



LA FACTURE DU CARBONE

Pour réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre, il est essentiel de voir les coûts sur le long terme

Kenneth Gillingham

Le consensus scientifique est clair : le changement climatique est lié à une fréquence et une intensité croissantes des catastrophes naturelles, depuis les sécheresses et les feux de forêts jusqu'aux ouragans et aux inondations côtières. Même si l'on ne connaît pas exactement l'ampleur du préjudice économique, des éléments très probants semblent montrer qu'elle pourrait être très grande. Pour les dirigeants, le défi consistera à décider des montants à consacrer aux mesures de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre. Ils devront pour cela pouvoir comparer les coûts des différentes solutions, y compris les sources d'énergie renouvelables et les voitures électriques.

Il devient de plus en plus urgent que les décideurs s'attaquent à ce défi, car les climatologues plaident pour des

réductions rapides et importantes des émissions afin d'atteindre zéro émission nette d'ici 2050, voire avant (Millar *et al.*, 2017). Réaliser cet objectif, auquel de nombreux pays adhèrent déjà, nécessitera une vaste transformation des sources d'énergie utilisées pour alimenter l'économie mondiale et impliquera des avancées technologiques vraiment exceptionnelles. En effet, d'après l'édition 2019 de l'*International Energy Outlook* du Service d'information sur l'énergie des États-Unis, les combustibles fossiles produiront encore 57 % de l'électricité en 2050.

Combien coûteraient les mesures pour sortir du statu quo et s'approcher tout près de l'objectif de zéro émission nette d'ici 2050 ? Pour répondre à cette question, il est important de distinguer coûts à court terme et coûts à long terme. À brève échéance, quelques solutions peu onéreuses

Certaines activités semblent onéreuses à court terme, mais peuvent se révéler d'un faible coût à long terme du fait de l'innovation induite.

sont envisageables pour réduire les émissions, mais dès qu'il s'agit de les diminuer plus drastiquement, les coûts augmentent vite. Toutefois, certaines activités, surtout celles qui s'appuient sur les toutes nouvelles technologies émettant peu de carbone, semblent onéreuses à court terme, mais peuvent se révéler d'un faible coût à long terme du fait de l'innovation induite. Le coût à moyen terme des mesures d'atténuation pourrait donc être moins lourd qu'on ne le suppose couramment.

Coûts technologiques à court terme

Pour calculer les coûts à court terme de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, les économistes estiment les coûts en amont et les divisent par le nombre de tonnes de dioxyde de carbone (ou équivalent) non émises. Un gouvernement dépense, par exemple, 20 millions de dollars afin de promouvoir le développement de parcs éoliens pour produire de l'électricité et réduire ainsi d'un million de tonnes les émissions de dioxyde de carbone. À court

terme, l'atténuation coûterait 20 dollars la tonne. Cette méthode est un outil utile pour comparer le coût respectif de différentes solutions de réduction des émissions.

Certes, la prudence s'impose pour interpréter des résultats ne concernant qu'une technologie donnée ou une mesure prise isolément : il peut y avoir des interactions entre diverses politiques et les coûts associés aux technologies peuvent varier en fonction de l'endroit où elles sont mises en œuvre et la façon dont elles le sont. Et les estimations de ces coûts changent chaque année. De fait, le coût des productions solaire et éolienne a baissé rapidement ces dix dernières années et la tendance devrait se poursuivre.

Mon collègue James Stock et moi-même avons estimé les coûts hors subventions de diverses technologies de réduction des émissions de gaz à effet de serre, sur la base de publications économiques récentes et de l'*Annual Energy Outlook 2018* du Service d'information sur l'énergie des États-Unis (graphique 1). Les coûts sont exprimés par rapport à la production actuelle de charbon, qui constitue un repère précieux puisque le charbon est le combustible qui émet le plus de carbone. Dans de nombreux pays, les responsables des politiques devront décider de l'opportunité de fermer les centrales à charbon actuelles pour mieux décarboner. Ces estimations sont des moyennes pour les États-Unis et il convient d'être prudent avant de les appliquer ailleurs.

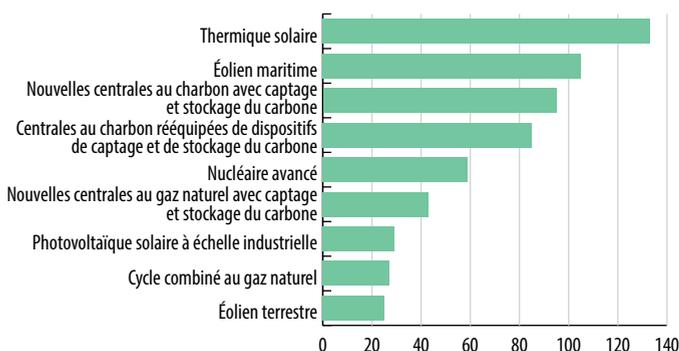
Le point le plus frappant à retenir est que les technologies fondées sur des énergies renouvelables figurent parmi les moins onéreuses. (Ce résultat *peut* être appliqué en dehors des États-Unis, car les marchés de la plupart des technologies renouvelables sont mondiaux.) Le coût de l'éolien et du solaire pourrait même être encore plus bas si l'on inclut les subventions implicites ou explicites. En revanche, les estimations ne tiennent pas compte du caractère intermittent de cette production : le soleil ne brille pas tout le temps et le vent ne souffle pas non plus tous les jours (Joskow, 2019). Quand les niveaux de consommation sont élevés, les énergies renouvelables doivent être complétées par des technologies permettant le stockage (production hydroélectrique d'accumulation par pompage, batteries ou production

Graphique 1

Coûts comparés

Les technologies liées aux énergies renouvelables sont parmi les moins coûteuses par comparaison avec la production actuelle au charbon.

(Dollars/tonne de dioxyde de carbone, dollars de 2017)



Source : Kenneth Gillingham et James H. Stock, « The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions » ; *Journal of Economic Perspectives* 32, n° 4 (automne 2018), pages 53-72.

Note : Les estimations sont tirées de l'*Annual Energy Outlook 2018* du Service d'information sur l'énergie des États-Unis. Les coûts sont des projections concernant les installations qui entreront en service en 2022. Ils n'incluent pas les crédits d'impôt fédéraux pour les énergies renouvelables ni d'autres subventions.

capable de combler rapidement le déficit quand la production éolienne ou solaire diminue).

Aux États-Unis, l'une des options de substitution au charbon à la fois peu coûteuse et sobre en carbone consiste dans une centrale électrique combinant des turbines à gaz et à vapeur pour augmenter le rendement. Ce mode de production, dit à cycle combiné alimenté au gaz naturel, exploite l'avantage que présente une offre abondante et bon marché de gaz de schiste extrait par fracturation. À une réserve près : le coût estimé est de 27 dollars la tonne, en l'absence de toute fuite de méthane au niveau des puits, des conduites ou des installations de stockage. Le méthane est en effet un puissant gaz à effet de serre et la fuite gigantesque de 2015, à Aliso Canyon, en Californie, montre que la production de gaz naturel peut entraîner des émissions de gaz à effet de serre plus importantes, induisant ainsi des coûts supérieurs par tonne de gaz à effet de serre supprimée.

Coût social

Pour comprendre tout l'intérêt d'investir dans ces réductions d'émissions, nous pouvons les comparer avec les estimations du coût social du carbone, qui quantifient le préjudice correspondant à l'émission d'une tonne de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ce préjudice englobe d'autres facteurs comme les pertes pour l'agriculture (ou les gains, dans les climats septentrionaux) consécutives aux changements climatiques, aux inondations dues à l'élévation du niveau des mers et aux destructions provoquées par des cyclones tropicaux plus violents et des incendies plus fréquents. Le gouvernement américain sous la présidence de Barack Obama a fait une estimation moyenne à 50 dollars la tonne de dioxyde de carbone pour 2019.

Plusieurs technologies d'atténuation se révèlent moins coûteuses que le carbone quand on tient compte du coût social de ce dernier (et offriraient donc des solutions tout indiquées), tandis que d'autres sont plus chères, comme le thermique solaire et l'éolien maritime. D'autres repères que cette estimation de 50 dollars la tonne peuvent aussi être utiles. Un rapport récent du FMI estime qu'une taxe mondiale de 75 dollars la tonne de dioxyde de carbone permettrait d'atteindre l'objectif de l'accord de Paris visant à limiter le réchauffement planétaire à 2 °C au-dessus des niveaux préindustriels. Si l'on utilise cette estimation de 75 dollars au lieu des 50 dollars, le nucléaire de pointe devient une autre option moins chère que le coût social du carbone.

Tableau 1

Un large éventail

Des études économiques montrent que les coûts des mesures à court terme destinées à réduire les émissions de dioxyde de carbone sont très variables.

MESURE	COÛT ESTIMÉ DE LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO ₂ (DOLLARS DE 2017/TONNE)
Efficacité énergétique résultant des comportements	-190
Éthanol de maïs	-18-+310
Reboisement	1-10
Normes de portefeuilles d'énergies renouvelables	0-190
Normes de consommation moyenne des modèles des constructeurs automobiles	-110-+310
Subventions à l'énergie éolienne	2-260
Centrales non polluantes	11
Taxes sur l'essence	18-47
Réglementation relative au torchage du méthane	20
Réduction des concessions fédérales liées aux mines de charbon	33-68
Politiques relatives aux émissions agricoles	50-65
Normes nationales relatives aux énergies propres	51-110
Gestion des sols	57
Politiques de gestion du bétail	71
Développement de l'énergie solaire à concentration	100
Subventions aux énergies renouvelables	100
Normes de carburants sobres en carbone	100-2 900
Subventions aux systèmes solaires photovoltaïques	140-2 100
Biocarburants	150-420
Programmes d'amélioration de l'efficacité énergétique	250-300
Primes à la casse	270-420
Programmes d'aide à l'intempérisation	350
Subventions aux batteries de véhicules électriques	350-640

Source : Kenneth Gillingham et James H. Stock, « The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions » ; *Journal of Economic Perspectives* 32, n° 4 (automne 2018), p. 53-72.

Note : Les politiques citées dans le tableau sont appliquées dans divers pays du monde, mais pour la plupart aux États-Unis. Les coûts relatifs aux gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone sont convertis en équivalents dioxyde de carbone sur la base de leur potentiel de réchauffement global. Les estimations se fondent soit sur des publications individuelles soit sur une série d'estimations issues de différentes études.

Coûts à court terme des politiques

Jusqu'ici, nous nous sommes intéressés aux coûts actuels de *technologies* non subventionnées, ce qui est utile pour comprendre la direction que les marchés suivront dans un avenir proche. Évidemment, à mesure que les vieilles centrales seront mises hors service et remplacées par de nouvelles, on assistera à une transition vers des technologies renouvelables, quels que soient les choix politiques. Cette transition pourrait cependant être bien plus lente que ne le dicteraient sinon les objectifs ambitieux que de nombreux gouvernements se sont fixés. Il faut donc aussi être conscient des coûts de réduction des émissions qui accompagneraient les différentes *mesures* que les dirigeants pourraient introduire.

L'étude des publications économiques révèle un éventail incroyablement large de coûts pour les politiques qui ont été conduites et évaluées (tableau 1). Dans le bas de la fourchette figurent les mesures en faveur de l'efficacité énergétique, qui permettent effectivement des économies. En économie comportementale, elles sont souvent appelées « coups de pouce », car elles consistent simplement à fournir ou reformuler des informations pour influencer ou encourager des décisions relatives à la consommation d'énergie et favoriser une démarche plus respectueuse de l'environnement. Nous connaissons bien l'exemple des rapports qui accompagnent les factures d'électricité et comparent la consommation d'un ménage avec celle de ses voisins. De telles interventions ne coûtent rien et peuvent réduire la consommation d'énergie d'environ 2 %, d'où des économies nettes. Bien que ces mesures puissent être rentables, elles tendent à ne réduire que modestement les émissions et contribuent assez peu aux efforts d'accentuation de la décarbonation.

Du côté des coûts plus élevés figurent de nombreuses politiques qui paraissent plutôt onéreuses si l'on considère les coûts statiques à court terme. Il s'agit principalement de celles qui incitent à augmenter la part de l'électricité d'origine renouvelable et aident à la décarbonation des transports. Ce sont en fait les subventions aux véhicules électriques qui reviennent le plus cher, parce que, dans la plupart des cas, les batteries sont rechargées grâce à une électricité d'origine fossile, ce qui réduit moins les émissions que possible.

Au final, pourtant, ces technologies pourraient être moins chères que ce que laissent entrevoir les estimations à court terme du tableau. En effet, bon nombre d'entre elles présentent potentiellement des avantages secondaires (moindre pollution atmosphérique, par exemple) qui pourraient les rendre intéressantes, même si les coûts de réduction des émissions de carbone sont élevés. À long terme, en outre, les réductions d'émissions qu'elles permettent et le coût par tonne de carbone non émis peuvent apparaître comme très différents, en raison des retombées des évolutions technologiques induites.

Coûts dynamiques à long terme

Pourquoi les retombées de l'innovation sont-elles importantes ? Le changement climatique est un problème intergénérationnel à long terme, puisque le dioxyde de carbone persiste dans l'atmosphère pendant des centaines voire des milliers d'années. Par conséquent, le progrès et l'innovation technologiques sont essentiels pour les efforts de longue haleine visant à atténuer les changements climatiques en développant des solutions autres que les combustibles fossiles. Même si nous disposons déjà de technologies permettant une forte diminution des émissions, il y a non seulement une inertie incroyable dans le système énergétique, mais aussi de nombreuses possibilités de réduire encore les coûts technologiques. Ces considérations plaident en faveur d'une perspective dynamique, à long terme, montrant de quelle manière les investissements actuels dans de nouvelles technologies pourraient demain abaisser le coût des réductions d'émissions.

Cette perspective dynamique à plus long terme est judicieuse à plusieurs égards. Les économistes savent que la recherche-développement crée des effets d'entraînement, parce que les entreprises peuvent rarement s'approprier tous les avantages qu'elle génère. Quand un brevet expire, par exemple, n'importe quelle entreprise peut se servir de l'innovation correspondante. Il arrive aussi que les progrès d'ingénierie et de gestion liés à l'introduction d'une nouvelle technologie en fassent diminuer les coûts (« apprentissage par la pratique ») et que certaines de ces baisses de coût profitent à d'autres entreprises. On s'aperçoit par exemple que, dans le secteur des semi-conducteurs, les entreprises ont réduit leurs coûts de production en produisant davantage de chaque génération de semi-conducteurs et que cette baisse des coûts s'est répercutée sur d'autres entreprises (Irwin et Klenow, 1994). Il existe aussi des effets de réseau positifs pour toute la société quand une norme unique est adoptée (prise universelle pour tous les véhicules électriques, par exemple). Ces trois types de retombées, qui permettent aux autres entreprises de diminuer leurs coûts, améliorent le bien-être social et justifient économiquement l'adoption de politiques avisées, destinées à favoriser ces effets d'entraînement.

Hormis ces retombées, les travaux récents sur l'économie des innovations liées aux énergies propres soulignent qu'une politique optimale peut être assez différente à long terme, simplement parce que les dépenses engagées aujourd'hui peuvent avoir des effets à long terme. Certaines des méthodes de réduction des émissions qui sont plus coûteuses à court terme peuvent stimuler l'innovation et déboucher sur des coûts à long terme plus faibles que les coûts associés aux méthodes existantes. Prenons l'exemple des subventions aux véhicules électriques. Ces véhicules exploitent une technologie (batteries) dont les progrès sont

Le progrès et l'innovation technologiques sont essentiels pour les efforts de longue haleine visant à atténuer le changement climatique en développant des solutions autres que les combustibles fossiles.

rapides. Si une politique en faveur d'une technologie non polluante permet de réduire considérablement les coûts futurs, il peut être judicieux d'opter pour des solutions plus onéreuses dans l'immédiat (Acemoglu *et al.*, 2016 ; Vogt-Schilb *et al.*, 2018). En principe, cela se vérifie même si une seule entreprise adopte une innovation émettant peu de carbone (et qu'il n'y a donc pas d'effet d'entraînement) ; dans la pratique, on observera très certainement des retombées induisant des baisses de coût à long terme. Retenons surtout que, lorsque la société choisira la meilleure manière de faire face au changement climatique, le choix optimal à long terme ne sera pas forcément celui qui procède d'une vision court-termiste. Certes, il n'est pas facile de prévoir les évolutions technologiques et toute décision comporte donc une part d'incertitude. Mais nous savons que les technologies éprouvées sont moins susceptibles de connaître des avancées spectaculaires que les technologies encore très jeunes. En matière d'émissions de carbone, la vision à long terme s'applique donc seulement aux technologies plus récentes offrant de réelles possibilités de réduire les coûts dans le futur.

Changer la donne

Revenons à notre question initiale. Peut-on décarboner suffisamment pour frôler le niveau zéro émission nette d'ici 2050 ? Oui, c'est possible et même tout de suite, car les technologies existent. Mais une transformation d'aussi grande ampleur du système énergétique sera coûteuse et difficile si elle est engagée d'un seul coup, surtout compte tenu des coûts élevés à prévoir à court terme pour la transition des pays en développement dépendants des énergies fossiles. Des mesures peu onéreuses peuvent être appliquées sans attendre, y compris les économies d'énergie, les encouragements à l'efficacité énergétique et la substitution d'énergies renouvelables à une production vieillissante à base de combustibles fossiles. Ces mesures coûtent déjà moins que les dégâts liés au changement climatique qu'elles permettraient d'éviter, si l'on se fonde sur les estimations du coût social du carbone. Mais de nombreuses autres démarches reviennent relativement cher à court terme, en particulier la promotion des nouvelles technologies sobres en carbone.

Néanmoins, quand les politiques sont largement susceptibles de stimuler l'innovation, elles peuvent aboutir à des coûts totaux bien inférieurs à long terme.

Adopter une perspective de long terme sans jamais négliger l'innovation est capital dans le cadre de la réflexion sur la lutte contre le changement climatique. Des innovations comme les petits réacteurs nucléaires modulaires et les technologies de captage du carbone pourraient changer la donne en supprimant les émissions nettes de gaz à effet de serre pour un coût modique. Certes, comme le disait le physicien danois Niels Bohr, « la prévision est très difficile, surtout lorsqu'elle concerne le futur ». Faute de connaître la trajectoire que suivra la technologie, nous pouvons au mieux spéculer sur ce que coûtera au final la réalisation de l'objectif zéro émission nette. Nous pouvons malgré tout préparer l'avenir en créant des incitations en faveur de mesures peu coûteuses de lutte contre les gaz à effet de serre et d'innovations faiblement émettrices de carbone (tarification du carbone à l'échelle mondiale, par exemple), tout en investissant de manière judicieuse dans de nouvelles technologies. **FD**

KENNETH GILLINGHAM est maître de conférences en économie de l'environnement et de l'énergie à l'université Yale. Cet article est l'adaptation d'un article de 2018 coécrit avec James H. Stock, « The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions », publié dans le *Journal of Economic Perspectives*.

BIBLIOGRAPHIE

- Acemoglu, Daron, Ufuk Akcigit, Douglas Hanley, and William Kerr. 2016. "Transition to Clean Technology." *Journal of Political Economy* 124, no. 1: 52–104. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/684511>
- Irwin, Douglas, and Peter Klenow. 1994. "Learning-by-Doing Spillovers in the Semiconductor Industry." *Journal of Political Economy* 102, no. 6: 1200–27. <https://doi.org/10.1086/261968>
- Joskow, Paul L. 2019. "Challenges for Wholesale Electricity Markets with Intermittent Renewable Generation at Scale: The US Experience." *Oxford Review of Economic Policy* 35, no. 2: 291–331. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grz001>
- Millar, Richard J., Jan S. Fuglestedt, Pierre Friedlingstein, and others. 2017. "Emission Budgets and Pathways Consistent with Limiting Warming to 1.5°C." *Nature Geoscience* 10: 741–47. <https://www.nature.com/articles/ng3031>
- Vogt-Schilb, Adrian, Guy Meunier, and Stephane Hallegatte. 2018. "When Starting With the Most Expensive Option Makes Sense: Optimal Timing, Cost and Sectoral Allocation of Abatement Investment." *Journal of Environmental Economics and Management* 88: 210–33. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.12.001>