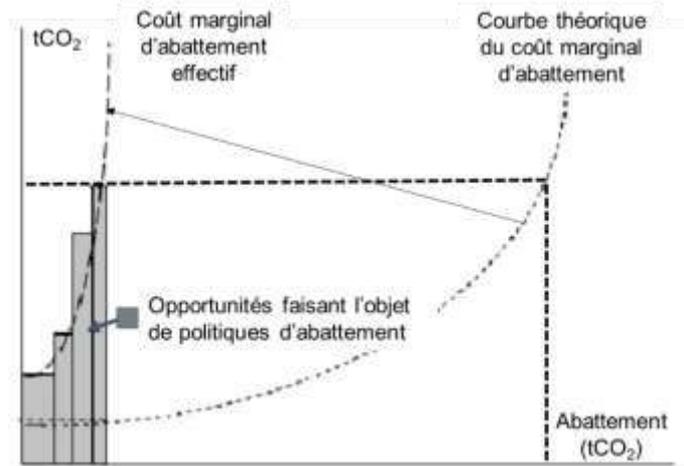
A partir de tels objectifs, les économistes, s'ils connaissent la structure d'émissions de CO₂ (dans le ou les pays considérés, par activité, etc.) et le coût des investissements de substitution, estiment la pénalité à appliquer au carbone pour que les décisions individuelles des opérateurs et investisseurs conduisent à les atteindre. Il est même possible de déterminer un prix d'abattement par technologie [McKinsey - Réf. 45 et 46].

Le prix marginal d'abattement n'est pas un prix représentatif des coûts d'externalité. Il est égal au prix du carbone sur un marché d'échanges de permis d'émission créé selon le principe « Cap and Trade » et fonctionnant parfaitement (création d'une rareté par une autorité centrale qui distribue une quantité limitée de permis d'émissions (Cap) correspondant à l'objectif de réduction visé, et échange de ces permis entre opérateurs (Trade)).

Si les politiques publiques ne privilégient pas les moyens de réduction d'émissions dans l'ordre de leurs mérites (coût le plus bas), le prix marginal d'abattement effectif et le coût total d'abattement peuvent être très supérieurs à ce que des politiques optimales permettraient d'atteindre [Graphiques repris de la Réf. 5].

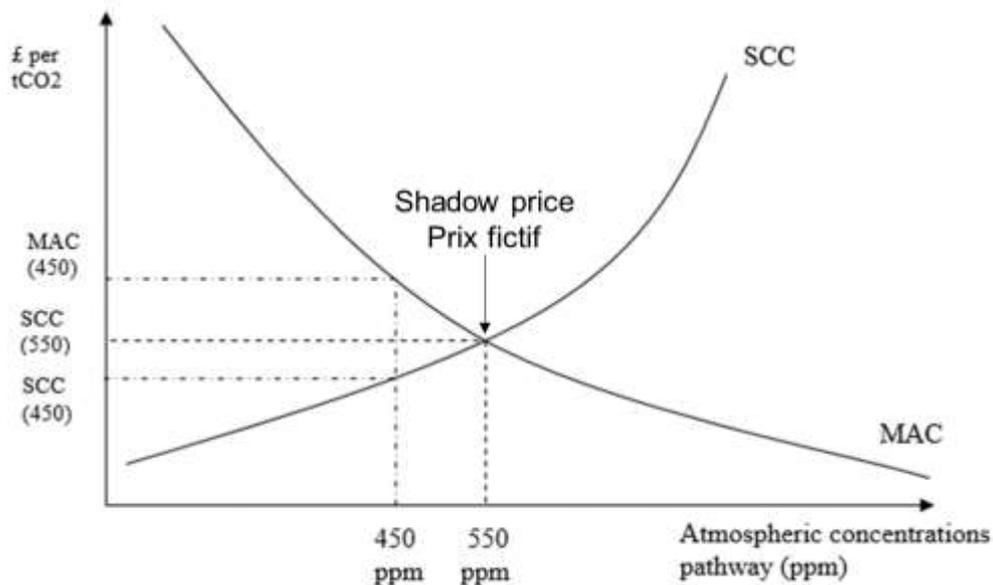


Coût d'abattement théoriquement accessible



Coût d'abattement théoriquement accessible

- iii. La forme (concavité – convexité) des courbes représentant le prix socio-économique et le coût d'abattement en fonction de la concentration atmosphérique de CO₂ est aisément justifiable : le coût socio-économique du carbone croît d'autant plus que la quantité de carbone dans l'atmosphère est élevée, et la nocivité de la tonne marginale émise est supérieure à celle de l'avant dernière tonne émise. Et le coût d'abattement est d'autant plus élevé que l'on vise une basse concentration.



Comparaison du coût socio-économique (SCC) et du coût marginal d'abattement [Réf. 6]

Le niveau optimal des émissions (pollution) est celui pour lequel le prix socio-économique et le prix d'abattement sont égaux. On appelle parfois ce prix d'optimisation le « **shadow price** » (**prix virtuel**, implicite ou fictif : la terminologie française n'est pas stabilisée). On trouvera une présentation détaillée du concept de shadow price dans une publication du DEFRA britannique (Department of environnement, forests and rural affairs – Réf. [6]). La difficulté à combiner un prix socio-économique qui est mondial avec un prix d'abattement qui est local y est traitée.

- iv. **Le prix effectif** (parfois appelé prix notionnel (« notional »), ou hypothétique ou volontaire) se déduit de l'analyse des réglementations, ou du comportement des

opérateurs publics et privés : c'est le prix qu'il faudrait donner au CO₂ pour que les décisions des opérateurs aient le même effet que la réglementation. Si cette réglementation établit une taxe, le prix effectif est le montant de la taxe. Si c'est une subvention, un calcul est à faire pour évaluer le coût de cette subvention au regard de l'économie de CO₂. Sauf à ce que toutes les décisions soient parfaitement optimales, il y a autant de prix effectifs que de décisions prises par les pouvoirs publics ou par les opérateurs privés.

2.2. Les difficultés de calcul et leurs conséquences

On ne saurait décider de retenir tel ou tel prix de carbone en fonction de la difficulté à l'établir, seule sa pertinence devant être prise en considération. Cependant à quoi servirait de retenir une définition de prix carbone difficilement calculable, et sujette à de lourdes incertitudes ?

Le prix effectif est le plus aisé à calculer, d'autant qu'il se définit pour une date donnée qui est unique ; si les actions publiques étaient optimales, il devrait être égal au prix socio-économique. Mais elles ne le sont pas : il convient donc de le calculer pour chaque réglementation ou mécanisme de subvention ; ce qui permettrait de comparer aisément leur efficacité. Cette évaluation peut cependant être complexe ; par exemple, les soutiens à l'énergie solaire ou éolienne (prix garantis et supérieurs aux prix de marché, et obligation d'achat quelles que soient la demande et les contraintes du réseau électrique) doivent être calculés en incluant le coût de l'intermittence, dont le calcul suppose différentes hypothèses délicates. Quant aux gains en carbone procurés par ces énergies, ils doivent être évalués en tenant compte de la production substituée : selon que ces énergies substituent de l'électricité de base ou de semi-base^a, le gain carbone - dans le système énergétique français dont l'électricité de base est très peu carbonée - est très différent.

Cependant le prix effectif du carbone n'est qu'un constat indirect du coût des politiques publiques ; il ne peut servir à les guider, sauf à servir de mesure de leurs incohérences d'un secteur à l'autre.

Le prix socio-économique prétend fournir directement la valeur du dommage carbone ; il est donc particulièrement pertinent. Il doit croître avec le temps puisque le dommage d'une tonne de CO₂ additionnelle est d'autant plus grand que le stock dans la haute atmosphère est déjà élevé.

Cependant, au-delà de cette tendance, la détermination du prix socio-économique est particulièrement difficile. Il convient d'abord de définir des coefficients d'équivalence pour chacun des gaz à effet de serre, alors que leurs intensités radiatives et leurs durées de vie sont extrêmement variables. Les coefficients d'équivalence ne devraient pas être indépendants du temps, car ces gaz ont des durées de vie dans l'atmosphère différentes.

^a La production de base ou « de ruban » correspond à l'électricité consommée toute l'année, en permanence et de manière régulière. Elle est assurée en France principalement par le nucléaire et par l'hydraulique « au fil de l'eau ». La production de l'énergie intermittente, qui est « fatale » rentre dans la base.

La production de semi-base correspond à l'électricité produite en complément de la production de base lorsque la consommation augmente mais de manière régulière et prévisible (la journée en hiver par exemple). Cette production est assurée par la production hydraulique « modulable » (barrage de retenue, stockage), et par les centrales thermiques à flamme.

L'établissement du prix socio-économique nécessite d'évaluer toutes les conséquences du dommage carbone (réduction de la croissance, mais éventuellement conséquences migratoires, et donc sociales pour les migrants, les régions d'émigration et les régions d'immigration). Ces évaluations sont évidemment très contestables, et seuls des travaux collectifs comme ceux présentés en annexe 2 peuvent avoir quelque crédit : elles sont plutôt le résultat d'une confrontation d'opinions d'expert que d'un calcul économique.

Les émissions se produisant pendant de très longues périodes de temps, il est nécessaire d'évaluer en termes monétaires les dommages qu'une tonne de carbone émise aujourd'hui provoquera dans de nombreuses années. C'est un problème d'actualisation ; mais il est compliqué par la durée, qui implique de prendre en compte les inégalités générationnelles. Classiquement en effet, on actualise des dépenses ou recettes futures à la date d'aujourd'hui par un taux, dans un contexte où la même personne doit comparer une dépense (ou recette) immédiate ou future. Cette personne choisit un taux d'actualisation qui reflète sa préférence pour le présent.

Dans les problématiques de changement climatique, une personne doit décider d'émettre du CO₂ aujourd'hui, ou d'investir pour ne pas l'émettre ; mais c'est une autre personne, d'une génération future, qui en subira le dommage ou en percevra le bénéfice. L'actualisation à un taux non nul considère implicitement dans cette situation que les générations futures valent moins que la nôtre, ce qui est discutable ; ou que les générations futures bénéficieront nécessairement du fait de la croissance d'un niveau de vie supérieur au nôtre, ce qui est incertain.

La solution de ce débat n'est pas purement économique ; elle est philosophique ou éthique. On s'entend généralement pour considérer qu'il ne faut pas considérer de « préférence pour le présent » (« pure time preference ») quand on actualise des dommages sur une très longue durée. Seul donc subsiste dans l'évaluation du taux d'actualisation un terme lié à la croissance anticipée de l'économie, à l'aversion pour l'inégalité et au taux marginal de préférence pour la consommation.

Cette problématique est développée en annexe 2. On en retiendra essentiellement qu'il convient de retenir un taux d'actualisation assez bas, et éventuellement décroissant au cours du temps. Mais à lui seul ce débat, pour lequel il n'y a pas de consensus d'expert, pèse très fortement sur l'estimation du prix socio-économique du carbone.

Le calcul du prix d'abattement pose des problèmes analogues à celui du prix effectif, mais avec des difficultés accrues puisqu'il faut établir une chronique de prix au cours du temps. Il convient en effet de considérer non seulement la situation à une date unique, mais le coût futur des technologies permettant la limitation des émissions. Les conséquences du progrès techniques doivent donc être anticipées et quantifiées. Or les incertitudes sur ces coûts futurs sont considérables. A titre d'exemple, le groupe de travail III du GIEC consacré à l'atténuation du changement climatique [Réf. 7] estime que le coût de la transition énergétique sur la période 2010-2100 augmentera de 138% si les technologies de séquestration du carbone ne sont pas disponibles dans des conditions raisonnables ; et de 64% si ce sont les bioénergies qui ne sont pas disponibles. C'est dire l'importance d'une bonne prise en compte du coût des technologies à venir.

Il serait nécessaire de réviser régulièrement le prix d'abattement en fonction d'une meilleure appréciation des perspectives technologiques ; et corrélativement, les objectifs d'émission devraient être revus à la hausse ou à la baisse selon que les coûts d'abattement, et donc le « prix virtuel » sont plus ou moins élevés. Si l'on pense sérieusement qu'il y aura

des progrès technologiques importants, le rythme de la transition énergétique devrait être plus faible dans l'attente de ces technologies.

Le prix virtuel (« shadow price »), point de rencontre du prix socio-économique et du prix d'abattement, est encore plus difficile à établir que chacun d'eux.

Avant de formuler une recommandation sur le type de prix à retenir, un examen de différentes études relatives à ces prix est susceptible de guider le choix.

3. Les principales études relatives au prix du CO₂

3.1. Propositions de coût socio-économique

Les études relatives au prix du CO₂ sont innombrables, comme le sont également les mémoires et thèses consacrées à ce sujet. Une présentation des principales études gouvernementales, ainsi que de quelques études récentes, est faite en annexe 3. La première évaluation faite à la demande d'un gouvernement l'a sans doute été par des économistes anglais pour le Gouvernement britannique [Réf. 8 - 2002]. Mais c'est l'étude conduite par Sir Nicholas Stern, également pour le Gouvernement britannique, qui a focalisé l'attention sur ce problème [Stern Review -Réf. 9], et engendré un grand nombre de commentaires, critiques et études additionnelles. En 2008, Richard S.J. Tol a effectué une méta-étude portant sur 211 études déjà réalisées ; avec d'autres auteurs, Richard Tol a proposé son propre coût socio-économique du carbone en 2009 [Réf. 10].

L'administration britannique (DECC - Department of Energy and Climate Change) recommande un coût socio-économique du carbone à utiliser dans les évaluations de projet d'investissements publics. Il croît très fortement avec le temps, ce qui est largement la conséquence du taux d'actualisation retenu.

Aux Etats-Unis, l'Environment Protection Agency (EPA) anime un travail collectif mené avec une dizaine d'autres agences fédérales, pour établir un coût socio-économique du carbone [Réf. 11].

Le tableau ci-après présente certains résultats de ces études pour des dates voisines. Compte tenu des grandes hétérogénéités dans les hypothèses de ces études, elles ne peuvent cependant être comparées directement, et nous avons conservés les résultats dans les monnaies et unités d'origine sans conversion (il n'est pas toujours clair des publications américaines si les prix sont donnés pour des tonnes métriques ou des « short tons » - écart 10%).

Etude	Taux d'actualisation	Année	Coût socio-économique du CO ₂
Clarkson et Deyes	3%	2000	19 £/tCO ₂ – augmentation de 0,3 £/tCO ₂ chaque année
Stern	1,4%	2007	30 \$/tCO ₂ si la trajectoire 550ppm CO ₂ eq est suivie, 85 \$/tCO ₂ si « business as usual »
DECC	3%	2015	5,94 £/tCO ₂
Meta-analyse Tol	3%	2008	5,5 \$/tCO ₂
Anthof et Tol	-	2009	12 \$/tCO ₂
EPA	3%	2010	31 \$/tCO ₂

De toutes ces données disparates, Richard Tol [Réf. 10 et 12] conclut au caractère excessif du prix estimé par Nicholas Stern lors de la Stern Review (30 \$/tCO₂). On pourrait en retenir la pertinence d'un coût socio-économique du CO₂ de 15 à 20 €/tCO₂.

En marge de la Conférence des Parties (COP 21) qui s'est tenue à Marrakech en novembre 2016, la Banque Mondiale à travers la Carbon Pricing Leadership Coalition a confié à Joseph Stiglitz et Nicholas Stern l'animation d'une commission d'experts de haut niveau chargée de définir un « corridor de prix » ; il est destiné à révéler « les avantages (environnementaux, de santé, etc.) que la planète peut retirer de la réduction de chaque tonne d'émission de gaz à effet de serre ». La ministre française de l'Environnement, en sa qualité de présidente de la COP 21 s'est associée à cette initiative. Les résultats sont attendus en avril 2017 lors des réunions de printemps du FMI et de la Banque mondiale. Dans le cours laps de temps laissés à ce groupe, on ne peut guère s'attendre à de nouveaux travaux, mais plutôt à une consolidation de consensus existants notamment sur la nécessité de prendre en compte un taux d'actualisation assez faible.

3.2. Propositions de coût d'abattement

Les tentatives d'évaluation du coût d'abattement sont encore bien plus nombreuses que celles consacrées au coût socio-économique ; et leur variabilité est également très grande. Ce qui n'est pas pour surprendre puisque le coût d'abattement dépend de la région considérée, de sa structure initiale d'émissions, et de l'objectif de réduction visé. Un certain nombre d'évaluations de coût d'abattement sont présentées en annexe 3.

Une synthèse n'en est pas évidente, du fait de leur disparité. On a souligné leur forte sensibilité à la disponibilité et au coût des technologies permettant de réduire les émissions, particulièrement les technologies de stockage du carbone, et les bioénergies. Parmi des résultats notables, on retiendra que :

1. Le GIEC (Rapport du Groupe III – [Réf. [13] - § 6.3.6.2] a proposé des fourchettes de coût d'abattement (on rappelle qu'il faut viser une concentration de 430 à 480 ppm, ou à la rigueur 480 à 530 ppm pour tenir l'objectif « 2°C de réchauffement » puis stabilisation en 2050). L'importance de la fourchette est justifiée par les incertitudes sur la disponibilité et le coût des technologies d'abattement, et particulièrement la séquestration du CO₂, et dans une moindre mesure les bioénergies.

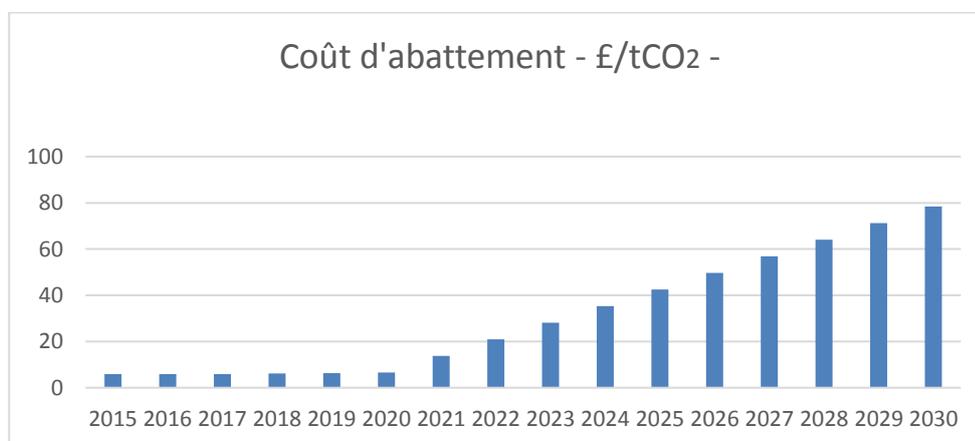
Concentration visée	Valeur basse	Valeur médiane	Valeur haute
430-480 CO ₂ eq	20 \$/tCO ₂ eq	37 \$/tCO ₂ eq	54 \$/tCO ₂ eq
480-530 CO ₂ eq	20 \$/tCO ₂ eq	30 \$/tCO ₂ eq	51 \$/tCO ₂ eq

Giec - Groupe III – 2014 – Coût moyen d'abattement (2015 – 2100 – Actualisation 5%)

- Une importante étude réalisée en 2006 sous la présidence d'Alain Quinet [Réf. 14] dans le cadre du Centre d'Analyse Stratégique (CAS) a proposé de retenir comme « valeur tutélaire » 100 €/tCO₂ en 2030 ; les auteurs en ont déduit une courbe annuelle d'évolution passant notamment par 32€/tCO₂ en 2010 et 56 €/tCO₂ en 2020. Ces valeurs élevées sont notamment la conséquence du taux d'actualisation retenu (en simplifiant, taux sans risque de 2,5% plus prime de risque de 2%) et de divers choix méthodologiques discutés en annexe 3 §1-i. Cependant les stratégies permettant les réductions d'émission de carbone ne sont pas explicitées (par exemple, sortie ou non du nucléaire), et les coûts des technologies d'abattement disponibles ne sont pas directement pris en compte pour calculer le coût marginal d'abattement.

En 2013, une commission présidée par Emile Quinet dans le cadre du Commissariat général à la stratégie et à la prospective a procédé à une révision des méthodes d'évaluation socio-économique des investissements publics [Réf. 15]. Elle a confirmé la trajectoire de prix de CO₂ proposée par la commission Alain Quinet, en tant que « valeur tutélaire » du CO₂, c'est-à-dire coût à retenir dans l'évaluation de la rentabilité des investissements publics, tout en indiquant que les résultats clefs (valeurs du CO₂ en 2010, en 2030, et trajectoire entre ces deux dates) résultent également de compromis au sein de la commission qui comportait divers participants non économistes issus de la « société civile » .

- La Stern Review, contrairement aux autres études, estime que le coût d'abattement sera décroissant avec le temps, du fait du progrès technique. Elle l'estime à environ 40 \$/tCO₂ en 2030.
- Le Ministère de l'environnement britannique [Réf. 16] demande à toutes les administrations de prendre en compte la courbe de « Shadow price » et donc de coût d'abattement ci-après ; la croissance est une conséquence du mécanisme d'actualisation retenu :



- L'Union européenne privilégie la mise en place d'un marché efficient des permis d'émissions (ETS). Elle a néanmoins fait réaliser en 2005 une étude pour harmoniser au niveau européen les méthodologies d'évaluation des projets d'infrastructures de

transport [Réf. 17] qui propose de retenir un prix d'environ 30 €/tCO₂ dans la décennie 2020-2030.

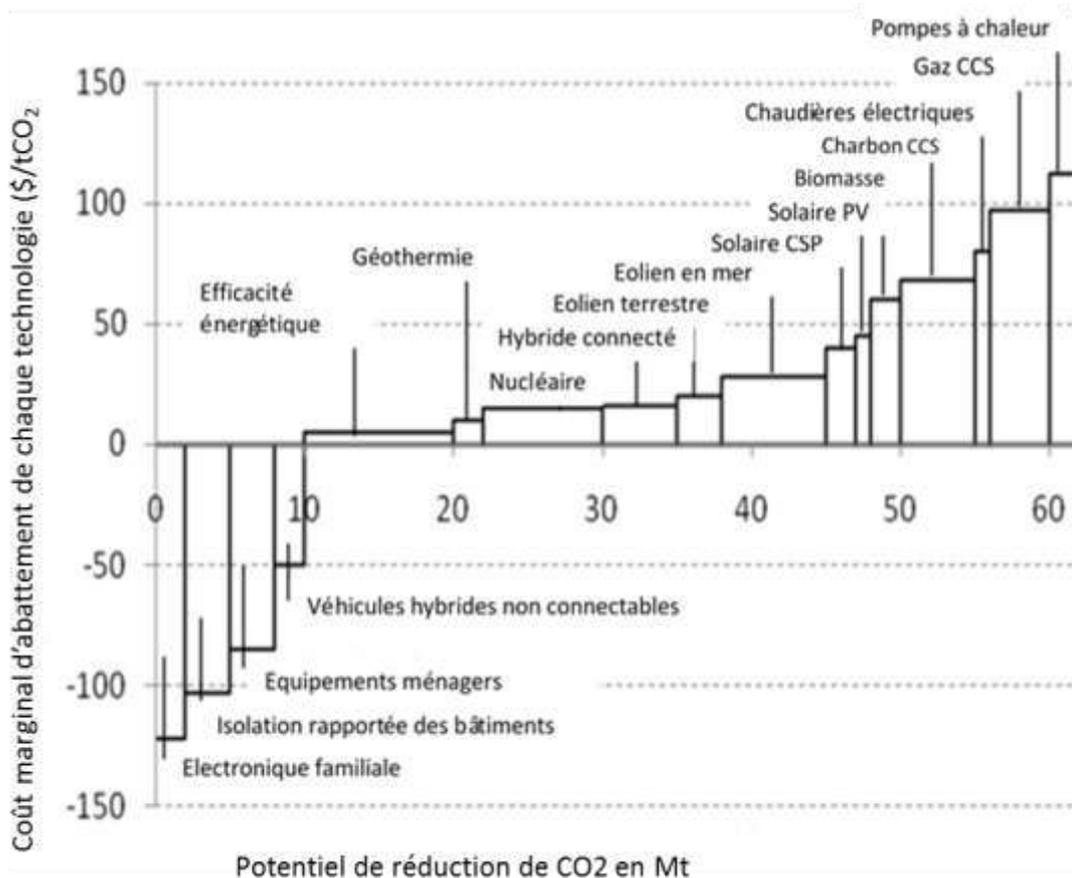
Si là encore, il serait erroné de tirer une moyenne de tous ces résultats, on peut noter qu'il se situent plutôt dans la fourchette proposée par l'Union européenne, voire au-delà. Ils apparaissent supérieurs au coût socio-économique, alors que la recherche de l'optimum impliquerait qu'ils soient égaux. L'imprécision de ces résultats ne permet cependant pas de conclure que les efforts de réduction des émissions de CO₂ seraient excessifs par rapport à leurs conséquences environnementales.

6. Coûts sectoriels d'abattement

On soulignera dans cette synthèse les études fondées sur la méthodologie développée par McKinsey. Cette méthodologie permet de classer les différentes technologies d'abattement disponibles en fonction de leur coût et de leur potentiel. Le graphique ci-après est fictif, et donné à titre d'illustration de la méthode. En abscisse est porté le potentiel d'abattement de chaque technologie, et en ordonnée le coût marginal d'abattement. Certaines technologies ont un coût négatif, puisque leur mise en œuvre permet de réduire le coût total actualisé (somme de l'investissement et des chroniques de dépenses futures). L'optimum économique devrait conduire à mettre en œuvre ces technologies dans l'ordre croissant des coûts, et jusqu'à ce que l'objectif d'abattement soit atteint.

McKinsey actualise annuellement de telles courbes pour les grandes régions du monde. Différents pays, dont la Suède (voir annexe 3) et la Grande-Bretagne utilisent cet outil pour vérifier la cohérence de leurs politiques énergétiques.

Il serait particulièrement utile que la France se dote d'un outil similaire.

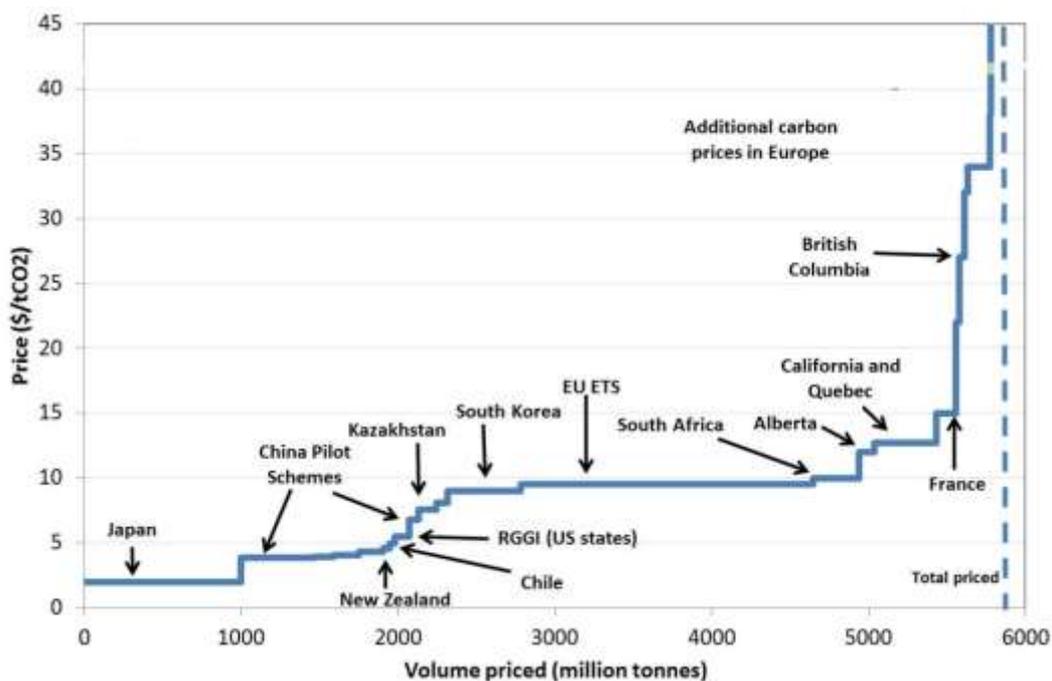


3.3. Estimations de prix effectifs

Observations des marchés de permis d'émission et de régimes de taxes

Il existe de nombreux marchés régionaux de permis d'émission, et de mécanismes de taxation ; l'Europe a mis en place un tel marché, mais il en existe aussi entre différents Etats américains et canadiens, et en Chine.

La Banque mondiale fait réaliser par la société Ecofys une synthèse [Réf. 34] des niveaux de prix et taxes observés .



Banque mondiale - Prix et taxes vs Quantités

Pour l'essentiel, ces prix et taxes sont inférieurs à 15 \$/tCO₂. Les valeurs au-delà sont commentées en annexe 3.

Observations des prix adoptés par certaines entreprises pour optimiser leurs investissements

De plus en plus de grandes entreprises adoptent un prix effectif pour tenir compte du carbone dans leurs décisions de gestion. Une synthèse de ces prix, souvent très disparates, est donnée en annexe 3. La dispersion est très large, mais les prix observés sont généralement inférieurs à 30 €/tCO₂.

Ces niveaux de prix, observés sur les marchés de permis d'émission ou adoptés par des entreprises sont confirmés par l'association Entreprises pour l'Environnement (EPE) dans un rapport de septembre 2016 [Réf. 18].

Les prix effectifs retenus par les gouvernements européens

L'OCDE a comparé en 2013 les taxes imposées par différents états membres dans le cadre de politiques fiscales et énergétiques. Cette étude a été actualisée en 2015 et étendue à quelques pays non membres de l'OCDE [Réf. 19]. La dispersion des résultats, qui sont présentés plus en détail en annexe 3, est grande.

Mais plus encore que par la dispersion, on est frappé par l'immense écart entre la taxation du chauffage, et celle des transports : c'est un facteur 10 environ. Il ne s'agit à l'évidence pas de taxes assises sur le CO₂ émis, mais de taxes tout court, imposées en fonction de l'histoire fiscale de chaque pays : la faible élasticité des transports par rapport au coût de l'énergie est propice à une forte taxation de ce secteur.

€/t CO ₂	Transport	Chauffage et Industrie	Energie
Médiane	150	5	40
Maximum	260	42	120

Montant moyen du niveau effectif de taxation du CO₂ dans les pays de l'OCDE selon les secteurs

Le soutien aux énergies renouvelables intermittentes et la situation de l'Allemagne

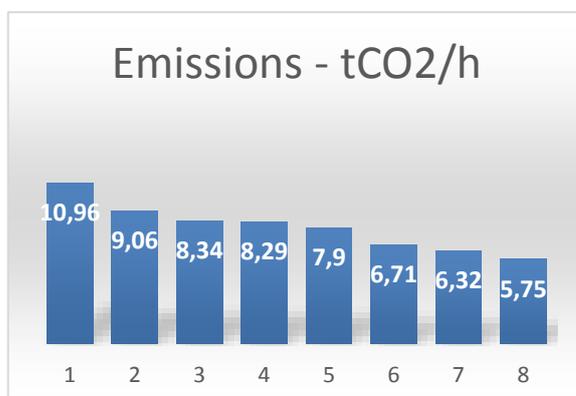
Tous les pays qui portent un fort soutien aux énergies renouvelables intermittentes accordent un prix effectif du carbone très élevé pour ces énergies.

Selon Marcantonini and Ellerman qui ont étudiés la situation allemande pour la Fondation Robert Schumann [Réf. 20], le coût d'abattement par l'énergie éolienne était en 2010 de 57 €/tCO₂, et celui de l'énergie solaire de 552 €/tCO₂. Depuis cette étude, le tarif garanti de l'électricité solaire allemande a baissé d'environ 60%, entraînant un très fort ralentissement du développement de l'énergie solaire (voir Annexe 3). Il reste cependant que le prix d'abattement de l'énergie solaire a été longtemps particulièrement élevé. Le prix d'abattement initialement très élevé de l'énergie solaire n'a été justifié que par la volonté de créer une filière nationale dédiée à cette technologie. Cet espoir a été déçu, et les faillites de sociétés spécialisées dans l'énergie solaire ont été nombreuses à partir de la révision à la baisse des tarifs d'achat en 2011 [Réf. 21].

4. Quelques observations sur la situation française

4.1. Les objectifs

Les émissions françaises de CO₂ ont été de 5,75 t/habitant en 2010 soit sensiblement moins que celles des hollandais (10,96 t/h), allemands (9,06 t/h), polonais (8,29 t/h), danois (8,34 t/h), britanniques (7,9 t/h), italiens (6,71 t/h) ou hollandais (6,32 t/h) pour ne citer que les pays les plus développés ou les plus peuplés.



Et cependant la France s'est donné les mêmes objectifs de réduction que les autres pays européens, en pourcentage du volume total, à l'horizon 2030 et 2050, alors que sa croissance démographique est plus forte. Dans le même temps, elle a décidé de renoncer à une partie de sa production d'énergie nucléaire, pourtant décarbonée. C'est dire que l'effort à laquelle la France s'est engagée est particulièrement

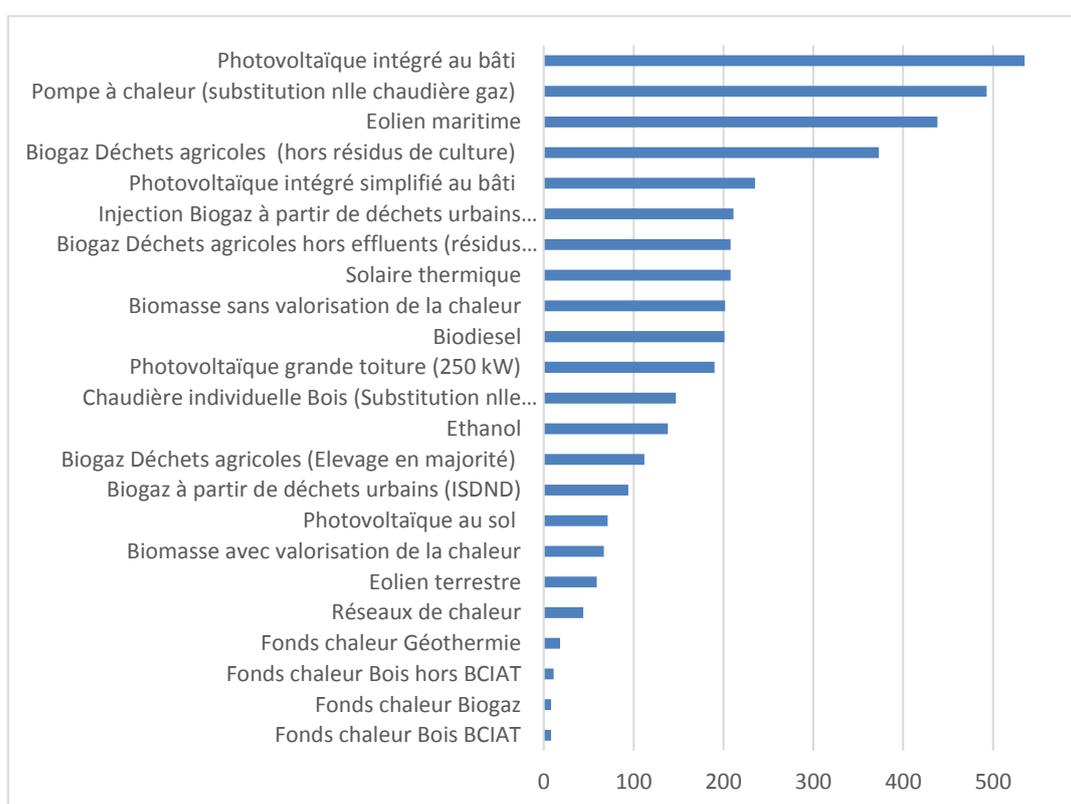
important, le plus élevé de l'Union européenne bien que sa contribution au bilan global soit faible. L'atteinte de cet objectif nécessite donc une parfaite détermination et rigueur, d'autant qu'il n'en est attendu aucun impact positif sur l'industrie à court ou moyen terme.

Pour parvenir à respecter son objectif ambitieux, la France s'est dotée de divers outils de subvention et de taxation.

4.2. Les subventions

Divers mécanismes de subventions sont en place, dont le niveau dépend du type d'énergie. La Direction Générale du Trésor [Réf. 22] a évalué le prix effectif du carbone pour différentes énergies renouvelables subventionnées en France^a (graphique ci-après).

Certaines de ces valeurs (solaire notamment – 550 €/tCO₂ évité) sont très proches des valeurs allemandes : il est dans les deux cas fait l'hypothèse que le solaire se substitue à la production d'une centrale à gaz. Compte tenu du mix énergétique français, il faut dans les périodes de fort ensoleillement et faible consommation réduire la production des installations nucléaires pour laisser la place à la production solaire ; dans ces périodes, le coût d'abattement de la production de CO₂ par l'énergie solaire est sensiblement plus élevé, puisqu'une énergie décarbonée (solaire) vient se substituer à une autre énergie décarbonée (nucléaire).



DG Trésor - Coûts pour la collectivité des émissions évitées par le déploiement des EnR (€/tCO₂)

Au vu du coût social et du coût d'abattement du carbone dont les ordres de grandeur ont été donnés plus haut, la répartition des subventions aux énergies décarbonées paraît assez discutable. Par exemple un effort considérable a été consenti au bénéfice de l'éolien en mer, dans l'espoir de créer une filière française ; cependant la cession des activités

^a Les prix pour le photovoltaïque (PV) au sol et pour l'éolien en mer résultent de l'observation des derniers appels d'offre de la CRE. Pour le PV en toiture et l'éolien terrestre, il est fondé sur les tarifs de rachat.

« éoliennes maritimes » d'Alstom à General Electric et d'Areva à Siemens (via la société espagnole Gamesa) a mis à mal cette ambition.

Il reste cependant qu'une telle étude devrait être prolongée, en incluant toutes les énergies ou économies d'énergie, subventionnées et en considérant non seulement les coûts par tonne, mais la quantité totale évitée. On peut notamment s'interroger sur l'intérêt de subventionner des énergies dont le coût d'abattement par t/CO₂ évité est sensiblement supérieur à 100 €, alors que le coût socio-économique et le coût d'abattement moyen sont très inférieurs.

4.3. La taxation

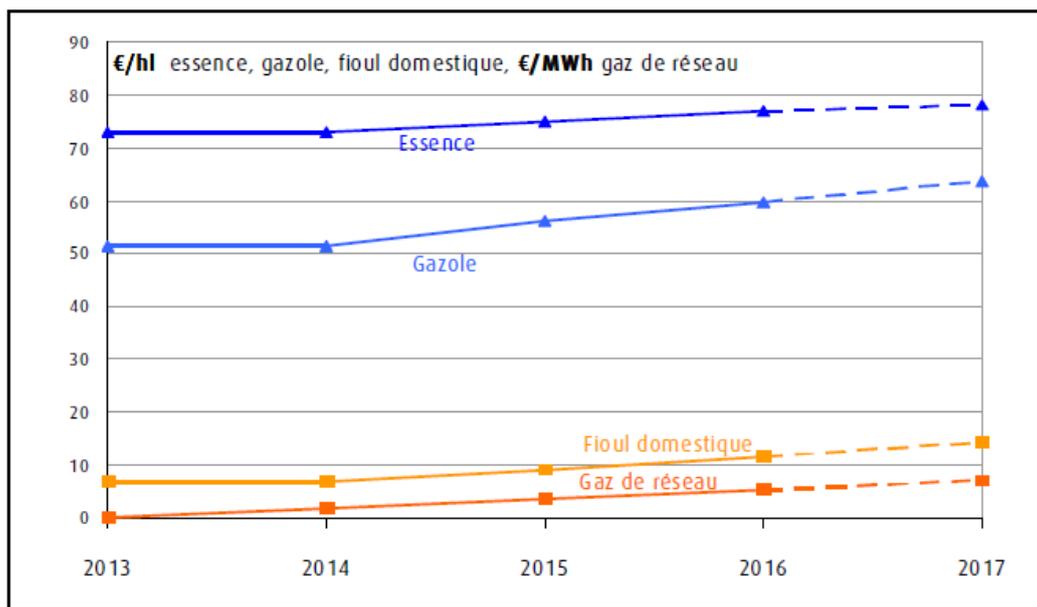
La France met progressivement depuis 2015 en place une taxe s'ajoutant à la Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques (TICPE). Elle doit s'appliquer à toutes les importations de produits carbonés.

Année	2017	2018	2019	2020	2030
€/tC	30,5 €	39,0 €	47,5 €	56,0 €	100,0 €
€/tCO ₂	8,3 €	10,6 €	13,0 €	15,3 €	27,3 €

Composante additionnelle à la TICPE

Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte - Article 1- VIII

Convertie en €/hl, l'effet de cette composante additionnelle ressort du graphique ci-après.



Montant de la TICPE et croissance à partir de 2015 du fait de la composante additionnelle Carbone

Le secteur des transports (poids lourds supérieurs à 7,5t) est jusqu'à présent largement exempté, puisqu'un remboursement de 43,19 €/hl est consenti (article 265 septième du Code des douanes).

L'impact à court terme et en pourcentage de la taxe additionnelle sera faible pour l'essence et le gazole, mais en revanche beaucoup plus important pour le Fioul domestique et le gaz, qui étaient en fait non taxés.

L'impact de cette taxe sur les ménages devrait être faible (au maximum 92 € par an pour des ménages ruraux, qui seraient les plus pénalisés), mais d'autant plus élevé en

pourcentage des revenus familiaux que ceux-ci seraient faibles, selon une étude du Commissariat Général au Développement Durable [Réf. 23]

Enfin, en décembre 2015, lors de la COP21, le Président de la République française a renouvelé son intention d'engager la France dans un processus visant à fixer un prix plancher au carbone puis d'élargir ce principe au marché européen de l'électricité. Un tel corridor avait été recommandé par Euro-Case (European Council of Academies of Applied Sciences, Technologies and Engineering) dans ses propositions de septembre [Réf. 24].

La ministre française de l'Environnement, Mme Royal, a confié à un Groupe de travail comprenant le président du groupe gazier Engie la mission de proposer un corridor de prix européen. Ce groupe a fait la proposition suivante [Réf. 25] :

« Fixer le prix plancher selon la trajectoire : entre 20 €/tCO₂ et 30 €/tCO₂ en 2020, avec une augmentation annuelle de 5 à 10% afin de dépasser 50 €/tCO₂ en 2030, afin d'accélérer la transition vers les solutions les moins carbonées, notamment dans le secteur de l'énergie. Fixer le prix plafond à 50 €/tCO₂ en 2020 avec une croissance annuelle similaire à celle du prix plancher ».

Cette proposition est essentiellement justifiée par le fait qu'elle serait très contraignante pour les centrales à charbon ou à lignite allemandes, obligeant leur remplacement par des turbines à gaz.

A la suite de ce rapport, les pouvoirs publics ont annoncé au printemps 2016 une taxation des émissions de CO₂ applicable aux seules centrales française à charbon, qui serait d'« environ 30 euros la tonne » ; mais cette disposition n'a pas été présentée au vote du Parlement, et ne devrait pas voir le jour, au moins en 2017.

5. Conclusions et recommandations

Alors qu'il est conceptuellement très simple de déterminer un prix du carbone, il n'est pas facile d'en faire un calcul pratique et incontestable. Les hypothèses à prendre en compte sont multiples, et certaines d'entre elles sont éthiques ou politiques (préférence pour le présent). La détermination d'un prix socio-économique (coût de l'externalité carbone) est particulièrement difficile ; on peut cependant retenir que les études étrangères font ressortir une large fourchette de prix socio-économiques allant de moins d'une dizaine d'euros à une trentaine d'euros par tonne de CO₂-équivalent.

5.1. La France

La France a retenu la trajectoire préconisée par le GIEC pour limiter la croissance moyenne des températures à 2°C (article L100-4 du code de l'énergie : réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050). Il conviendrait donc de calculer un coût d'abattement optimal faisant l'hypothèse que toutes les meilleures technologies seront mises en œuvre dans l'ordre de mérite. **Et le prix de référence français devrait être le prix moyen d'abattement ; il se situe sans doute autour, voire au-delà de 50 €/tCO₂-eq.** Avec 0,37 Gt d'émissions par an, et si les pouvoirs publics voulaient mettre en œuvre une taxe Carbone donnant ce signal Prix, elle serait donc de près de vingt milliards d'euros par an : une restructuration de la fiscalité serait sans doute nécessaire pour la rendre acceptable.

Dès lors que la trajectoire du GIEC est justifiée au regard des dommages potentiels du réchauffement climatique, le coût socio-économique du carbone n'est plus directement

utile pour déterminer la politique d'abattement. Il serait cependant nécessaire que la recherche économique française, absente de ce domaine, y consacre des moyens lui permettant d'appréhender pleinement les résultats des travaux étrangers qui sont en pleine évolution.

Même si la dispersion des coûts d'abattement, ainsi que des prix effectifs relevés dans les études étrangères, est forte, on peut constater qu'ils se situent plutôt en-dessous de 30 €/tCO₂. Les prix effectifs qui reflètent les taxes ou les marchés de permis d'émission à l'étranger sont également plutôt inférieurs à 30 €/tCO₂ malgré quelques exceptions liées à des politiques locales particulières (utilisation en Suède de la tourbe qualifiée de « bioénergie »). La France ayant adopté des objectifs de réduction particulièrement ambitieux au regard de son faible niveau actuel d'émissions (comparativement aux autres pays européens), elle a accepté de consentir un effort particulièrement élevé, d'où un prix marginal d'abattement, ou prix de référence élevé. En effet le prix marginal d'abattement est d'autant plus élevé que le niveau initial des émissions est faible.

Si la France persistait dans ses objectifs ambitieux, la conduisant à un prix d'abattement élevé, il serait bon que l'évaluation des choix publics structurants (choix du mix énergétique ; politiques orientant les modes de chauffage ; développement des infrastructures de transports (route, rail, voie d'eau) comprenne également une étude de sensibilité avec un prix plus faible (30 €/tCO₂) ; l'étude de sensibilité permettra de s'assurer de la robustesse des choix. La référence à un prix d'abattement devrait permettre de mieux optimiser les mécanismes d'aides et de subventions français, en donnant une meilleure place aux bioénergies, peu soutenues mais dont le coût marginal d'abattement est plus faible que celui du photovoltaïque et de l'éolien. Et pourtant le fort soutien à ces dernières énergies n'a pas permis de développer une industrie française dans ces secteurs.

Un prix de référence de la tonne de CO₂ ne suffira pas à rendre rationnelles les décisions des agents économiques. Certains choix ont en effet une élasticité très faible au regard du prix de l'énergie, et la taxation a un faible impact sur les consommations ; c'est en particulier le cas du transport routier. D'autres décisions économiquement pertinentes ne sont cependant pas prises faute de capacité à investir : les propriétaires privés ne peuvent aisément financer des travaux substantiels d'isolations de logement. D'autres décisions enfin ne sont pas prises en raison des imperfections de marché (mauvaise information, myopie, stratégie des grands acteurs). **La seule détermination d'un prix de référence, ou même d'une taxe ne suffira donc pas à assurer le respect de la trajectoire de réduction d'émissions visée. Il conviendra d'accompagner la fixation d'un prix de référence par d'autres incitations sous forme de réglementations ou de subventions (tarifs garantis, etc.). L'établissement des prix d'abattement par technologie devrait permettre de mieux optimiser ces incitations. Les économistes de l'environnement pourraient utilement classer par ordre de mérite les options envisageables, comme l'a fait la Suède [Réf. 26] en suivant la méthodologie introduite par McKinsey [Réf. 27].**

Ce sera toujours une combinaison de mécanismes qui permettront d'assurer la transition énergétique au rythme souhaité, en veillant à définir des politiques globales et proches des optima. Le prix de référence du carbone permettra de vérifier la cohérence de ces politiques. **Ce débat sur le prix du CO₂ et sur les objectifs climatiques est une opportunité pour introduire l'économie dans le débat climatique, avec un langage commun. Il devrait être porté par les femmes et les hommes politiques comme cela a été le cas au Royaume-Uni, d'autant que l'objectif ambitieux de réduction d'émissions de gaz à effet de serre risque de peser sur la compétitivité de l'économie française.**

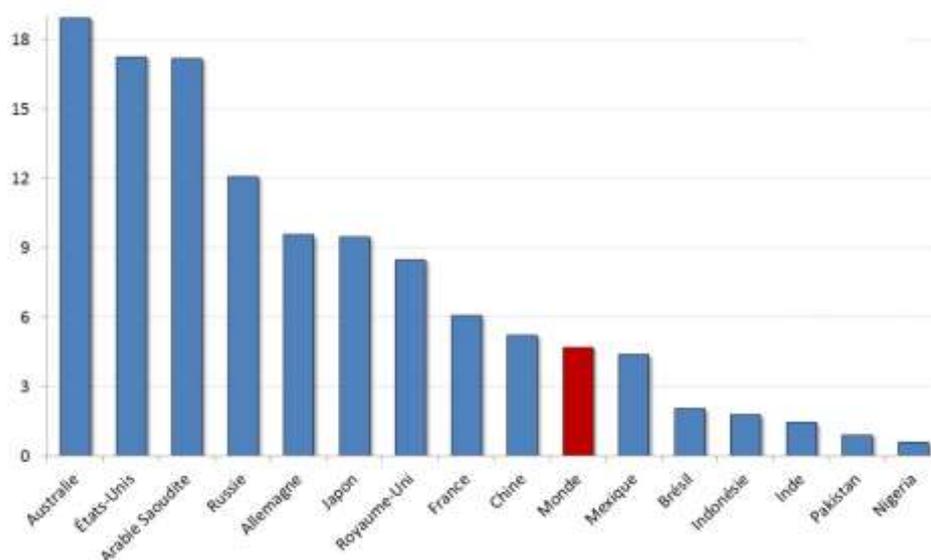
5.2. Le monde

La problématique du réchauffement climatique est mondiale ; quelque vertueuse que se propose d'être la France, ses émissions ne représentent que moins de 2% du total mondial, et leur réduction n'aura qu'un effet marginal sur la planète.

Comme la Conférence de Paris l'a confirmé, une politique mondiale reste impérative. Si le coût socio-économique du carbone est mondial, puisque le CO₂ émis ne s'arrête pas aux frontières, les conséquences du réchauffement n'ont pas le même impact selon les pays ; les conséquences sont moindres pour les pays tempérés que pour les pays chauds ; et les possibilités d'adaptation sont plus fortes pour les pays développés que pour les pays en voie de développement.

Des tentatives de « régionalisation » du coût socio-économique ont été entreprises [Réf. 10]. Les résultats en sont encore préliminaires, et ne font pas consensus ; les travaux en ce domaine doivent être encouragés et poursuivis.

Pour optimiser l'effort au niveau mondial, et comme le plaident de façon constante les économistes (voir par exemple Jean Tirole [Réf. 28]), il conviendrait d'allouer à chaque pays des droits d'émission négociables dont la quantité respecterait la trajectoire de réduction mondiale souhaitée. Alternativement, et devant la difficulté de faire fonctionner un marché mondial de permis d'émission, il peut être envisagé l'établissement d'une taxe unique (Jean Tirole [Réf. 13]). En toute hypothèse, le prix du CO₂ devrait être unique. S'il était plus élevé dans les pays les plus développés, ceux-ci seraient incités à délocaliser leurs activités vers les pays moins développés, à prix de CO₂ plus faible ; ce qui irait à l'encontre du but poursuivi. Les inégalités résultant d'un prix mondial et unique du CO₂ devraient être compensées au travers d'un « fond vert » (Jean Tirole [Réf.12]). L'équité commanderait en outre de tendre vers une situation où le montant des émissions par habitant serait le même dans tous les pays, ce qui est très éloigné de la situation actuelle. Mais le système de Gouvernance mondiale permettant d'atteindre de tels objectifs devra vaincre bien des égoïsmes.



Emissions de CO₂ – milliers de tonne par habitant - 2008 - Source CDIAC

Annexe 1 - Comparaison entre les objectifs français de réduction de gaz à effet de serre et les recommandations du GIEC

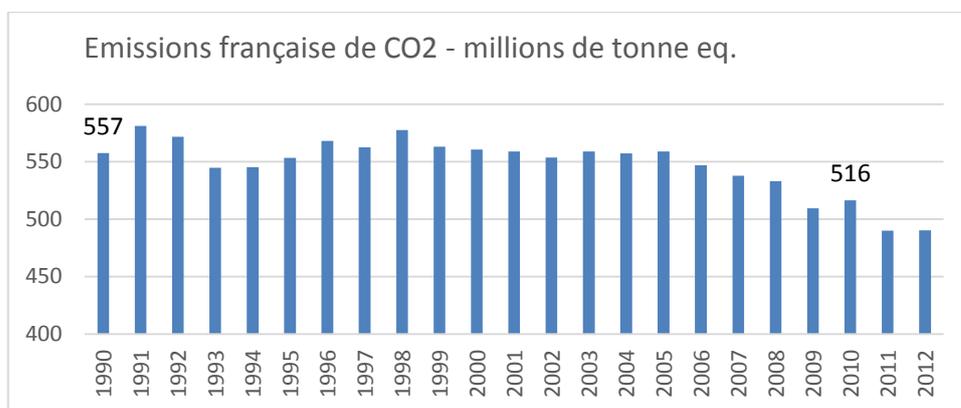
On rappelle les objectifs français définis par la loi sur la transition énergétique d'août 2015 et codifiés à l'article L100-4 du code de l'énergie :

1° Réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050. (...).

2° à 4° (Pour mémoire).

5° Réduire la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % à l'horizon 2025.

Les émissions françaises de CO₂ ont irrégulièrement décru depuis 1990 comme le montre le graphique ci-après. Elles étaient de 516,5 Mt en 2010 contre 557,3 Mt en 1990, soit une baisse de 7,32%.



Données publiées par Ministère de l'environnement – Commissariat général au développement durable – Observations et statistiques

Le rapport du Groupe III du GIEC [Réf. 7] suggère que la concentration atmosphérique de CO₂ devrait être limitée à 450 ppm en 2100 pour que l'objectif de limitation de la température de la basse atmosphère reste (vraisemblablement) inférieur à +2°C^a. Selon ce rapport, il conviendrait que les émissions de CO₂ soient réduites dans l'intervalle 40% - 70% en 2050 par rapport à leur niveau de 2010 ; et que les émissions de CO₂ soient à peu près nulles à partir de 2050.

On peut légitimement être surpris de la précision de l'objectif au-delà de 2050 (annulation des émissions), alors même que la fourchette de l'objectif 2050 va du simple ou double. L'ampleur de cette fourchette est liée à l'incertitude sur le « Carbon Dioxide Removal (CDR) », c'est à dire sur les perspectives de séquestration du carbone (CCS – Carbon capture and storage) à des coûts raisonnables. Retenons cependant un objectif de réduction, hors séquestration, de 70% en 2050 par rapport à 2010.

La combinaison d'une réduction de 7,32% de 1990 à 2010 et de 70% de 2010 à 2050 est cohérente avec l'objectif d'une réduction par un facteur quatre de 1990 à 2050.

^a Ce vocabulaire abscons est à peu près le vocabulaire du GIEC. On l'a un peu simplifié pour la compréhension.

Annexe 2 - Une difficulté méthodologique majeure : l'actualisation

L'établissement du prix d'abattement et du prix socio-économique du carbone nécessite de comparer des chroniques de dépenses et recettes au cours du temps : c'est un problème classique d'actualisation, qui ne fait cependant pas l'objet d'un consensus. L'annexe 8 de l'« Étude économique prospective de la filière électrique nucléaire » produite en 2000 par MM. Charpin, Dessus et Pelat à la demande du Premier ministre [Réf. 29] comporte un important développement sur le choix du taux d'actualisation applicable à des décisions dont les conséquences sont de très long terme. Les considérations théoriques développées dans cette annexe sont toujours actuelles.

En 2004, un groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue dans le cadre du Commissariat général au Plan [Réf. 30], en ligne avec les considérations précitées, a recommandé l'adoption d'un taux unique applicable à toutes les décisions publiques en indiquant que :

« - Le taux d'actualisation est un taux d'actualisation réel et doit donc être utilisé dans des calculs effectués en monnaie constante (hors inflation)

- Le taux d'actualisation de base est ramené de 8 % à 4 %

*- Le taux d'actualisation est **décroissant avec le temps pour les évaluations qui portent sur le très long terme**. La décroissance du taux est effective à partir de 30 ans. La décroissance du taux d'actualisation est continue pour éviter les effets de seuil ; il s'appuie sur la formule proposée dans le rapport*

- La décroissance du taux d'actualisation est limitée par un plancher fixé à 2 %

- Ce taux doit faire l'objet de révisions périodiques tous les 5 ans (...) »

En outre ce taux est un taux sans risque, alors que le taux précédent de 8% comportait implicitement une prime de risque, la même pour tous les actifs. Il convenait alors de définir la méthodologie de prise en compte du risque. Ce fut fait à partir de travaux développés par l'économiste belge Christian Gollier, jusqu'à récemment co-directeur avec Jean Tirole puis directeur de la « Toulouse School of Economics », et auteur de nombreux travaux sur le taux d'actualisation pour un horizon lointain et une croissance incertaine ; il a été l'un des auteurs principaux des 4^{ème} et 5^{ème} rapports du GIEC. Ses principaux travaux ont été synthétisés dans son ouvrage « Pricing the Planet's Future » [Réf. 31] ainsi que dans son rapport établi pour le Centre d'analyse stratégique [Réf. 32]. Il conclut à la nécessité de réduire les taux d'actualisation sans risque généralement adoptés, et de prendre en compte le risque systémique propre à chaque actif selon une formule analogue à celle utilisée par les marchés financiers, $r = r_f + \beta \phi$ où r_f et r sont le taux d'actualisation sans risque et avec risque, et le terme $+ \beta \phi$ représente la prime de risque du projet. ϕ est une prime de risque commune à l'ensemble des projets envisageables ; et β est un paramètre spécifique au projet et mesure le lien entre les avantages du projet et l'activité économique.

En 2013 le rapport sur l'évaluations socio-économique des investissements publics [Réf. 15] reprend cette problématique, abaisse le taux sans risque de 4% à 2,5%, propose de retenir la valeur de 2% pour ϕ , et recommande des β pour un certain nombre de types d'actifs publics. Pour l'évaluation des réductions de gaz à effet de serre espérées d'un projet d'investissement, cette méthode conduit à recommander un taux d'actualisation de 4,5%, somme d'un taux sans risque de 2,5% et du produit de la prime de risque ϕ de 2% par le β correspondant évalué à 1. Ce rapport souligne le caractère novateur de cette procédure et la nécessité d'en revoir les modalités au bout de quelques années.

La Banque mondiale et le Fonds Monétaire International adoptent un taux de 5% [Réf. 33], mais ce taux assez élevé vise sans doute à réduire le nombre de projets « rentables » et donc éligibles aux financements Banque mondiale.

D'autres taux d'actualisation sont utilisés dans les nombreuses études publiées. Il est vain d'espérer une unification vers un taux unique, mais on peut souhaiter que toute référence à un prix d'abattement mentionne l'hypothèse faite sur le taux d'actualisation.

Le choix du taux d'actualisation pour le calcul du prix socio-économique du CO₂ pose un problème éthique particulièrement difficile. Si l'on considère les générations actuelles et futures comme équivalentes, il n'y a pas lieu de considérer que les dommages futurs, estimés à la date d'aujourd'hui, aient une valeur moindre que leur valeur nominale, au seul motif qu'ils sont futurs. Il ne devrait donc pas y avoir d'actualisation ou tout au moins pas de terme de préférence pour le présent dans le taux d'actualisation. C'est la position prise par la commission Stern^a qui retient un « pure rate of time preference » nul dans son volumineux rapport préparé pour le gouvernement britannique en 2006 [Réf. 9]. Le rapport Stern prend en outre en compte une actualisation fondée sur les perspectives de consommation future, conduisant à un taux d'actualisation complet de 1,4%.

Le rapport 2014 du Groupe III du GIEC sur les politiques d'atténuation [Réf. 34] conclut après avoir comparé différentes études publiées qu'« *il y a un large consensus pour considérer que le taux de préférence pour le présent à prendre en compte est nul ou proche de zéro* ». Il convient d'y ajouter un « social discount rate » comme l'avait fait le Pr. Stern, tenant compte du fait que les générations futures, malgré le changement climatique, devraient bénéficier d'un niveau de richesse plus élevé que le nôtre, (mais plus faible que s'il n'y avait pas eu de changement). En résumé, le GIEC compare les études ci-après, sans en tirer de conclusions définitives.

Auteur	Taux de pure préférence pour le présent	Aversion pour les inégalités	Taux de croissance anticipée	Taux d'actualisation implicite
Cline (1992)	0,0%	1,50%	1%	1,5%
IPCC (1996)	0,0%	1,5-2 %	1,6% / 8%	2,4% / 16 %
Arrow (1999)	0,0%	2%	2%	4,0%
UK - Green book (Treasury, 2003)	1,5%	1%	2%	3,5%
US UMB (2003)				3,0% - 7%
France - Lebègue report (2005)	0,0%	2%	2%	4%
Stern (2007)	0,1%	1%	1%	1,4%
Arrow (2007)		2 à 3 %	2 à 3%	
Dasgupta (2007)	0,1%	2 à 4%	2 à 4%	
Weitzman (2007)	2,0%	2%	2%	6,0%
Nordhaus (2008)	1,0%	2%	2%	5,0%

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III

L'étude faite par l'Environmental Protection Agency américaine [Réf. 35] prend en compte différents taux d'actualisation, de 2,5% à 5%.

^a Sir Nicholas Stern, Professeur à la London School of Economics

La difficulté s'accroît si l'on veut comparer le prix socio-économique du carbone au prix d'abattement : ce dernier doit prendre en compte un taux d'actualisation représentant la préférence pour le présent, contrairement au prix socio-économique qui doit considérer que toutes les générations sont égales. Or il serait absurde de comparer des prix qui ne seraient pas calculés avec le même taux d'actualisation, même s'il n'a pas la même signification dans les deux calculs.

A l'aune de ce débat économique et philosophique qui entoure le choix de ce taux d'actualisation, on doit conclure, comme David Anthof et al. [Réf. 36] que le choix du taux d'actualisation est en réalité politique. Il paraît souhaitable de considérer que la valeur de 2,5% du taux sans risque est à l'intérieur de la fourchette des valeurs actuelles de la littérature et même peut-être un peu forte d'autant que les perspectives de croissance française à long terme sont plutôt révisées à la baisse^a, mais qu'il convient: 1) de revoir dans un avenir proche l'ensemble du système d'actualisation et notamment le jeu de la prime de risque (suivant d'ailleurs en cela les recommandations du rapport Quinet). La commission Stern-Stiglitz mise en place par la Banque mondiale en marge de la Conférence de Marakkech (COP 22) devrait contribuer à renforcer le consensus sur les méthodes et valeurs à retenir ; ses résultats sont attendus en avril 2017 ; 2) de revoir alors dans ces conditions la valeur du prix socio-économique du carbone, 3) de la soumettre à un large débat public.

a Il y a une corrélation entre taux de croissance de l'économie et taux d'actualisation.

Annexe 3 – Différentes évaluations du prix du carbone

1. Evaluations du coût socio-économique

Le coût socio-économique vise à appréhender de façon directe les conséquences dommageables des émissions de CO₂ ; c'est donc le plus incertain compte tenu de la quantité d'hypothèses à faire. Différentes études importantes ont cependant été effectuées pour approcher sa valeur.

i. Etudes britanniques

C'est la Grande Bretagne qui a été précurseur pour ce type d'études. Le DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) a commandité en 2002 une étude réalisée par Richard Clarkson and Kathryn Deyes [Réf. 37]. Elle a été soumise à enquête publique. Elle rappelle différentes études universitaires antérieures et conclut « qu'une approche pragmatique serait d'utiliser une valeur de £70/tC (soit £19/tCO₂) pour évaluer les dommages marginaux, mais aussi de considérer une fourchette de £140/tC (i.e. 2x£70/tC) à £35/tC (i.e. 0.5x£70/tC) (également en valeur 2000) ».

Cette étude a été actualisée en 2007 et propose de retenir une des évaluations de la Stern Review de 2006 : stabilisation des émissions à 550 ppm de CO₂ équivalent, impliquant un prix de £25/tCO₂eq (valeur 2007).

La Stern Review publiée en 2006 et déjà évoquée [Réf. 9] constitue une étude de très grande ampleur. Elle estime le prix socio-économique en 2006 à environ \$30/tCO₂ si une trajectoire menant à des concentrations de 550 ppm CO₂eq est suivie, et de \$85/tCO₂ si rien n'est fait (Business as Usual - BAU). Dans cette hypothèse, le prix socio-économique augmente puisque les dommages futurs augmentent. Elle conclut que le prix socio-économique est nettement supérieur au prix d'abattement, et donc que les politiques de réduction des émissions sont rentables.

ii. Etude américaine

L'Administration américaine a souhaité doter les agences fédérales d'un outil unique leur permettant de faire des études coût-avantage prenant en compte le coût socio-économique du carbone [Réf. 35]. Cette étude a été réalisée collectivement par onze agences fédérales et ses résultats sont dorénavant régulièrement pris en compte dans les évaluations de projets. Une révision conduisant à environ 6% de baisse a été effectuée en 2015 [Réf. 24]. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-après :

Taux d'actualisation	5% Average	3% Average	2,5% Average	3% 95ème centile
2015	\$12,0	\$38,0	\$58,0	\$109,0
2020	\$12,0	\$43,0	\$65,0	\$129,0
2025	\$14,0	\$48,0	\$70,0	\$144,0
2030	\$16,0	\$52,0	\$76,0	\$159,0
2035	\$19,0	\$57,0	\$81,0	\$176,0
2040	\$21,0	\$62,0	\$87,0	\$192,0
2045	\$24,0	\$66,0	\$92,0	\$206,0
2050	\$27,0	\$71,0	\$98,0	\$221,0

Valeurs en dollar courant de chaque année

Environmental Protection Agency - US EPA - actualisé 2015

Le Département de l'Énergie en 2015 a effectué le recensement de nombreuses études académiques consacrées au prix socio-économique du carbone ; ces études sont consultables à <http://www.economics-ejournal.org/special-areas/special-issues/the-social-cost-of-carbon>^a.

Méta-analyse ^b

Devant le nombre et la dispersion des travaux académiques sur le prix du carbone, une méta-analyse a été faite et est tenue à jour par un des spécialistes mondiaux de ces évaluations économiques, Richard S.J. Tol, portant sur 211 études [Réf. 38].

L'auteur conclut que l'estimation des dommages de la Stern Review est fortement surestimée ; avec un taux d'actualisation de 3%, il relève que la médiane des études examinées établit le prix du carbone à 5,5 \$/tCO₂, et que la probabilité que le coût social du carbone soit supérieur à 21 \$ est de 1%.

2. Evaluations directes du prix d'abattement

i. Etudes françaises

Commissariat au Plan - Etude Boiteux

Le Commissariat au Plan a demandé en 2001 une première étude [Réf. 39] à un Groupe de travail présidé par Marcel Boiteux (Président honoraire d'Electricité de France).

Cette étude focalisée sur le secteur des transports vise la réalisation des objectifs d'émission du protocole de Kyoto (les objectifs actuels sont plus ambitieux). Elle recommande de retenir un prix d'abattement de 100 €/tC (27 €/tCO₂ en euros 2000, soit 32 € t/CO₂ 2010) pour la période qui va de 2000 à 2010 puis une croissance de 3% par an au-delà.

Centre d'analyse stratégique – Evaluation d'un prix « tutélaire » (Etudes Quinet)

Le Centre d'Analyse Stratégique qui a pris le relais du Commissariat au Plan a chargé une commission présidée par Alain Quinet [Réf. 11] d'établir une « valeur tutélaire du carbone ». La synthèse très résumée des résultats de ces travaux fait l'objet du graphique ci-après^c :

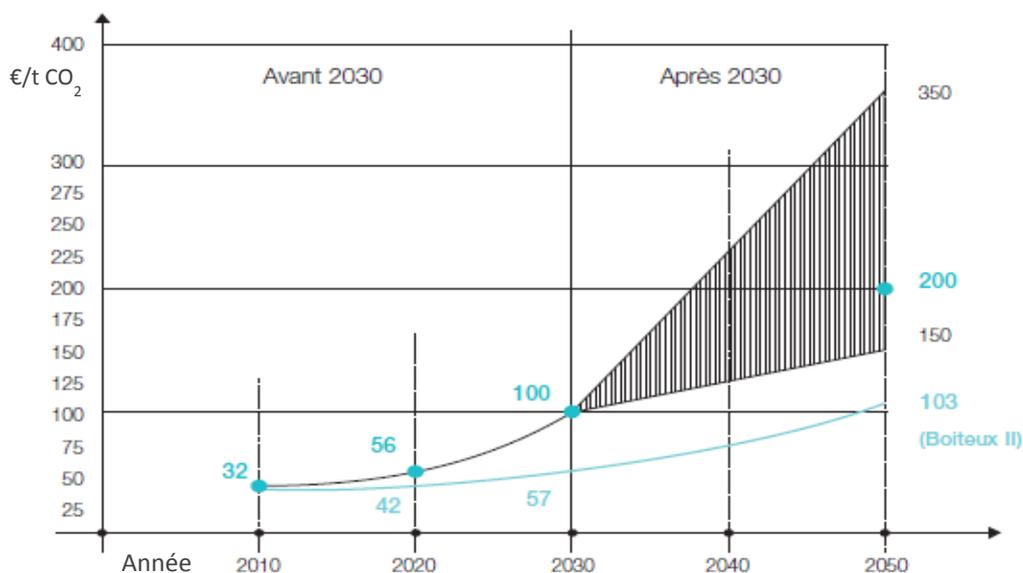
Les travaux de la commission adoptent l'objectif de 450 ppm de CO₂ équivalent en 2030, en phase avec les recommandations du GIEC et de l'Union européenne. Au-delà de 2030, la commission fait croître le prix du carbone au taux de 4% égal au taux d'actualisation public du rapport Lebègue (la Commission Quinet n'applique cependant pas la recommandation Lebègue de faire décroître le taux d'actualisation lorsqu'on actualise sur une longue période, ce qui est le cas en matière de changement climatique).

L'augmentation du prix du carbone au cours du temps résulte d'un choix méthodologique ; le rapport considère en effet que le stock de carbone que l'humanité est autorisée à transférer dans l'atmosphère comme une ressource rare, dont le prix doit nécessairement augmenter lorsque le stock diminue (règle de Hotelling). Cette approche ne prend pas en compte le bénéfice d'un éventuel progrès technique dans les technologies d'abattement.

^a URL vérifiée en février 2016

^b Une méta-analyse est une démarche statistique combinant les résultats d'une série d'études supposées indépendantes sur un problème donné

^c La figure reprend également les conclusions du rapport Boiteux, après conversion en €/tCO₂.



Chronique de prix d'abattement proposée par la commission Quinet

En 2013, une commission présidée par Emile Quinet dans le cadre du Commissariat général à la stratégie et à la prospective a procédé à une révision en profondeur des méthodes d'évaluation socio-économique des investissements publics [Réf. 13].

Elle a résumé dans les termes ci-après la méthodologie de la commission Alain Quinet :

- La valeur du CO₂ en 2030 (100 euros de 2010), valeur au caractère symbolique, ne provient pas de tel ou tel modèle jugé meilleur qu'un autre ; mais elle est apparue comme une valeur moyenne raisonnable aux différents experts dans une perspective volontariste
- La valeur du CO₂ en 2010 et sa trajectoire de 2010 à 2030 résultent de négociations au sein de la commission. Celle-ci a retenu pour 2010 une valeur proposée en 2001 par une commission présidée par Marcel Boiteux [Réf.39], pour éviter toute discontinuité, et a défini une trajectoire 2010-2030 s'écartant de toute référence théorique

Ce souci de la synthèse est bien compréhensible compte tenu de la composition de la commission, qui ne comportait pas que des économistes mais au contraire des représentants de divers organisations environnementales contestant le principe même de la rationalité économique. Et ces conclusions sont acceptables compte tenu de leur finalité (évaluation des investissements publics, et notamment des infrastructures de transport) ; d'autant que le prix du CO₂ pèse assez peu dans l'appréciation de ces projets, par rapport à d'autres facteurs (gain de temps, « prix » de la vie humaine, bruit, etc...). Les études économiques concernant l'évaluation du contournement autoroutier de la ville d'Arles par exemple permettent d'apprécier l'impact de la prise en compte des émissions de CO₂ ; il ne représente que 5% du bénéfice de l'investissement si l'on considère la trajectoire haute de la commission Alain Quinet, et 3,2% pour la trajectoire basse [Réf.40].

Si ces travaux du Commissariat général à la stratégie devaient être revisités, il conviendrait certainement de discuter à nouveau les choix du taux d'actualisation en intégrant notamment les conclusions à venir de la commission Stern-Stiglitz dont les conclusions sont attendues en avril 2017 ; en outre il serait utile de prendre plus explicitement en compte les stratégies d'abattement disponibles et leurs coûts respectifs.

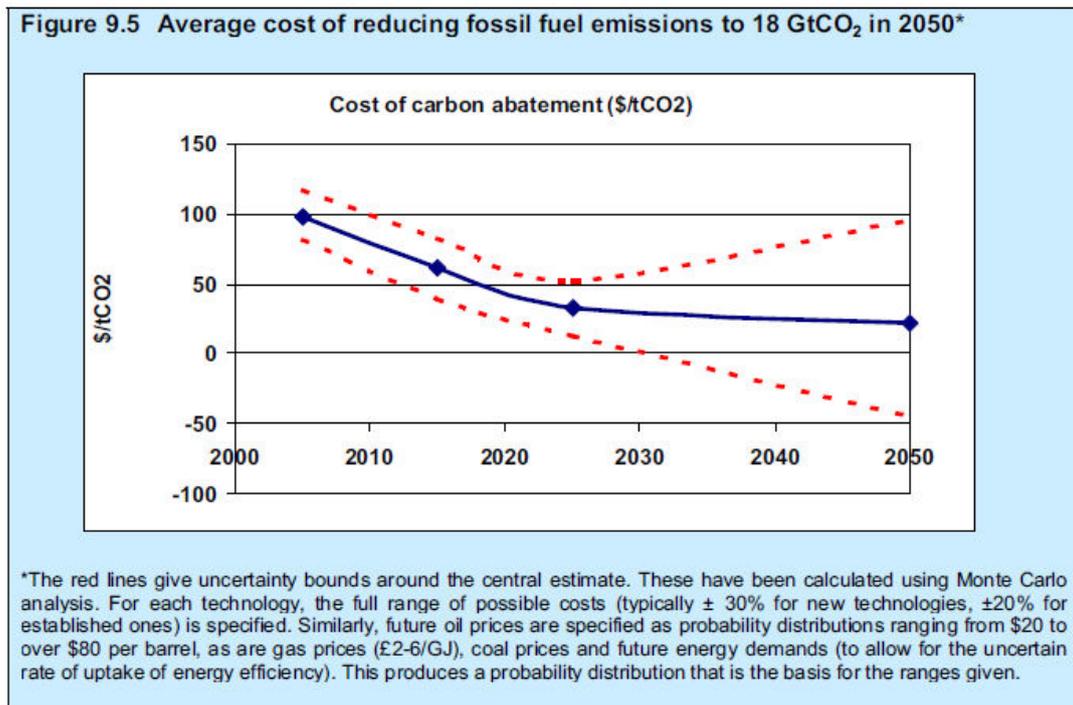
Etude du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Ce ministère a publié en 2014 une « note technique relative à l'évaluation des projets de transport ». Elle est accompagnée d'une Instruction du Gouvernement du 16 juin 2014 relative à l'évaluation des projets de transport, non publiée. Les valeurs à retenir pour le prix du CO₂ sont conformes aux recommandations de la commission Emile Quinet.

ii. Etudes non françaises

Stern review

La Stern review propose un prix de la tonne de CO₂, récapitulé dans le graphique ci-après.

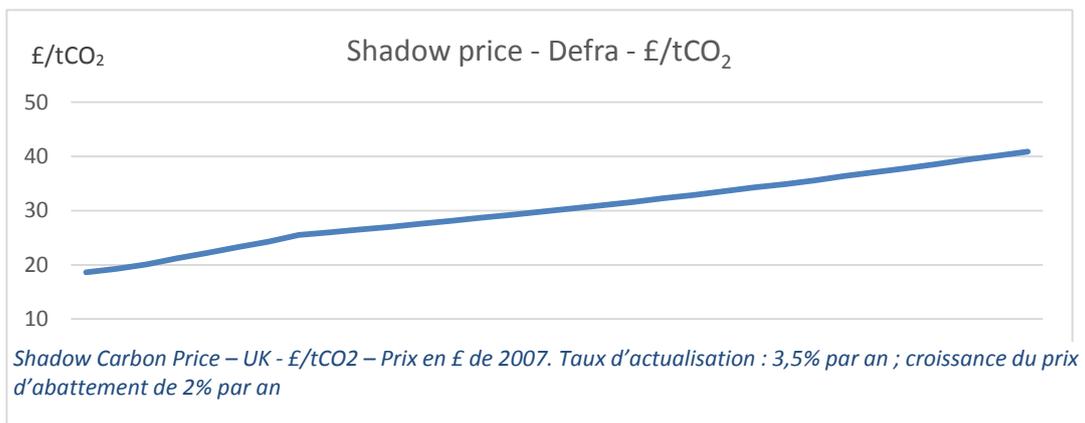


Ce coût d'abattement, contrairement à celui de la Commission Quinet, décroît avec le temps, du fait du progrès technique et de l'amélioration de l'efficacité énergétique.

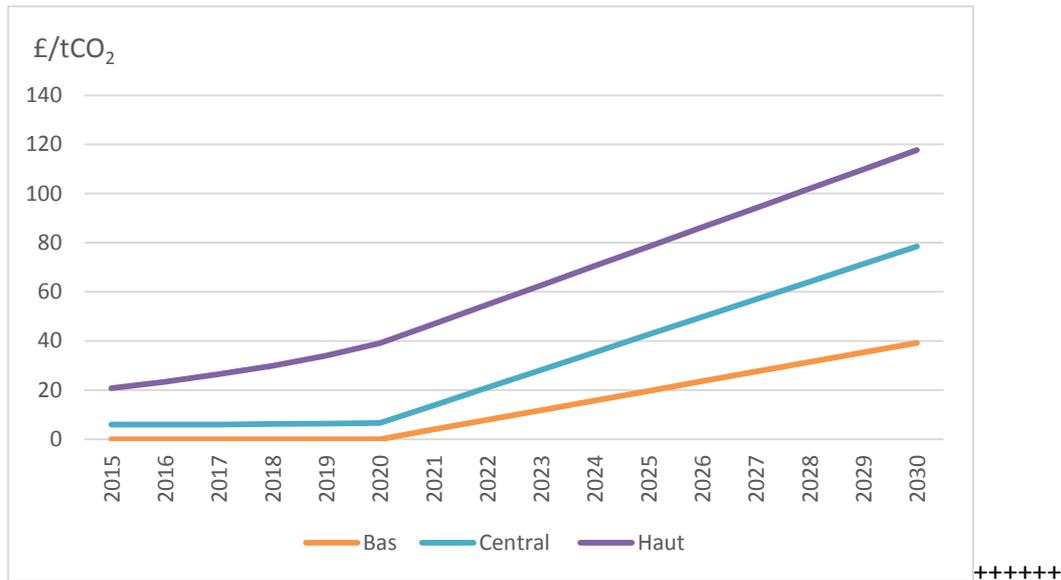
Proposition du ministère de l'environnement britannique

Sur le fondement de la Stern Review, le Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) a estimé un « shadow price » du carbone [Réf. 6].

Cette publication est restée sous l'en-tête de l'Administration, sans consécration politique. Il y est cependant fait référence dans les décisions gouvernementales.



Ce prix a été révisé en 2015 dans une étude du Department of Energy and Climate Change qui recommande de retenir les valeurs ci-après pour l'évaluation des politiques publiques [Réf. 41 - Une livre vaut environ 1,2 euros en février 2017)].

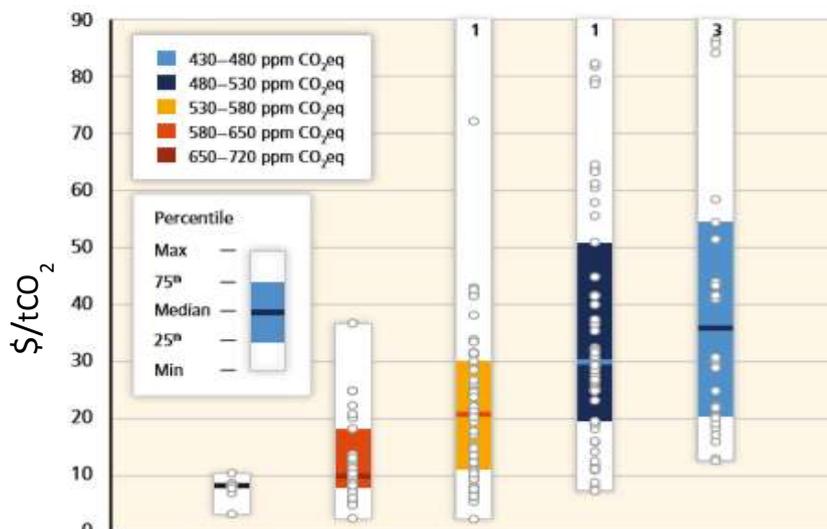


DECC's updated short-term traded sector carbon values for policy appraisal in real 2015 terms, £/tCO₂eq

Estimations du GIEC

Le Groupe III du GIEC 2007 consacré aux politiques d'adaptation a recommandé la mise en place d'un prix de référence du CO₂. Il indique que la stabilisation des émissions autour de 550 ppm CO₂-eq en 2100 nécessiterait un prix de 20 à 80 US\$/t CO₂-eq en 2030 et 30 à 155 US\$/tCO₂-eq en 2050. En prenant en compte les évolutions technologiques, le prix serait plus faible : 5 à 65 US\$/tCO₂-eq en 2030 et 15 à 130 US\$/tCO₂-eq en 2050. En se fondant sur la revue de nombreuses études, ce rapport considère qu'un prix implicite du carbone de 20 à 50 US\$/t CO₂-eq, stable ou croissant, permettrait au secteur Energie de devenir « bas carbone » en 2050 [Réf. 42].

En 2014 ; le Groupe III a synthétisé ses conclusions notamment par le graphique ci-après. Le prix d'abattement pour le scénario préféré du GIEC (480-530 ppm) serait de 20 à 50 \$/tCO₂eq. Cependant la méthodologie n'est guère explicitée par le GIEC, et ce résultat est peut-être politique [Réf. 43].



GIEC – Coût moyen d'abattement (2015-2100) – Actualisation 5% - \$/tCO₂

Estimation Union européenne

L'Union européenne consacre tous ses efforts à faire mieux fonctionner le mécanisme d'échange de permis d'émission, et ne porte plus d'intérêt à établir un prix du carbone. Cependant elle a fait réaliser en 2004 une étude pour harmoniser au niveau européen les méthodologies d'évaluation des projets d'infrastructures de transport, et donc définir un prix de CO₂ à utiliser dans les infrastructures de transport [Réf. 44].

Cette étude reprend à son compte une étude académique (Watkiss et al. (2005), dont les résultats sont présentés ci-après en Euros 2002.

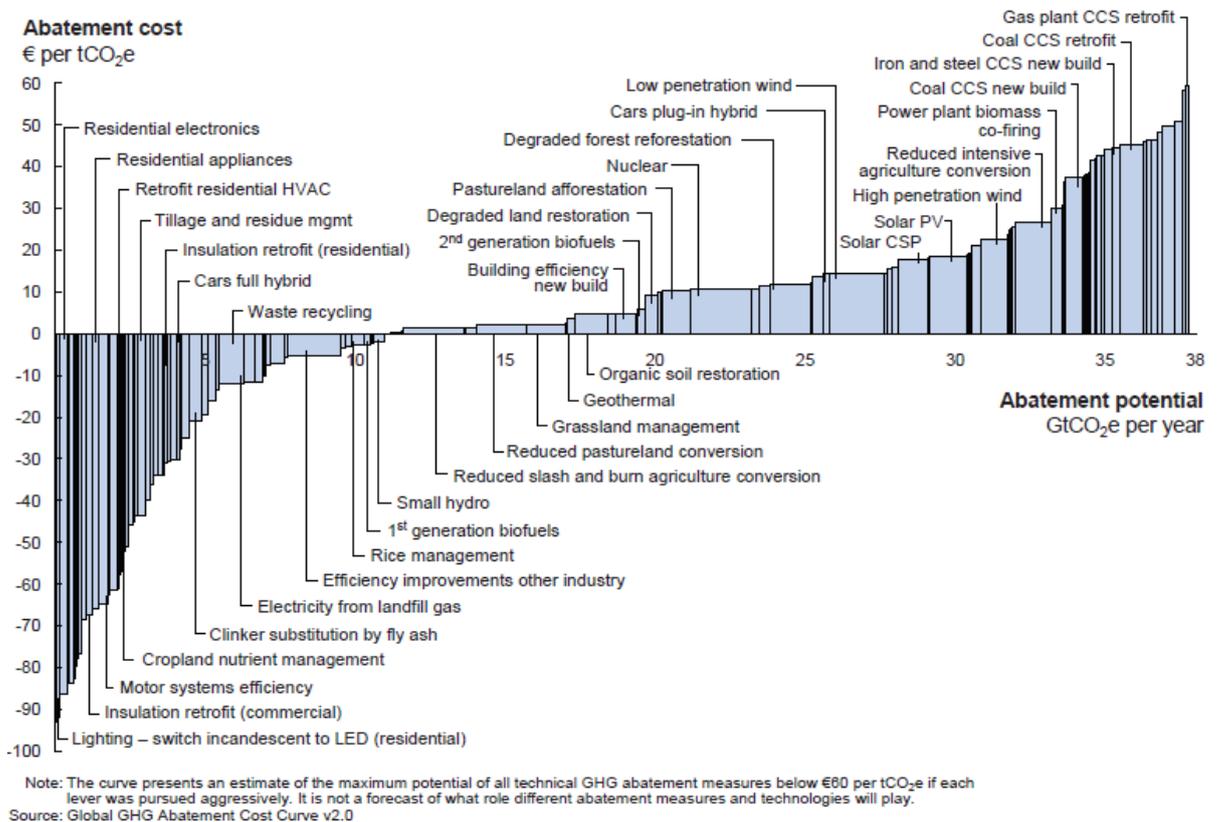
Année d'émission	Estimation centrale	Pour études de sensibilité	
		Estimation centrale basse	Estimation centrale haute
2000-2009	22	14	51
2010-2019	26	16	63
2020-2029	32	20	81
2030-2039	40	26	103
2040-2049	55	36	131
2050	83	51	166

€/tCO₂e de 2002 - Evaluations combinant le coût social et le coût d'abattement – Taux d'actualisation décroissant dans le temps

Estimations McKinsey

McKinsey – Bureau de Stockholm a réalisé en 2007 une étude largement reprise dans la littérature économique qui vise à calculer les coûts d'abattement afférents à diverses technologies, ou coûts sectoriels d'abattement [Réf. 45]. Cette étude a été régulièrement actualisée, la dernière révision ayant été publiée en septembre 2013 [Réf. 46].

Global GHG abatement cost curve beyond business-as-usual – 2030



Ce graphique est mondial ; il représente le coût marginal d'abattement pour chaque technologie. Les auteurs ont également développé une approche régionale (trois secteurs et trois régions).

L'étude conclut que 30% des mesures nécessaires pour atteindre l'objectif « limitation de l'élévation de température à 2°C » ont un gain économique net (hors externalités), constitué d'économies d'énergie, et 50% supplémentaires ont un coût inférieur à 20 €/tCO₂ ; au total, le coût moyen d'abattement serait très bas (4€/tCO₂). Mais il serait nécessaire que ces différentes mesures soient mises en œuvre de façon optimale, en fonction de leurs prix croissants.

Cette étude a été largement commentée par les économistes du changement climatique. Ils contestent généralement la partie du graphique à prix négatifs, et considèrent que la partie positive est sous-estimée [Réf. 47].

3. Evaluations du prix effectif du carbone

Le prix effectif du carbone est le prix que l'on peut reconstituer à partir des décisions effectivement prises par des collectivités ou des entreprises. On examinera ci-après i) le prix effectif des taxes carbone, ii) celui qu'on peut déduire de réglementations, et iii) ceux que se donnent des acteurs privés.

3.1. Les taxes carbone

De très nombreux pays ont mis en place des taxes carbone.

Banque mondiale

La Banque mondiale en a fait une synthèse en 2015 [Réf. 48]. Le montant de la taxe s'étage de moins de 10\$/tCO₂ dans une dizaine de pays du Monde à 130\$/tCO₂ en Suède. Cette énorme dispersion – de 2 à 130 €/tCO₂ - démontre à l'évidence que le montant de ces taxes

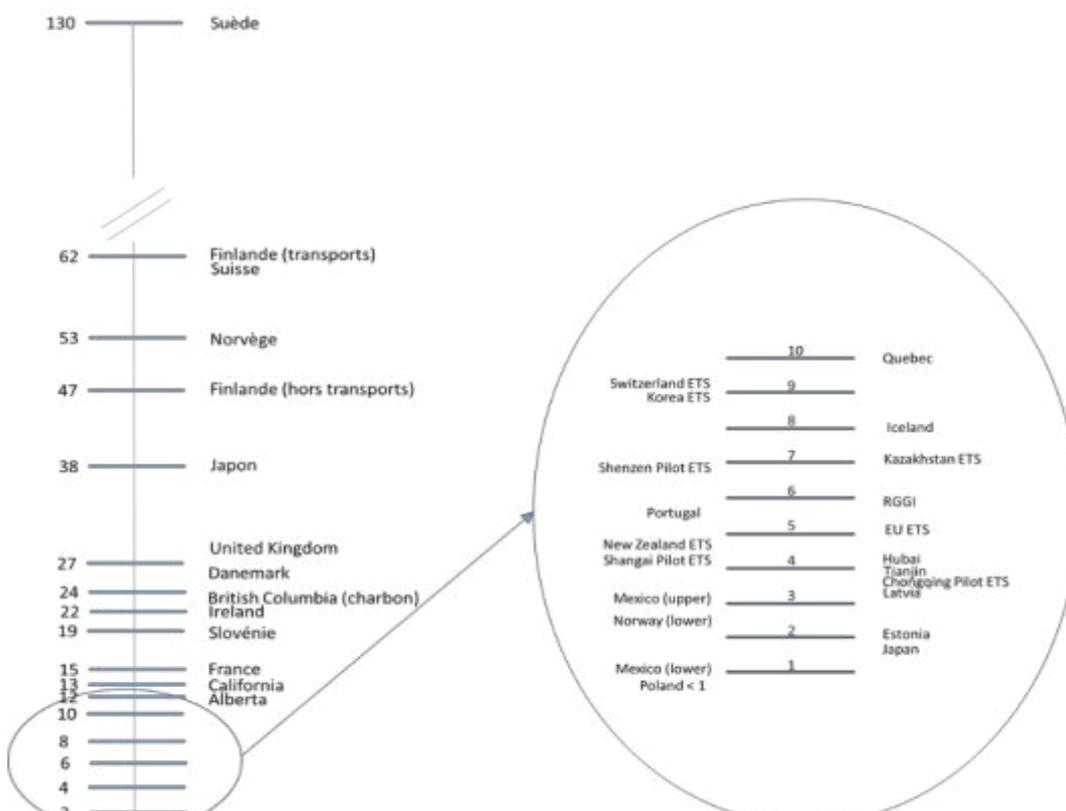


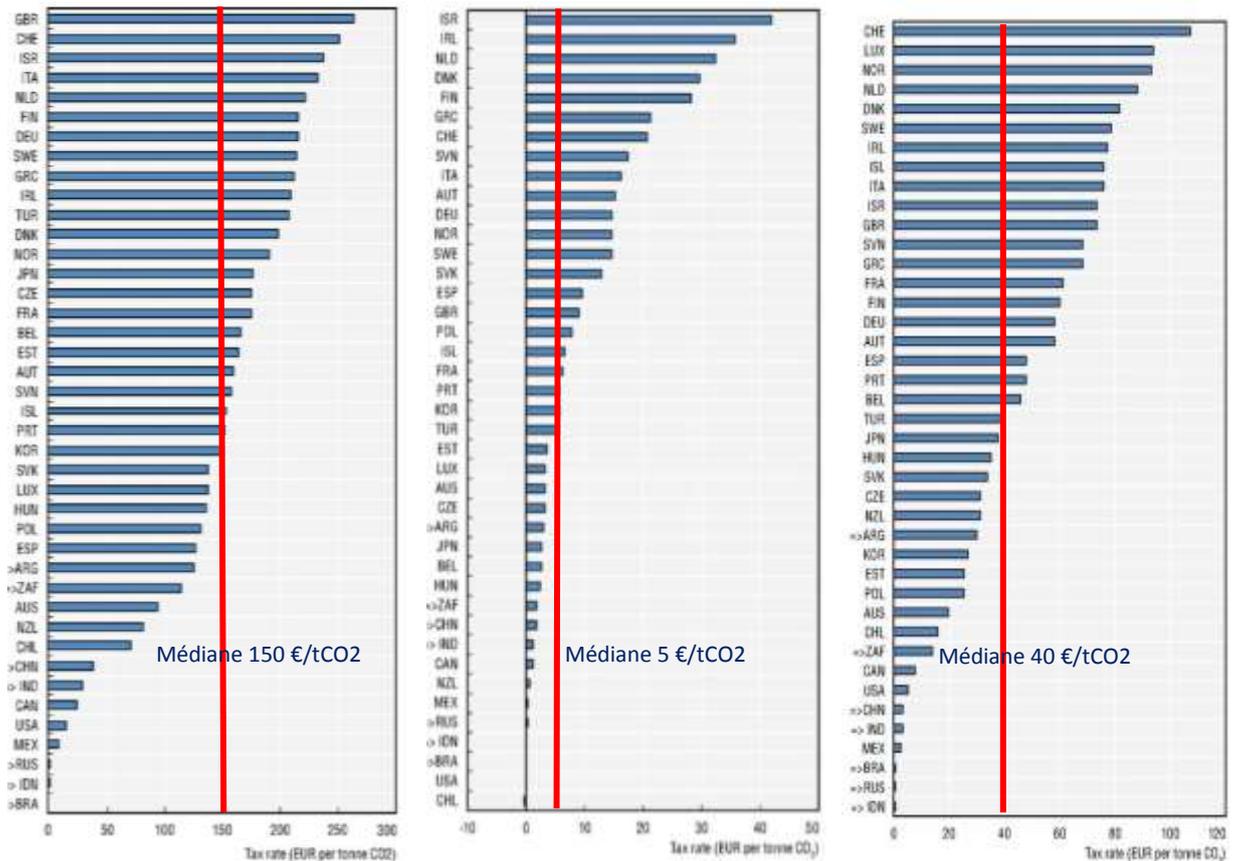
Figure 1 Les taxes Carbone à travers le Monde – World Bank – Ecofys – Carbon watch 2015 [Réf. 37]

n'est pas corrélé avec un quelconque prix du carbone. S'il s'en rapproche, ça ne peut être que par hasard. L'examen de la situation de quelques régions ou pays le confirme.

OCDE

L'OCDE actualise tous les deux ans environ une étude sur les montants des Taxes carbone dans les pays membres et quelques économies partenaires. La dernière révision date de 2015 [Réf. 17].

Ces évaluations révèlent un comportement assez constant des Etats : ils n'hésitent pas à taxer assez fortement l'énergie utilisée pour le transport, car l'élasticité-prix du transport est faible. Mais ils sont beaucoup plus mesurés à l'égard du chauffage - première nécessité et substituable - et l'industrie, créatrice d'emplois.



Montant des taxes par pays, selon les secteurs

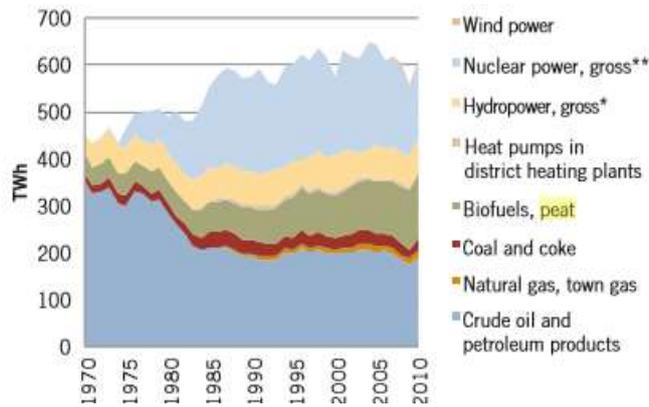
Transport

Chauffage et industrie

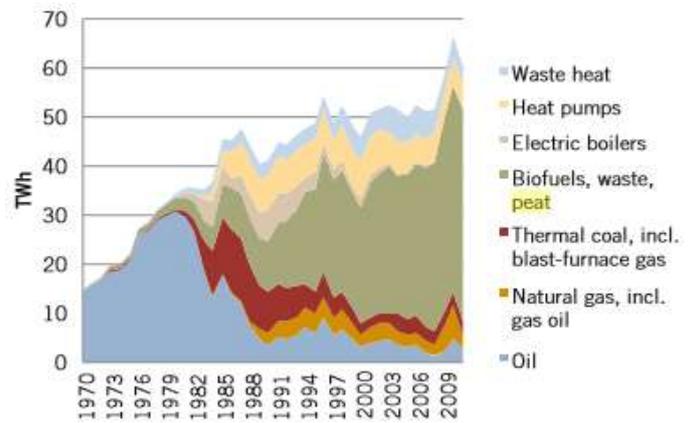
Energie

Suède

En Suède, une taxe carbone a été introduite en 1991, alors qu'il n'existait pas de taxe sur les produits pétroliers ; elle est de 150 \$/tCO₂ en 2016, mais ne s'applique pas aux utilisations relevant du système EU-ETS et notamment à la production et à la consommation d'électricité (l'électricité suédoise étant essentiellement décarbonée), et est réduite de 50 % pour les utilisations d'énergie par l'industrie. Son effet principal - et vertueux - a été l'équipement des réseaux de chaleur en chaudières fonctionnant avec de la bioénergie [Réf. 49].



Sweden's energy supply in 1970–2010, excl. net electricity exports (Swedish Energy Agency 2012d)



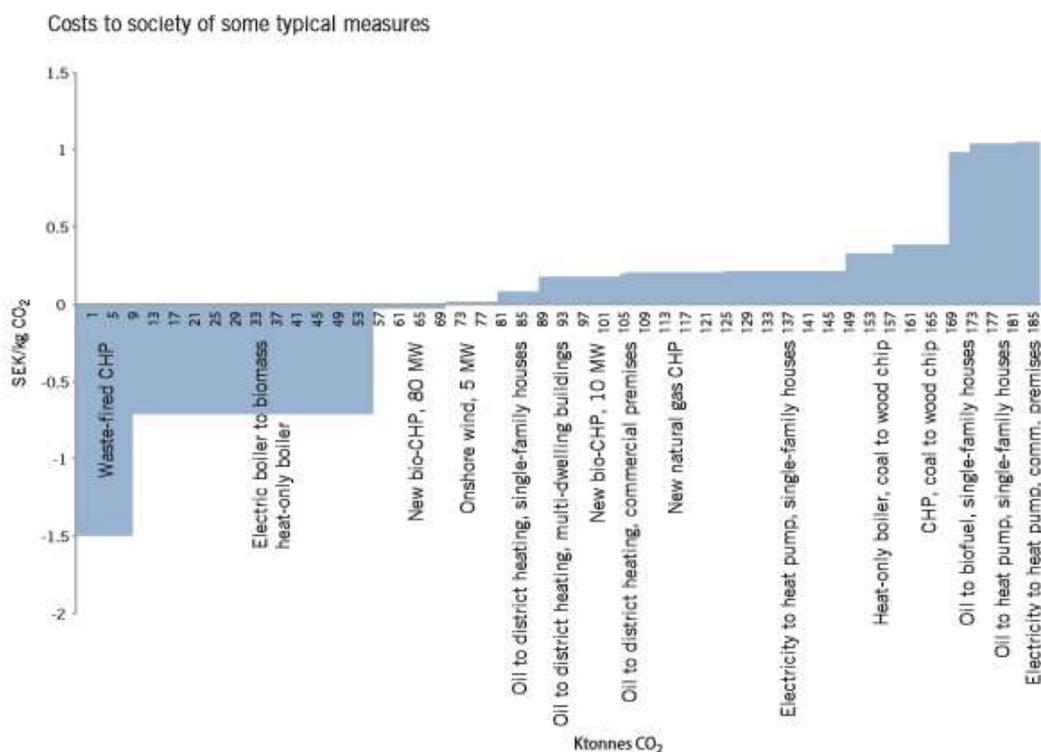
Energy supply for district heating, 1970–2010 (Swedish Energy Agency 2012d).

Cependant, la Suède contrairement aux définitions européennes, considère la tourbe comme une bioénergie, comme telle renouvelable^a. Les statistiques aisément accessibles ne distinguent pas entre la biomasse usuelle et la tourbe, mais celle-ci a sans doute une place prépondérante. Si donc la taxe carbone suédoise a certainement eu un impact important pour réduire la consommation de charbon et de pétrole pour le chauffage, son impact sur les émissions de CO₂ est certainement plus discutable.

La Suède ne se fixe aucun objectif de réduction d'émission de CO₂ pour les secteurs couverts par l'EU-ETS (au motif que le bon fonctionnement de ce marché devrait assurer l'objectif d'émission assigné). Et ses objectifs de réduction hors EU-ETS concernent essentiellement le transport. Il n'est pas certain que sa politique y contribuera, dans la mesure où le niveau total de taxes sur les produits pétroliers utilisés pour les transports n'est pas sensiblement différent de la TICPE française (0,56 €/l et 0,46 €/l pour l'essence et le gazole en Suède, contre 0,65 €/l et 0,47 €/l en France). Lamoindre taxation relative du gazole en France est justifiée par son énergie spécifique plus élevée : par kWh, les taxes sont équivalentes. La France a cependant décidé d'augmenter la taxe sur le gazole au motif de l'émission de « particules fines », dont la nocivité serait élevée.

La Suède utilise un outil analogue à celui qui a été introduit par McKinsey, pour visualiser les effets de sa politique énergétique.

^a Elle se fonde sur le fait que la Directive européenne sur la taxation d'énergie ne s'applique pas à la tourbe.



Coût et impact des mesures de réduction d'émission – Suède [Réf. 50]]

Royaume-Uni

Depuis 2013, le Royaume-Uni a établi un prix support du CO₂ (Carbon Price Support – CPS), c'est-à-dire un prix qui s'ajoute au prix des crédits d'émissions européens. Seraient-ils nuls que ce prix, qui est donc une taxe, s'appliquerait. Il est fixé tous les deux ans, pour les deux années à venir, avec une perspective glissante sur le futur. Dans sa dernière révision (Réf.51), il est de :

£/tCO ₂	Confirmed rates	Indicative rates	
	2016-17	2017-18	2018-19
Support price per tCO ₂	18 €/tCO ₂	18 €/tCO ₂	18 €/tCO ₂

Au taux de début 2016, et avec un prix de marché du CO₂ européen de 5 €, le prix complet du CO₂ est d'environ 26 €, soit à peu près le prix optimal justifié par le DEFRA (§ 3.2) ; les commentaires de l'administration britannique lors de la publication de ce prix soulignent qu'un prix supérieur pèserait sur la compétitivité britannique.

France

En France, la loi de finances rectificative de 2015 a introduit une taxation du carbone, maintenant codifiée au code des douanes. Elle n'a pas fait l'objet d'études d'impact, et la justification de son montant est mal connue.

Le Gouvernement se fixe pour objectif (article 1-VIII de la loi 2015-992 du 17 août 2015, révisée, relative à la transition énergétique, pour la composante carbone intégrée aux tarifs des taxes intérieures sur la consommation des produits énergétiques inscrites au tableau B

du 1 de l'article 265 du code des douanes (c'est-à-dire tous les produits énergétiques)), d'atteindre les valeurs de :

Année	2017	2018	2019	2020	2030
€/tC	30,5 €	39,0 €	47,5 €	56,0 €	100,0 €
€/tCO2	8,3 €	10,6 €	13,0 €	15,3 €	27,3 €

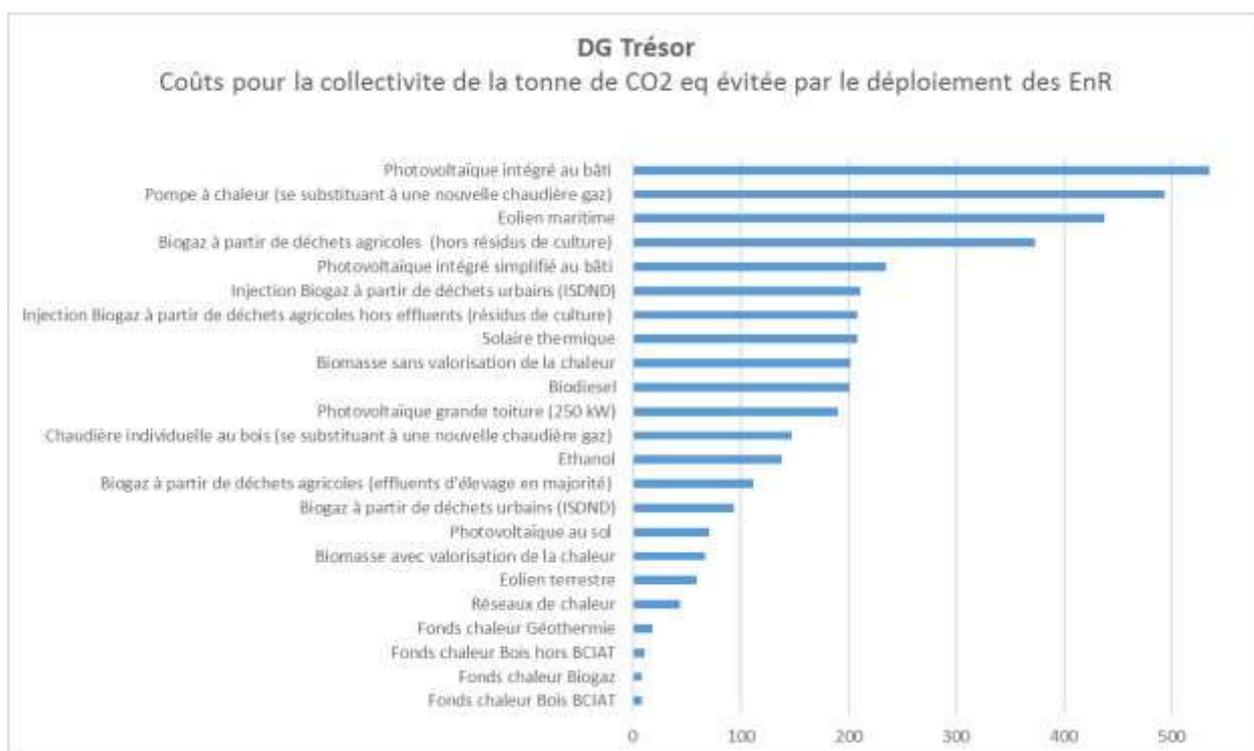
Cette taxe carbone est d'un montant faible par rapport à la TICPE (ancienne TIPP) à laquelle elle s'ajoute, mais elle aurait un réel impact, particulièrement pour le gaz naturel antérieurement non taxé, si son montant dépassait 20 €/tCO₂.

3.2. *Le prix effectif apprécié par l'évaluation du montant des subventions*

La Direction du Trésor

L'édition de mars 2016 de la lettre Trésor-Eco du ministère des Finances est consacrée au thème : « Les énergies renouvelables : quels enjeux de politique publique ? » [Réf. 12]. Il y figure une évaluation des prix effectifs du carbone tels qu'on le déduit des subventions aux énergies renouvelables.

Ils sont, à l'exception des énergies relevant du Fond Chaleur, sensiblement plus élevés que tous les prix envisagés par ailleurs et ne peuvent se justifier que par une approche non économique du problème.



Prix RTE

En mars 2016, « RTE Réseau de transport d'électricité » a publié avec le soutien – ou le contrôle – de l'ADEME une note sur « le signal prix du CO₂ - Analyse de son impact sur le système électrique européen » [Réf. 52]. Cette étude ne correspond à aucune définition du prix considéré dans la présente note. Elle cherche à établir quelle serait la réaction du système de production européen selon différents signaux de prix carbone.

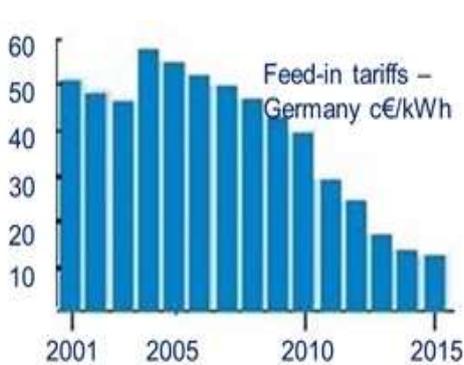
Elle conclut que :

« Avec le parc de production actuel, les simulations réalisées montrent qu'il faudrait retenir un prix autour de 30 €/tonne de CO₂ au niveau européen pour diminuer de façon significative (de l'ordre de 100 millions de tonnes par an, soit 15 %) les émissions du secteur électrique européen. Un signal prix sensiblement plus élevé, de l'ordre de 100 €/tonne, permettrait d'atteindre une réduction des émissions de l'ordre de 30 %. ». Au-delà, une augmentation du prix n'aurait pas d'impact (la production intermittente serait à son maximum, et le solde serait assuré par le gaz). Un prix de 30 €/tCO₂ augmenterait de 30% le coût marginal du système électrique, en moyenne ; et un prix de 100 €/t CO₂ l'augmenterait de 118% (plus qu'un doublement).

Le prix effectif du soutien à l'énergie solaire en Allemagne

Tous les pays qui soutiennent fortement les énergies renouvelables intermittentes acceptent un prix effectif du carbone très élevé pour ces énergies.

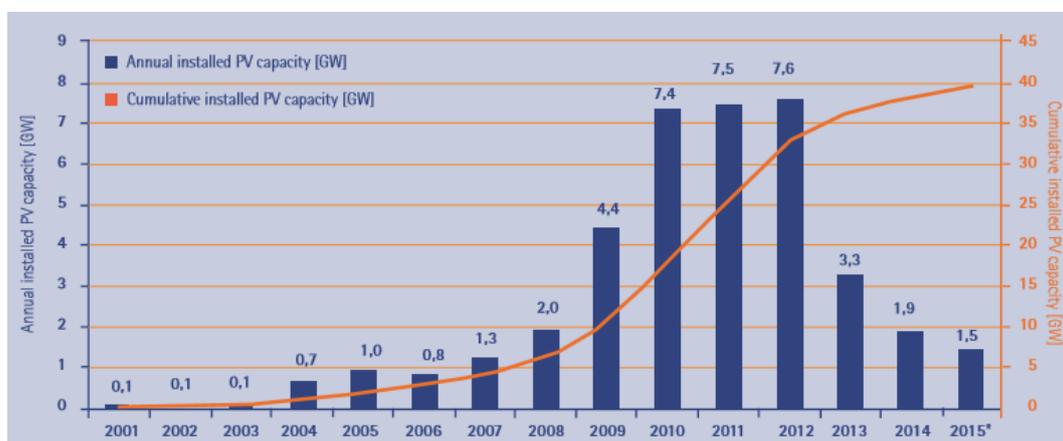
Selon Marcantonini and Ellerman qui ont étudiés la situation allemande [Réf. 15], le coût d'abattement par l'énergie éolienne est de 57 €/t CO₂, et celui de l'énergie solaire est de 552 €/tCO₂ en 2010. Certes, depuis cette étude, le tarif garanti de l'électricité solaire allemande a baissé d'environ 60%. Il reste cependant que le prix d'abattement de l'énergie solaire a été longtemps particulièrement élevé. Un tel soutien à l'énergie solaire n'a été justifié que par la volonté de constituer une industrie nationale dans ce secteur. Selon la Fédération allemande des énergies renouvelables, les industries solaires et éoliennes allemandes ont réalisé en 2015 près de 70% de leur chiffre d'affaires à l'exportation [Réf. 53]. Mais c'est une présentation habile de la situation : le marché intérieur allemand s'est effondré [Réf. 54], ce qui a arithmétiquement fait croître la part exportée même si elle a baissé en valeur absolue.



Tarif garanti de rachat d'électricité solaire (ménages)



Evolution du prix des installations PV (10 à 100 kW€/kW [Réf. 54].



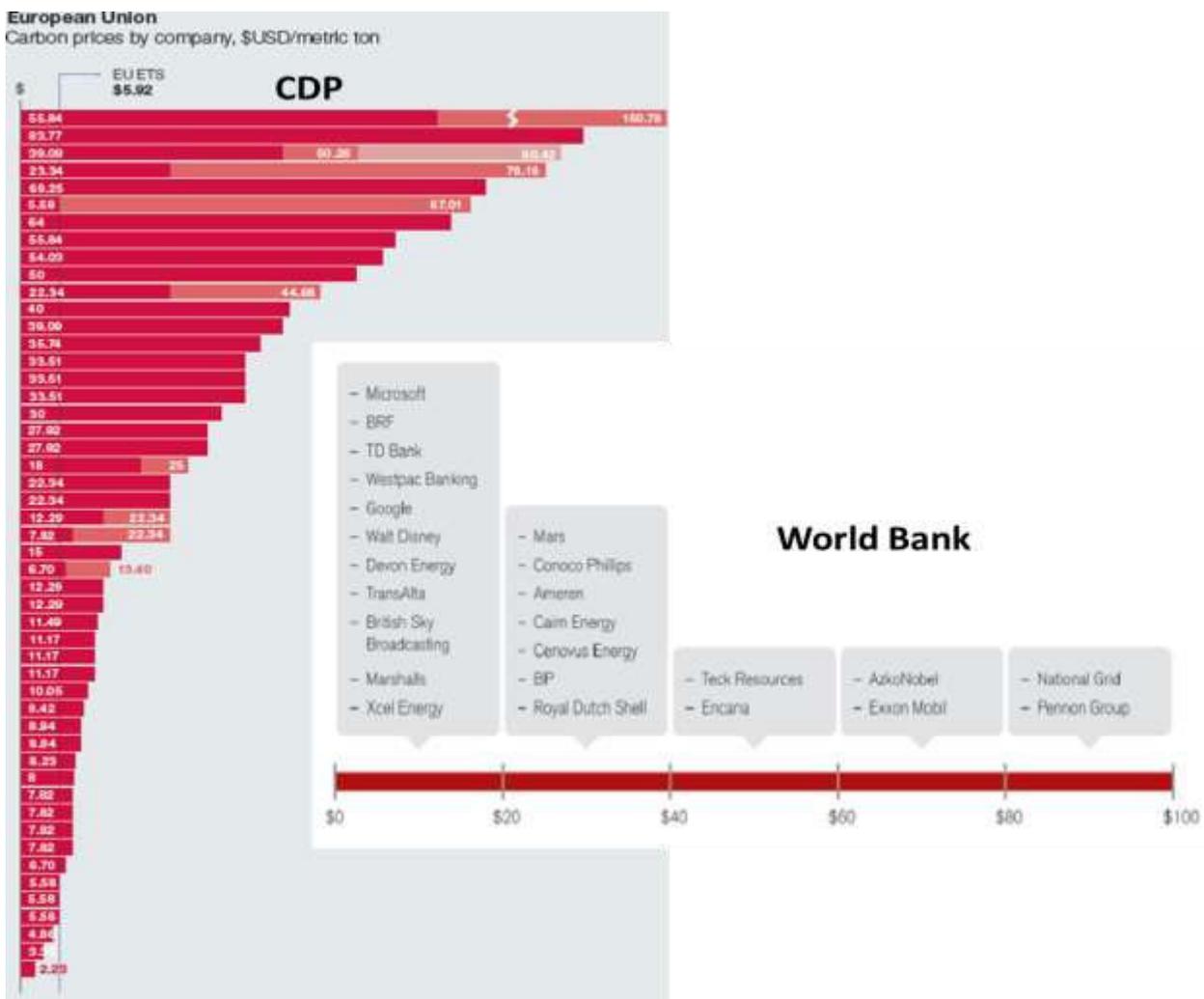
Evolution de la capacité installée de PV [Réf. 54]

L'arrêt de la décroissance du tarif garanti de l'électricité solaire intervenue en 2012, comme la décision française très similaire de 2011, a ramené le prix effectif de l'abattement par l'énergie solaire à un niveau plus raisonnable, mais s'est en fait traduit par un fort ralentissement du recours à cette technologie. Il est à noter que, contrairement à une idée répandue, le coût des installations photovoltaïques s'est stabilisé depuis 2011, les parts respectives des cellules et du reste de l'installation (sur lesquelles les perspectives de gain sont faibles) étant stables autour de 50%.

3.3. Les prix du CO₂ retenus par les entreprises

Le rapport de la Banque mondiale déjà citée [Réf. 48] recense divers prix de carbone que se donnent des entreprises pour optimiser leurs décisions.

CDP, association d'entreprises américaines, a publié en 2016 un recensement de prix carbone d'entreprises [Réf. 55]. Les résultats ci-après de ces deux études sont ci-après ; Il apparaît une très large dispersion de ces prix, qui se situent pour l'essentiel en dessous de 25 à 30 €/tCO₂.



Glossaire

BAU	Business as Usual - Poursuite des tendances, sans action
CCS	Carbon Capture and Storage Séparation du CO ₂ et stockage dans un réservoir ou un puits de carbone
CDIAC	Carbon Dioxide Information Analysis Center
CDR	Carbon dioxyde removal
CO ₂ eq	CO ₂ équivalent. Tient compte de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre, en les convertissant en émissions de CO ₂ qui auraient le même impact
CSP	Concentration solar power Energie solaire à concentration (ou thermodynamique)
DECC	Department of Energy and Climate Change (Royaume Uni)
EPA	Environmental Protection Agency (EPA)
ETS	Emission Trading System
EU-ETS	European Union Emissions Trading Scheme Marché européen de permis d'émissions
INDC	Intended Nationally Determined Contributions Contributions à la réduction des émissions, déterminées par chaque pays
MAC	Marginal Abatement Cost Coût marginal d'abattement
MACC	Marginal abatement cost curves Graphiques de coût marginal d'abattement
PV	Energie photovoltaïque
RTE	Société Réseau de Transport d'Electricité
TICPE	Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques

Références du rapport

- 1 *Académie des technologies - Rapport : Les technologies et le changement climatique : des solutions pour l'atténuation et l'adaptation –Avril 2016*
- 2 *Christian de Perthuis, Pierre-André Jovet - Raphaël Trotignon – Prix du Carbone - Chaire d'économie de l'Université de Paris – Dauphine – Novembre 2015*
- 3 *Synapse Inc - CO2 Price Report – Synapse – Printemps 2014*
- 4 *Article 100-4 -I -1er du code de l'énergie.*
- 5 *Australian Government – Productivity commission - Carbon Emission Policies in Key Economies - Productivity Commission Research Report – May 2011*
- 6 *Department of Environment, Forest and Rural Affairs - The social cost of carbon and the shadow price of carbon: what they are, and how to use them in economic appraisal in the UK - – December 2007*
- 7 *GIEC, 2014: Résumé à l'intention des décideurs. In: Changements climatiques 2014, L'atténuation du changement climatique. Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel et J.C. Minx]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique.*
- 8 *Richard Clarkson and Kathryn Deyes - Estimating the Social Cost of Carbon Emissions – Environment Protection Economics Division Department of Environment, Food and Rural Affairs: London - January 2002*
- 9 *Stern Review on the Economics of Climate Change – 30 octobre 2006*
- 10 *David Anthoff, Steven Rose, Richard S.J. Tol, Stephanie Waldhoff - Regional and Sectoral Estimates of the Social Cost of Carbon: An Application of FUND - No. 2011-18 - Economics - June 21, 2011*
- 11 *Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact assessment — US EPA - Revised July 2015*
- 12 *Economie du bien commun – Jean Tirole – PUF - 2016*
- 13 *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*

-
- 14 *Rapport de la commission présidée par Alain Quinet - La valeur tutélaire du carbone - Centre d'Analyse Stratégique – Documentation française - 2009*
 - 15 *Rapport de la mission présidée par Émile Quinet - Evaluation socio-économique des investissements publics – Commissariat général à la stratégie et à la prospective – Septembre 2013*
 - 16 *Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis – Interagency Working Group on Social Cost of Carbon – United States Government – 2013 – Revised 2015*
 - 17 *Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment - Projet Heatco – Consultant : IER, Germany – February 2006*
 - 18 *Entreprises pour l'Environnement – EPE - Prix interne du carbone - Une pratique montante en entreprise*
 - 19 *OECD - Taxing energy use 2015 – OECD and selected partner economies, OECD Publishing - 2016*
 - 20 *Marcantonini and Ellerman - The Implicit Carbon Price of Renewable Energy Incentives in Germany – European University Institute – Mars 2014*
 - 21 *Twilight of an Industry - Bankruptcies Have German Solar on the Ropes – Spiegel on line - 2012*
 - 22 *Lettre Trésor-Eco - Les énergies renouvelables : quels enjeux de politique publique ? - Mars 2016*
 - 23 *Commissariat Général au Développement Durable – Ministère de l'Environnement - L'impact, pour les ménages, d'une composante carbone dans le prix des énergies fossiles – Mars 2016*
 - 24 *Euro-CASE Policy Position Paper - Reform Options for the European Emissions Trading System (EU ETS) – September 2014*
 - 25 *Propositions pour des prix Carbone alignés avec l'accord de Paris – Rapport de la mission Pascal Canfin, Alain Grandjean, Gérard Mestrallet remis à Mme Royal, président de la COP 21 – Juillet 2016*
 - 26 *Sweden's Sixth National Communication on Climate Change – Ministry of the Environment – Sweden - 2014*
 - 27 *McKinsey – A cost curve for greenhouse gas reduction - Per-Anders Enkvist, Tomas Nauclér, et Jerker Rosander – Février 2007*
 - 28 *Jean Tirole - Négociations climatiques : Copenhague ou l'heure de vérité – Le Monde – 2 novembre 2009*
 - 29 *Étude économique prospective de la filière électrique nucléaire - Jean-Michel Charpin, Commissaire au Plan - Benjamin Dessus, Directeur du programme Ecodev CNRS - René Pellat, Haut-Commissaire à l'énergie atomique - Juillet 2000*
 - 30 *Révision du taux d'actualisation des investissements publics - Rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue – Commissariat général au Plan – 21 janvier 2005*
 - 31 *Christian Gollier - Pricing the Planet's Future : The economics of Discounting in an Uncertain World, Princeton University Press (2012)*

32 Ch. Gollier *Le calcul du risque dans les investissements publics*, Centre d'analyse stratégique, Paris, La Documentation française - 2011

33 *Unification of discount rates used in external debt analysis for low-income countries* – FMI - October 4, 2013

34 *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

35 *Fact sheet : Social Cost of Carbon* – EPA - 2013

36 *Anthoff, D., Tol, R. S. J., & Yohe, G. W. (2009). Discounting for Climate Change. Economics - - The Open Access, Open-Assessment E-Journal, 3: 2009-24. doi:10.5018/economicsejournal. ja.2009-24.*

37 *Estimating the Social Cost of Carbon Emissions* - Richard Clarkson and Kathryn Deyes – January 2002

38 *The Social Cost of Carbon: Trends, Outliers and Catastrophes*. Richard S.J. Tol. Economic and Social Research Institute, Dublin, Ireland; Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands; Department of Spatial Economics, Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands; Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA – August 2008

39 *Transports : choix des investissements et coût des nuisances* – Commissariat général au plan – Juin 2001

40 *Commissariat Général au Développement Durable - Donner une valeur à l'environnement : la monétarisation, un exercice délicat mais nécessaire* – Décembre 2010

41 *Updated short-term traded carbon values used for UK public policy appraisal* – Department of Energy and Climate Change - 2 October 2014

42 *GIEC - Climate Change 2007: Working Group III: Mitigation of Climate Change - E. Policies, measures and instruments to mitigate climate change - § 23*

43 *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA - § 6.3.6.2 - 2014: *Assessing Transformation Pathways*.

44 *Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment* – Heatco - 2004

45 *McKinsey – A cost curve for greenhouse gas reduction* - Per-Anders Enkvist, Tomas Naucér, et Jerker Rosander – Février 2007

46 *McKinsey – Pathway to a low carbon economy – Version 2 of the global greenhouse gas abatement curve* - September 2013

-
- 47 *Stockholm Environment Institute - Use of McKinsey abatement cost curves for climate economics modeling - Frank Ackerman and Ramón Bueno - January 25, 2011*
- 48 *World Bank Group – Ecofys - Carbon Pricing Watch 2015 -*
- 49 *Economic Instruments in Practice 1: Carbon Tax in Sweden - Bengt Johansson, Swedish Environmental Protection Agency -*
- 50 *Sweden’s Sixth National Communication on Climate Change – Ministry of the Environment – Sweden - 2014*
- 51 *HM Revenues and Customs - Carbon price floor: rates from 2015-16, exemption for Northern Ireland and technical changes*
- 52 *Signal prix du CO₂ – Analyse de son impact sur le système électrique européen – RTE, avec le soutien de l’ADEME – Mars 2016*
- 53 *Factsheet Renewables from Germany - Bundesverband Erneuerbare Energien - 2015*
- 54 *Development of grid connected PV capacity in Germany - Photovoltaic power systems programme- International Energy Agency - 2015*
- 55 *CDP - Embedding a carbon price into business strategy – September 2016*