

CONSEIL D'ORIENTATION DES RETRAITES

Séance plénière du 21 décembre 2023 à 10h00

« Cibles d'évolution de la productivité à long terme : nouveaux éléments de cadrage »

Document n° 5 bis

<i>Document de travail, n'engage pas le Conseil</i>

Productivité – rapport thématique

coordonné par A. Epaulard



FRANCE STRATÉGIE

ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

LES INCIDENCES ÉCONOMIQUES DE L'ACTION POUR LE CLIMAT

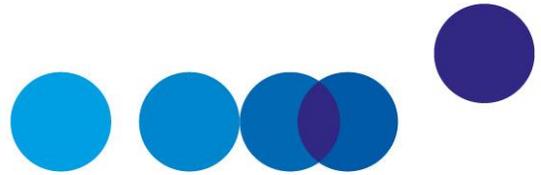
Productivité

Rapport thématique

Anne Epaulard (coord.)

RAPPORT

MAI
2023



LES INCIDENCES ÉCONOMIQUES DE L'ACTION POUR LE CLIMAT

Productivité

Rapport thématique

Coordinatrice

Anne Epaulard

(université Paris-Dauphine-PSL et France Stratégie)

Aude Pommeret (université Savoie Mont-Blanc et France Stratégie)
et Katheline Schubert (PSE et université Paris 1 Panthéon-Sorbonne)



Présentation

Par une lettre du 12 septembre 2022, la Première ministre a confié à Jean Pisani-Ferry une mission d'évaluation des impacts macroéconomiques de la transition climatique, afin que ces incidences soient mieux prises en compte par les décideurs dans l'ensemble des politiques publiques. Selma Mahfouz, inspectrice générale des finances, est la rapporteure générale de la mission. Le secrétariat est assuré par France Stratégie.

Une première note de cadrage est parue en novembre 2022 sous le titre « [L'action climatique : un enjeu macroéconomique](#) » (Note d'analyse, n° 114, France Stratégie).

Remis à la Première ministre en mai 2023, le rapport final intitulé [Les incidences économiques de l'action pour le climat](#) présente la synthèse des travaux de la mission.

Ces travaux ont également donné lieu à la publication de onze rapports thématiques, rédigés par des équipes issues de différentes institutions. L'ensemble de ces documents sont disponibles sur le site de France Stratégie :

- [Bien-être](#), coordonné par Didier Blanchet,
- [Compétitivité](#), coordonné par Lionel Fontagné,
- [Dommages et adaptation](#), coordonné par Xavier Timbeau,
- [Enjeux distributifs](#), coordonné par Vincent Marcus,
- [Indicateurs et données](#), coordonné par Nicolas Carnot et Nicolas Riedinger,
- [Inflation](#), coordonné par Stéphane Dees,
- [Marché du capital](#), coordonné par Pierre-Louis Girard,
- [Marché du travail](#), coordonné par Carole Hentzgen et Michaël Orand,
- [Modélisation](#), coordonné par Jérôme Trinh,
- [Productivité](#), coordonné par Anne Epaulard,
- [Sobriété](#), coordonné par Aude Pommeret.

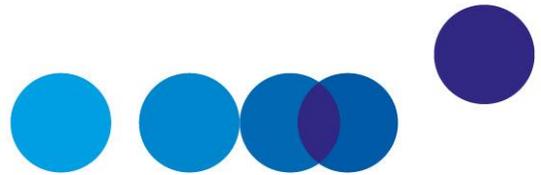
Ce rapport thématique consacré à l'impact du changement climatique sur la productivité était placé sous la direction d'Anne Epaulard (France Stratégie), en collaboration avec Aude Pommeret (université Savoie Mont-Blanc et France Stratégie) et Katheline Schubert (PSE et université Paris 1 Panthéon-Sorbonne).



SOMMAIRE

Synthèse	5
Introduction	7
Chapitre 1 – Éléments théoriques et empiriques	9
1. Canaux de transmission directs et indirects des réglementations et taxes environnementales sur les entreprises et les secteurs	9
2. Mesurer l’impact des réglementations et des taxes environnementales sur la productivité des entreprises et des secteurs	12
2.1. Les premiers travaux empiriques sur l’effet des réglementations environnementales sur la productivité des entreprises sont peu conclusifs	13
2.2. Des travaux empiriques plus récents soulignent des effets hétérogènes selon les entreprises et selon les pays	14
3. Mesurer l’impact des réglementations environnementales sur les activités de R & D des entreprises	15
3.1. Les réglementations environnementales induisent des innovations vertes.....	16
3.2. Les efforts de R & D dans l’énergie verte réduisent ceux dans d’autres domaines, principalement dans les énergies fossiles.....	17
3.3. Les innovations dans les énergies vertes ont des effets positifs sur les innovations dans les autres secteurs.....	18
Chapitre 2 – L’impact sur la productivité du travail dans les modèles de croissance avec progrès technique dirigé	21
1. Deux modèles canoniques	21
1.1. L’approche d’Acemoglu, Aghion, Bursztyn et Hémous.....	23
1.2. La prise en compte du progrès technique qui économise l’énergie	25

2. Quelle est l'ampleur de la réduction de la productivité associée à la transition énergétique ?.....	26
2.1. Un modèle calibré sur l'économie française.....	27
2.2. Un modèle calibré sur l'économie américaine avec des spillovers de recherche entre secteurs et des possibilités de substitution entre énergie fossile et énergie verte	28
2.3. Un modèle calibré sur l'économie mondiale.....	30
Conclusion et leçons pour la science économique	35
Bibliographie	37



SYNTHÈSE

Les réglementations environnementales sont souvent perçues comme un poids pour l'activité économique, au moins à court et à moyen termes. À court terme, quelle que soit leur forme – normes, taxation –, ces politiques augmentent les coûts de production et restreignent l'éventail des technologies disponibles, ce qui réduit la productivité. Des effets indirects peuvent limiter ces pertes de productivité mais probablement pas les annuler. Dans le même temps, l'hypothèse émise par Michael Porter au début des années 1990 considérait que des réglementations environnementales bien conçues, en encourageant l'innovation, permettaient des gains de rentabilité et de productivité pouvant plus que compenser le coût des politiques. Même sous cette hypothèse favorable, comme l'innovation met du temps à se concrétiser, l'effet de la transition énergétique sur la productivité sera probablement négatif à court terme. C'est aussi l'enseignement des modèles de croissance dans lesquels les activités de R & D s'orientent vers les secteurs où elles sont le plus rentables (« progrès technique dirigé »).

Dans ce contexte, pour le décideur, la question est d'identifier les politiques susceptibles de déclencher et d'accompagner la transition énergétique qui génèrent possiblement un impact positif sur le taux de croissance de la productivité à long terme, tout en minimisant l'impact négatif de court terme sur la productivité.

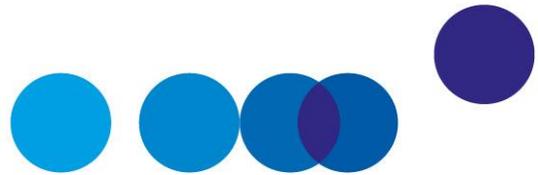
La conclusion principale des approches théoriques et empiriques disponibles est que par rapport à un scénario fictif dans lequel aucune politique environnementale ne serait mise en place, la productivité (du travail) sera réduite pendant la période de transition vers une économie décarbonée. Une fois la transition achevée, on ne peut exclure que l'innovation permette de dépasser la croissance du scénario fictif. Plutôt que de comparer à un scénario fictif dont on espère qu'il ne se réalisera pas, une autre façon de présenter cette conclusion principale est de dire qu'il faut s'attendre à ce que, pendant la période de transition vers une économie décarbonée, la productivité du travail croisse moins vite que sur la période récente – où sa croissance est déjà très faible.

Les simulations de modèles de croissance avec progrès technique endogène calibrés pour reproduire des faits stylisés des économies développées aboutissent cependant à des pertes de productivité ou de croissance potentiellement importantes, mais que des bonnes

politiques environnementales peuvent réduire. Un modèle calibré pour l'économie française laisse penser que la perte de croissance (ou de productivité du travail) associée à une réduction de 75 % de l'utilisation de l'énergie fossile à l'horizon 2050 serait de l'ordre de 0,3 point de pourcentage par an, alors même que la croissance de la productivité a été très faible ces dernières années (de l'ordre de 1 % par an depuis la crise financière). Mais ce chiffrage ne suppose pas que les politiques mises en œuvre sont les meilleures. Cette baisse du taux de croissance pendant la transition s'accompagne d'une perte de bien-être importante pour les ménages. Sur données américaines, un chiffrage assez fruste laisse penser qu'une amélioration de l'efficacité énergétique de 1 % par an se traduit par une baisse de la croissance de la productivité globale des facteurs (PGF) de 0,1 % par an. Cela peut paraître peu, mais signifie tout de même que doubler l'efficacité des énergies fossiles se traduit donc par un PIB de 10 % inférieur à sa tendance. Mais là encore, ce chiffrage ne suppose pas que les « meilleures » politiques sont mises en œuvre.

La seconde conclusion est précisément que l'ampleur du ralentissement de la productivité dépend des politiques menées pour déclencher et accompagner la transition, et de la rapidité avec laquelle les politiques environnementales sont amorcées. Plus on persiste sur le sentier d'innovation brun, plus il sera difficile et coûteux de réorienter l'économie sur un sentier d'innovation verte. Il existe un mix optimal de taxe environnementale et de subvention à la R & D dans les secteurs verts. Des politiques crédibles et annoncées suffisamment à l'avance permettent une transition à moindre coût.

La dimension internationale des politiques environnementales (notamment leurs effets sur la compétitivité) et l'économie politique des décisions environnementales sont absentes de la plupart des travaux passés en revue dans ce rapport. Leur prise en compte aboutirait à une vision plus négative quant à l'impact de la transition énergétique sur la croissance de la productivité. La dimension internationale prendrait mieux en compte les risques de pertes de compétitivité des économies européennes si tous les pays n'engagent pas la transition énergétique aussi rapidement. Enfin, l'ensemble des études citées dans ce rapport suppose que la transition énergétique passe par une tarification carbone (et non par des normes ou des subventions autres que des subventions à la R & D) : en pratique, la difficile acceptation sociale de la tarification carbone incite les pouvoirs publics à recourir à des mécanismes moins efficaces, avec des impacts sur la productivité selon toute vraisemblance plus dégradés.



INTRODUCTION

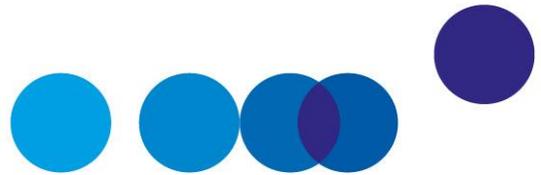
Les réglementations environnementales, dont celles visant à assurer la transition énergétique, sont souvent perçues comme un poids pour l'activité économique, au moins à court et à moyen termes. À court terme, quelle que soit leur forme (normes, taxation) ces politiques augmentent les coûts de production et restreignent l'éventail des technologies disponibles, ce qui réduit la productivité. Des effets indirects peuvent limiter ces pertes de productivité mais probablement pas les annuler. Dans le même temps, l'hypothèse émise par Porter au début des années 1990 considérait que des réglementations environnementales bien conçues, en encourageant l'innovation, permettaient des gains de rentabilité et de productivité pouvant plus que compenser le coût des politiques¹. Même sous cette hypothèse favorable, comme l'innovation met du temps à se concrétiser, l'effet de la transition énergétique sur la productivité sera probablement négatif à court terme. C'est aussi l'enseignement des modèles de croissance avec progrès technique dirigé. Dans certaines configurations, la décroissance est la seule solution pour assurer la transition.

Dans ce contexte, pour le décideur, la question est d'identifier les politiques susceptibles de déclencher et d'accompagner la transition énergétique qui génèrent possiblement un impact positif sur le taux de croissance de la productivité à long terme tout en minimisant l'impact négatif de court terme sur la productivité. Les subventions jouent alors un rôle crucial en plus des normes et de la fiscalité.

Le premier chapitre présente les canaux de transmission des réglementations environnementales (normes et fiscalité) à la productivité d'un point de vue à la fois théorique et empirique. On s'intéresse en particulier à l'impact de ces réglementations sur la rentabilité et la productivité ainsi que sur les efforts de R & D des firmes et les innovations. Le deuxième chapitre présente les principaux résultats théoriques en équilibre général, c'est-à-dire en tenant compte des rétroactions des politiques sur l'équilibre macroéconomique. Cette partie est centrée sur les modèles de croissance

¹ Porter M. (1990), « America's green strategy », *Scientific American*, vol. 264/4, p. 168 et Porter M. et Van der Linde C. (1995), « [Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship](#) », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 9/4, p. 97-118.

avec progrès technique dirigé qui se sont imposés comme le cadre d'analyse pertinent pour évaluer les effets des politiques environnementales sur la productivité pendant la transition et une fois celle-ci achevée. Quelques-uns de ces modèles ont été calibrés sur données américaines, françaises ou mondiales et prennent en compte des résultats des études empiriques décrites dans le premier chapitre. Ces modèles calibrés permettent d'évaluer l'ampleur des impacts à attendre de la transition énergétique sur la productivité en fonction des différents horizons (et des politiques menées). La conclusion s'intéresse aux leçons à tirer pour les décisions politiques de déclenchement et d'accompagnement de la transition économique.



CHAPITRE 1

ÉLÉMENTS THÉORIQUES ET EMPIRIQUES

1. Canaux de transmission directs et indirects des réglementations et taxes environnementales sur les entreprises et les secteurs

Le respect des réglementations environnementales et les taxes environnementales obligent les entreprises à consacrer une partie de leurs intrants à réduire la pollution ou à limiter la production. Les taxes environnementales, les permis d'émission négociables ou les redevances imposent un coût supplémentaire aux consommateurs et augmentent les coûts de production des firmes. Les normes d'émission limitent la gamme des technologies de production disponibles et renchérissent les biens auxquels elles s'appliquent. L'effet direct de court terme sur la productivité du travail est négatif ou au mieux neutre. Le raisonnement est le suivant : en l'absence d'imperfections de marché, si la productivité pouvait être augmentée en réduisant les externalités environnementales, les entreprises le feraient même en l'absence de politique environnementale. En se propageant aux secteurs aval de l'économie, une réglementation ou une taxe environnementale appliquée dans les secteurs amont de l'économie peut aussi détériorer leur productivité même s'ils ne sont pas touchés directement par la politique. À l'inverse, on peut imaginer des cas où, dès le court terme, les politiques environnementales améliorent la productivité de certaines activités spécifiques. Par exemple, les industries utilisant l'eau comme intrant peuvent bénéficier du fait que l'eau devient plus propre, grâce à la réduction des intrants consacrés à sa purification¹. Mais ces cas sont probablement rares.

¹ Jaffe A. B., Peterson S. R., Portney P. R. et Stavins R. N. (1995), « [Environmental regulation and the competitiveness of U.S. manufacturing: What does the evidence tell us?](#) », *Journal of Economic Literature*, vol. 33(1), mars, p. 132-163.

À l'effet négatif de court terme peuvent s'ajouter des effets indirects qui le renforcent ou le compensent. Dans des visions optimistes, les effets indirects peuvent même plus que compenser l'effet direct, de telle sorte que l'effet final des politiques environnementales est positif sur la productivité.

Les réglementations et les taxes environnementales peuvent en effet révéler des possibilités d'innovation, d'amélioration, de changements organisationnels ou d'utilisation des facteurs de production au sein des firmes qui sont favorables à la productivité mais que les firmes ignoraient du fait d'asymétries d'information ou de rationalité limitée¹. Une réglementation et des taxes environnementales qui créent des incitations à innover peuvent augmenter le taux de croissance de la productivité, via l'invention et l'adoption de nouvelles technologies. C'est l'hypothèse initialement énoncée par Michael Porter au début des années 1990 et largement débattue depuis (voir Encadré 1 page suivante).

Des effets indirects positifs sur la productivité peuvent apparaître via d'autres canaux que des changements dans la façon de produire des firmes. Tout d'abord, la réglementation environnementale, en imposant des coûts supplémentaires, peut aboutir à l'éviction des entreprises les moins efficaces, à l'entrée de nouvelles firmes qui disposent de technologies nouvelles et à la réallocation des moyens de production des entreprises les moins productives vers les plus productives. En conséquence, les taxes et réglementations environnementales peuvent augmenter la productivité dans les secteurs touchés². Ensuite, la réglementation environnementale peut aboutir à la création de nouvelles activités qui, autrement, n'existeraient pas ou ne bénéficieraient pas d'économies d'échelle. Par ailleurs, une hausse de la productivité du travail peut résulter de la réduction des effets néfastes de la pollution atmosphérique sur la santé des travailleurs³. À cette liste on peut ajouter un dernier bénéfice lié à un éventuel « double-dividende » au niveau macroéconomique qui proviendrait d'une réduction de taxes distorsives financée par le rendement de la taxe environnementale.

¹ Les barrières aux investissements dans l'efficacité énergétique peuvent être classées comme suit : a) comportementales, c'est-à-dire l'incapacité à traiter pleinement les informations dans l'entreprise, b) organisationnelles, c'est-à-dire le manque de culture climatique dans l'organisation et enfin c) économiques, c'est-à-dire l'imperfection et l'asymétrie de l'information, les coûts et risques cachés. Voir Sorrell S., Schleich J., O'Malley E. et Scott S. (2004), *The Economics of Energy Efficiency: Barriers to Cost-Effective Investment*, Cheltenham, Edward Elgar.

² Ce fait est bien documenté empiriquement. Copeland *et al.* (2022) en font même un fait stylisé : au sein d'une industrie, les firmes les plus efficaces sont également celles qui ont la plus faible intensité polluante. Voir Copeland B. R., Shapiro J. S., Taylor M. S. (2022), « Globalization and the environment », in Gopinath G., Helpman E. et Rogoff K. (dir.), *Handbook of International Economics*, Elsevier, vol. 5, p. 61-146.

³ Graff Zivin J. et Neidell M. (2012), « The impact of pollution on worker productivity », *American Economic Review*, vol 102(7), p. 3652-3673.

Encadré 1 – L'hypothèse de Porter

Ce qu'il est convenu d'appeler « Hypothèse de Porter » vient d'un article de Michael Porter et Claas van der Linde publié en 1995 clarifiant un premier article de Porter publié en 1990¹. Porter a fait valoir que les effets indirects d'instruments de politique environnementale bien conçus peuvent inciter les entreprises à innover, et accroître ainsi la productivité donc la rentabilité. Ces gains de productivité liés à l'innovation peuvent aller jusqu'à compenser l'augmentation des coûts de réduction des émissions.

L'hypothèse de Porter a suscité beaucoup de scepticisme. Les critiques se concentrent généralement sur l'argument selon lequel si des opportunités productives existaient, elles seraient déjà exploitées par les entreprises. La principale raison pour laquelle l'hypothèse de Porter serait valide viendrait alors d'imperfections du marché qui empêchent les entreprises de mettre en œuvre certaines actions pourtant rentables.

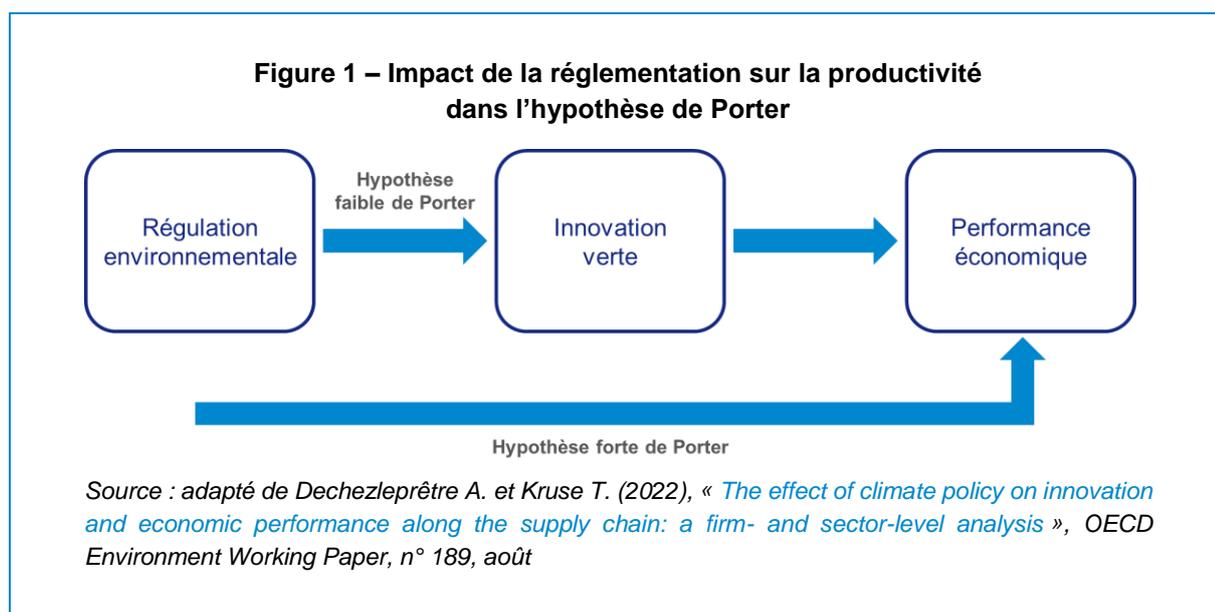
L'hypothèse de Porter a donné lieu à de nombreuses études empiriques qui toutes essaient d'évaluer la relation entre la réglementation environnementale, l'innovation et la performance économique. L'hypothèse a aussi été réinterprétée par Jaffe et Palmer (1997)² qui en proposent deux versions afin de faciliter l'élaboration des tests empiriques et l'interprétation des résultats.

Dans la version « forte », la réglementation incite les entreprises à trouver de nouveaux produits ou procédés qui non seulement leur permettent de respecter la réglementation mais accroissent aussi leur productivité. Selon cette version, les avantages de la réglementation font plus que compenser les coûts. Ce qui est alors testé, c'est l'impact de la réglementation sur la productivité sans se préoccuper du maillon initial de la chaîne causale qui passe par l'innovation décrite par Porter (voir Figure 1 ci-dessous). C'est cette version forte de l'hypothèse qui a initialement fait l'objet d'études empiriques, avec des résultats en moyenne peu concluants.

Dans la version « faible » de l'hypothèse de Porter, la réglementation environnementale stimule l'innovation des entreprises pour leur permettre de réduire les coûts de mise en conformité. Cette version n'indique pas si l'innovation est bonne ou mauvaise pour la performance économique de l'entreprise. C'est cette version « faible » qui fait désormais l'objet des tests empiriques. Ces derniers permettent aussi de nourrir les modèles de croissance endogène avec progrès technique dirigé dont le cœur est précisément l'impact de la réglementation sur l'innovation.

¹ Porter M. (1990), « America's green strategy », *Scientific American*, vol. 264/4, p. 168 et Porter M. et Van der Linde C. (1995), « [Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship](#) », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 9/4, p. 97-118.

² Jaffe A. B. et Palmer K. (1997), « Environmental regulation and innovation: A panel data study », *The Review of Economics and Statistics*, vol. 79(4), p. 610-619.



2. Mesurer l'impact des réglementations et des taxes environnementales sur la productivité des entreprises et des secteurs

De nombreuses études empiriques se sont attachées à mesurer les effets des taxes et des réglementations environnementales (et des prix de l'énergie) sur la productivité des entreprises¹. L'accent est le plus souvent mis sur les effets de court terme et moins sur les effets de plus long terme. Quelques études se sont attachées cependant à mesurer à la fois l'effet de court terme et l'effet de moyen terme des politiques environnementales. Nous reprenons ici leurs principaux résultats. Les travaux les plus anciens ne sont pas concluants, certains identifiant un effet positif à moyen terme de ces politiques quand d'autres concluent à un effet durablement négatif ou non significatif². Des travaux plus récents, menés par l'OCDE, exploitent les différences de réglementation et taxes environnementales entre les pays pour mesurer l'impact des réglementations et des hausses de prix de l'énergie. Ces travaux montrent qu'un effet positif des réglementations et/ou taxes environnementales s'observe sur les entreprises les plus efficaces, dans les

¹ Le mot « productivité » désigne, selon les cas, la productivité du travail, la productivité totale des facteurs ou la rentabilité de l'entreprise. Il ne nous a pas semblé utile de séparer les études selon la variable d'intérêt. Par ailleurs, dans les modèles de croissance endogène passés en revue dans le deuxième chapitre, la productivité du travail et la productivité totale des facteurs évoluent au même taux.

² Pour une revue complète, voir Kozluk T. et Zipperer V. (2014), « [Environmental policies and productivity growth – a critical review of empirical findings](#) », *OECD Journal: Economic Studies*, vol. 2014(1).

pays où la réglementation est déjà la plus stricte (ce qui augmente la familiarité des entreprises aux technologies disponibles), et sur les entreprises qui ne font pas face à des contraintes de financement. Les effets sont plus nettement positifs au niveau sectoriel, du fait des sorties d'entreprises les moins productives. Une étude récente de la Banque européenne d'investissement¹ donne du crédit à l'hypothèse selon laquelle des gisements de productivité liés aux changements entrepris pour respecter les politiques environnementales sont ignorés des firmes.

2.1. Les premiers travaux empiriques sur l'effet des réglementations environnementales sur la productivité des entreprises sont peu conclusifs

Managi *et al.* (2005)² ont travaillé sur l'industrie pétrolière et gazière offshore des États-Unis. Ils mesurent un impact négatif des réglementations environnementales sur la croissance de la productivité la première année, impact qui devient positif dès la deuxième année et l'effet cumulé l'emporte sur l'impact négatif initial après la quatrième année. Lanoie *et al.* (2008)³ obtiennent des résultats similaires pour le secteur manufacturier canadien : l'effet de court terme négatif sur la croissance de la productivité est compensé après trois années. De même, pour le secteur manufacturier taiwanais, Yang *et al.* (2012)⁴ trouvent un effet positif faible mais significatif après la deuxième année. Au contraire, Broberg *et al.* (2012)⁵ n'identifient pas d'effet significatif à long terme de la politique environnementale. Greenstone *et al.* (2012)⁶ étudient le secteur manufacturier aux États-Unis et constatent également un effet négatif même au bout de plusieurs années.

¹ Kalantzis F. et Niczyporuk H. (2021), « [Can European businesses achieve productivity gains from investments in energy efficiency?](#) », European Investment Bank, Working Paper, vol. 2021/07.

² Managi S., Opaluch J. J., Jin D. et Grigalunas T. A. (2005), « Environmental regulations and technological change in the offshore oil and gas industry », *Land Economics*, vol. 81(2), p. 303-319.

³ Lanoie P., Patry M. et Lajeunesse R. (2008), « Environmental regulation and productivity: Testing the Porter hypothesis », *Journal of Productivity Analysis*, vol. 30, p. 121-128.

⁴ Yang C.-H., Tseng Y.-H et Chen C.-P. (2012), « [Environmental regulations, Induced R & D, and Productivity: Evidence from Taiwan's Manufacturing Industries](#) », *Resource and Energy Economics*, vol. 34, p. 514-532.

⁵ Broberg T., Marklund P.-O., Samakovlis E. et Hammar H. (2012), « Testing the Porter hypothesis: The effects of environmental investments on efficiency in Swedish industry », *Journal of Productivity Analysis*, vol. 40(1), p. 43-56.

⁶ Greenstone M., List J. et Syverson C. (2012), « The effects of environmental regulation on the competitiveness of US manufacturing », *NBER Working Paper Series*, n° 18392, National Bureau of Economic Research, Cambridge Massachusetts.

2.2. Des travaux empiriques plus récents soulignent des effets hétérogènes selon les entreprises et selon les pays

Par construction, les résultats des études citées ci-dessus sont très dépendants du contexte dans lequel les mesures environnementales ont été mises en œuvre. La généralisation de leurs résultats est impossible. Afin de dépasser ces limites, l'OCDE a depuis quelques années développé un indicateur d'intensité de la régulation environnementale (EPS pour Environmental Policy Stringency)¹. Cet indicateur est ensuite utilisé pour mesurer l'impact sur la productivité totale des facteurs (la TFP) de la réglementation environnementale. Une étude récente de l'OCDE s'intéresse à l'évolution de la productivité au niveau sectoriel et au niveau des firmes pour 17 pays de l'OCDE sur la période 1990-2009. Les résultats² suggèrent qu'une meilleure protection de l'environnement est associée à une hausse de la productivité dès le court terme au niveau sectoriel dans les pays qui sont à la frontière technologique. Au niveau des firmes, seules les plus productives engrangent des gains de productivité, les moins productives voyant leur productivité baisser. Les auteurs de l'étude attribuent les différences de résultats entre le niveau sectoriel et le niveau individuel par le fait que les firmes les moins productives disparaissent ou perdent des parts de marché au profit des plus grandes. Les résultats semblent aussi montrer que les instruments liés au marché sont davantage favorables à la productivité que ceux basés sur des normes.

Sur données d'établissements de firmes françaises, Marin et Vona (2021)³ estiment qu'une augmentation de 10 % des prix de l'énergie au niveau de l'établissement entraîne dès le court terme une réduction de 5 % de la consommation d'énergie et de 11 % des émissions de CO₂. L'impact sur l'emploi est modeste (-0,8 %) mais fort sur la productivité totale des facteurs (-1,7 %). Au bout de 3 à 5 ans, les effets sont deux fois plus forts sur les émissions de CO₂ et l'emploi au niveau de l'établissement. Malheureusement, l'effet de moyen terme sur la productivité totale des facteurs n'est pas documenté. Des réallocations de l'emploi entre firmes tempèrent l'effet négatif sur l'emploi au niveau sectoriel et macroéconomique.

¹ Botta E. et Koźluk T. (2014), « Measuring environmental policy stringency in OECD countries: A composite index approach », *OECD Economics Department Working Papers*, n° 1177.

² Voir OCDE (2021), « Productivity growth, environmental policies and the Porter Hypothesis », in Dechezleprêtre A. et Kruse T. (dir.), *Assessing the Economic Impacts of Environmental Policies: Evidence from a Decade of OECD Research*, Paris, Éditions de l'OCDE ; et Albrizio S., Koźluk T. et Zipperer (2017), « Environmental policies and productivity growth: Evidence across industries and firms », *Journal of environmental Economics and Management*, vol. 81, p. 209-226.

³ Marin G. et F. Vona (2021), « The impact of energy prices on socioeconomic and environmental performance: Evidence from French manufacturing establishments, 1997-2015 », *European Economic Review*, vol. 135.

Dans un document de travail à paraître¹, l'OCDE montre, à partir d'un grand panel d'entreprises individuelles, qu'à la suite d'une hausse des prix de l'énergie, la productivité diminue dans des proportions significatives l'année suivant le choc (une hausse des prix de l'énergie de 5 % réduisant la productivité totale des facteurs de 0,4 %). Les entreprises sont d'autant plus affectées qu'elles opèrent dans des secteurs très intensifs en énergie, sont peu productives ou contraintes financièrement. À moyen terme, et pour certaines firmes (celles utilisant peu d'énergie notamment), l'effet sur la productivité peut devenir positif. Ces travaux laissent penser que l'effet positif sur la productivité passerait par un surcroît d'investissement des entreprises situées dans les pays où la réglementation environnementale est assez contraignante. La réglementation environnementale (présente ou annoncée) augmenterait la connaissance des dirigeants des technologies économes en énergie que la hausse des prix de l'énergie rendrait rentables.

Ce dernier point peut être rapproché de l'étude de Kalantzis *et al.* (2021)² qui utilise un échantillon de plus de 15 000 entreprises dans 28 États membres de l'Union européenne en 2018-2019. L'analyse menée montre une relation positive et causale entre les investissements dans l'efficacité énergétique et la productivité du travail. Au-delà de la réduction de leur consommation d'énergie, les investissements dans l'efficacité énergétique augmenteraient aussi la productivité du travail, ce que les entreprises ne prendraient pas (suffisamment) en compte dans leurs décisions d'investissement.

3. Mesurer l'impact des réglementations environnementales sur les activités de R & D des entreprises

Dans la vision développée par Porter, si la productivité des firmes s'améliore à la suite d'une réglementation environnementale, c'est parce que les entreprises entreprennent des efforts de R & D, notamment pour modifier leur processus de production afin de se conformer à la régulation ou de réduire les coûts supplémentaires qu'elle engendre.

Face à la difficulté rencontrée par les études empiriques pour mettre en évidence un lien entre réglementation et productivité, il est naturel de se focaliser aussi sur le premier chaînon du raisonnement pour vérifier si, de fait, les dépenses de R & D répondent aux incitations réglementaires. Les résultats empiriques sont ici bien plus concluants que ceux portant sur la productivité : l'innovation et le progrès technique apparaissent sensibles aux incitations fournies par la réglementation environnementale et la version faible de l'hypothèse de Porter paraît validée par les données. On observe par ailleurs (i) un effet

¹ Demmou L., Costa H., Franco G. et C. André (2023), « Rising energy prices and productivity: short-run gain, long term gain », document préparé pour la réunion EPC WP1, 6-17 mars 2023, OCDE.

² Kalantzis F. et Niczyporuk H. (2021), « [Can European businesses achieve productivity gains...](#) », *op. cit.*

d'éviction de ces dépenses de R & D sur les dépenses de R & D d'autres secteurs de l'économie, et (ii) des spillovers des innovations dans les secteurs touchés par la réglementation environnementale vers les autres secteurs de l'économie. Une revue de cette littérature est proposée par Popp (2022)¹.

L'ensemble de ces résultats empiriques sur l'innovation induite sont cruciaux d'une part parce qu'ils donnent du poids à la démarche macroéconomique qui intègre explicitement dans les modèles de croissance endogène la possibilité d'un progrès technique dirigé (voir le deuxième chapitre) ; d'autre part parce que les effets d'évictions et de spillovers des activités de recherche sont des paramètres importants de ces modèles.

3.1. Les réglementations environnementales induisent des innovations vertes

Les premières études sur l'innovation induite par la réglementation utilisent les dépenses visant à réduire la pollution comme approximation de la rigueur de la réglementation environnementale² et/ou l'effet de la variation des prix de l'énergie sur l'innovation³. Ces études confirment l'existence d'un progrès technique dirigé. Popp (2002) estime une élasticité à 5 ans des brevets verts au prix de l'énergie de 0,21.

Concernant l'industrie automobile, Crabb et Johnson (2010)⁴ montrent que des prix plus élevés de l'énergie stimulent l'innovation, avec une élasticité des brevets aux prix de l'énergie estimée à 0,24, mais les auteurs ne parviennent pas à mettre en évidence un effet des normes d'économie de carburant sur l'innovation. Aghion *et al.* (2016)⁵ s'intéressent à l'innovation dans l'industrie automobile mondiale. Des prix du carburant plus élevés incitent à davantage d'innovation dans les technologies propres, avec une élasticité estimée à environ 0,98 pour les seules technologies « propres » (véhicules

¹ Popp D. (2022), « Environmental policy and innovation: a decade of research », NBER WP, n° 25631.

² Parmi lesquelles Lanjouw J. O. et Mody A. (1996), « Innovation and the international diffusion of environmentally responsive technology », *Research Policy*, vol. 25, p. 549-571 ; Jaffe A. B. et Palmer K. (1997), « Environmental regulation and innovation: A panel data study », *Review of Economics and Statistics*, vol. 79, p. 610-619 ; et Brunnermeier S. et Cohen M.A. (2003), « Determinants of environmental innovation in US manufacturing industries », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 45, p. 278-293.

³ Parmi lesquelles Newell R., Jaffe A. B. et R. Stavins (1999), « The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change », *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 114(3), p. 941-975 ; et Popp D. (2002), « Induced innovation and energy prices », *American Economic Review*, vol. 92(1), p. 160-180.

⁴ Crabb J.M. et Johnson D.K.N. (2010), « Fueling innovation: The impact of oil prices and CAFE Standards on energy-efficient automotive technology », *The Energy Journal*, vol. 31(1), p. 199-216.

⁵ Aghion P., Dechezleprêtre A., Hemous D., Martin R. et Van Reenen J. (2016), « Carbon taxes, path dependency and directed technical change: Evidence from the auto industry », *Journal of Political Economy*, vol. 124, p. 1-51.

électriques et hybrides) et une élasticité comprise entre 0,4 et 0,6 si l'on inclut les technologies « grises » (l'efficacité énergétique des moteurs à combustion interne). Les autres politiques (réglementation des émissions et subventions à la R & D) auraient moins d'effet sur l'innovation. Cette étude met aussi en évidence un phénomène de « dépendance au sentier » de l'innovation : les entreprises ayant déjà innové dans les technologies propres sont davantage susceptibles d'innover dans ce domaine que les entreprises ayant innové dans les technologies sales.

Calel et Dechezleprêtre (2016)¹ comparent l'innovation à faible émission de carbone dans les entreprises « réglementées » – c'est-à-dire celles ayant au moins une usine couverte par l'EU-ETS – à un groupe de contrôle apparié d'entreprises « non réglementées », c'est-à-dire n'ayant pas de telles usines. Les entreprises réglementées produisent davantage (+36 %) de brevets à faible teneur en carbone que les entreprises non réglementées. Ils confirment ainsi l'hypothèse de progrès technique dirigé.

3.2. Les efforts de R & D dans l'énergie verte réduisent ceux dans d'autres domaines, principalement dans les énergies fossiles

Un autre axe de recherche empirique sur l'innovation verte s'intéresse aux possibilités d'éviction, dans le secteur réglementé, des autres domaines de la R & D. À court et moyen terme, le nombre de chercheurs est donné et les chercheurs se répartissent entre les différents domaines de la recherche donnant lieu à des effets d'éviction de la recherche entre secteurs. Se pose alors la question du type de R & D qui est évincée par la recherche verte. Dans le meilleur des cas, seule la recherche dans les technologies polluantes est évincée, ce qui favorise la transition énergétique, mais détériore la rentabilité des entreprises. Toutefois, il est possible que la R & D verte évince celle visant à améliorer la productivité du travail. Dans ce cas, tout en favorisant la transition énergétique, cela réduit la croissance de la productivité du travail.

Les études empiriques semblent montrer que la R & D verte n'évince que (ou au moins davantage) la R & D dans les technologies polluantes. Mais ces études sont encore trop rares pour que l'on puisse conclure définitivement.

Ainsi Popp et Newell (2012)² constatent qu'aux États-Unis, les brevets les plus susceptibles d'être évincés par la recherche sur les énergies alternatives sont ceux améliorant la

¹ Calel R. et Dechezleprêtre A. (2016), « Environmental policy and directed technological change: Evidence from the European carbon market », *Review of Economics and Statistics*, vol. 98, p. 173-191.

² Popp D. et Newell R. (2012), « Where does energy R & D come from? Examining crowding out from energy R & D », *Energy Economics*, vol. 34(4), p. 980-991.

productivité des combustibles fossiles, comme le raffinage et l'exploration de l'énergie¹. Fried (2018)² qui calibre un modèle macroéconomique sur données américaines obtient que c'est bien la R & D dans les énergies fossiles qui est évincée par la R & D verte.

Sur données d'entreprises européennes, Noailly et Smeets (2015)³ trouvent que sur la période 1978-2006, l'augmentation de la part des brevets sur les énergies renouvelables provient principalement de l'entrée de petites entreprises spécialisées dans les énergies renouvelables et de la sortie d'entreprises spécialisées dans les combustibles fossiles.

3.3. Les innovations dans les énergies vertes ont des effets positifs sur les innovations dans les autres secteurs

La question des retombées de l'innovation verte dans le reste de l'économie est cruciale pour l'impact de la transition énergétique sur la productivité. Si les brevets verts – ou dans les secteurs verts – n'influencent pas l'innovation dans le reste de l'économie, alors la R & D verte est « perdue » pour le reste de l'économie et pour la productivité du reste de l'économie. Au contraire, si les brevets verts nourrissent la recherche dans d'autres secteurs, la diversion des efforts de R & D vers la recherche verte est favorable à la croissance.

Les chercheurs utilisent les citations de brevets pour étudier les retombées des innovations énergétiques. Les brevets contiennent des citations de brevets antérieurs. Les citations reçues par un brevet renseignent sur l'utilité d'un brevet donné pour des inventions ultérieures. Ces citations peuvent être considérées comme des indicateurs des flux de connaissances et être utilisés pour mesurer les flux intra-sectoriels de la connaissance.

Nemet (2012)⁴ utilise les citations de brevets pour étudier les flux de connaissances inter-technologiques pour les brevets énergétiques accordés entre 1976 et 2006. La plupart des citations reçues par les brevets dans le domaine de l'énergie sont le fait de brevets non énergétiques, ce qui suggère que la recherche énergétique a une application générale. Sur données d'entreprises danoises, Bjørner et Mackenhauer (2013)⁵ fournissent des

¹ C'est aussi la conclusion dérivée de la calibration avec progrès technique dirigé d'un modèle sur données américaine par Fried (2018) – voir Chapitre 2.

² Fried S. (2018), « Climate policy and innovation: a quantitative macroeconomic analysis », *American Economic Journal: Macroeconomics*, vol. 10(1), p. 90-118.

³ Noailly J. et Smeets R. (2015), « Directing technical change from fossil-fuel to renewable energy innovation: An application using firm-level patent data », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 72, p. 15-37.

⁴ Nemet G. F. (2012), « Inter-technology knowledge spillovers for energy technologies », *Energy Economics*, vol. 34, p. 1259-1270.

⁵ Bjørner T.B. et Mackenhauer J. (2013), « Spillover from private energy research », *Resource and Energy Economics*, vol. 35, p. 171-190.

éléments plus contrastés. La R & D énergétique dans son ensemble offre des retombées ni plus ni moins importantes que d'autres types de R & D. Mais ces auteurs ne distinguent pas, parmi la R & D énergétique celle qui concerne les énergies vertes de celles qui concerne les énergies fossiles.

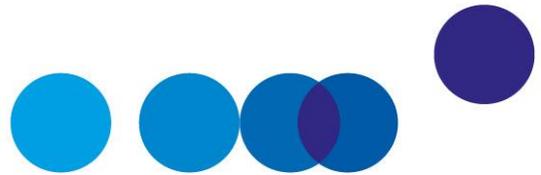
Dechezleprêtre *et al.* (2017)¹ comparent l'ampleur des retombées de connaissances des technologies propres et sales dans les secteurs de la production d'électricité et du transport. Les brevets propres génèrent des retombées de connaissances² plus importantes que ceux des technologies sales qu'ils remplacent. Par ailleurs, l'ampleur des retombées de connaissances dans les technologies propres est comparable à celle d'autres domaines technologiques émergents tels que l'informatique ou les nanotechnologies. Popp et Newell (2012) trouvent des preuves similaires, en comparant les brevets sur les énergies alternatives aux autres brevets des mêmes entreprises. Les brevets sur les énergies alternatives sont cités plus fréquemment et sont plus généraux que tous les brevets dans toutes les technologies, à l'exception de l'informatique.

Noailly et Shestalova (2017)³ s'intéressent aux spillovers de la recherche dans les énergies vertes en fonction du secteur spécifique de l'innovation verte. Elles mobilisent des données européennes sur les brevets de 1978 à 2006. Elles comparent les citations de brevets d'innovations dans le stockage de l'énergie, le solaire, l'éolien, l'énergie marine, l'hydroélectricité, la géothermie, l'énergie des déchets et l'énergie de la biomasse. L'énergie éolienne (10 % de plus) et le stockage de l'énergie (40 % de plus) génèrent davantage de citations que les brevets solaires. Tous les autres brevets génèrent moins de citations que les brevets solaires. Pour l'éolien, ces retombées se situent généralement dans le même domaine technologique. À l'inverse, le solaire et le stockage d'énergie génèrent des retombées à la fois dans et en dehors de leur propre domaine technologique.

¹ Dechezleprêtre A., Martin R. et Mohnen M. (2017), « Knowledge spillovers from clean and dirty technologies: A patent citation analysis », Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper n° 135.

² Les auteurs citent l'exemple d'un brevet portant sur l'amélioration d'un appareil de radiologie médicale faisant référence à un brevet portant sur le moteur électrique.

³ Noailly J. et Shestalova V. (2017), « Knowledge spillovers from renewable energy technologies: Lessons from patent citations », *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 22, p. 1-14.



CHAPITRE 2

L'IMPACT SUR LA PRODUCTIVITÉ DU TRAVAIL DANS LES MODÈLES DE CROISSANCE AVEC PROGRÈS TECHNIQUE DIRIGÉ

Les modèles de croissance avec progrès technique endogène prennent au sérieux l'hypothèse de progrès technique dirigé. Cette hypothèse considère que la R & D est une activité d'investissement motivée par le profit et que la direction de l'innovation réagit aux variations des prix relatifs. Fondés sur l'approche d'Acemoglu (2002)¹, ces modèles débouchent sur des conclusions qualitatives claires en matière de politiques environnementales et de leurs conséquences sur la croissance de la productivité. Hémoins et Olsen (2021)² proposent une revue de cette littérature. Dans un premier temps, nous présentons deux approches canoniques. Dans un second temps, nous nous intéressons aux résultats de modèles calibrés sur données françaises, américaines et mondiales pour avoir une idée de l'ampleur des effets à attendre.

1. Deux modèles canoniques

On s'intéresse ici à l'impact de la transition énergétique sur le PIB. Pour fixer les idées, on peut écrire une fonction de production combinant l'énergie fossile (e) avec un agrégat capital – travail avec une élasticité de substitution notée ε .

$$y_t = \left[(1 - \gamma)(A_t k_t^\alpha l_t^{1-\alpha})^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} + \gamma(A_{et} e_t)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \right]^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} \quad (1)$$

¹ Acemoglu D. (2002), « [Directed technical change](#) », *The Review of Economic Studies*, vol. 69(4), octobre, p. 781-809.

² Hémoins D. et Olsen M. (2021), « Directed technical change in labor and environmental economics », *Annual Review of Economics*, vol. 13, p. 571-597.

La fonction de production (1) est celle utilisée par Hassler, Krussel et Olovsson (2021)¹. Avec une telle représentation du côté offre de l'économie, une réduction de la consommation d'énergie fossile peut provenir de trois sources : (i) une baisse de la production ; (ii) une substitution du capital et du travail à de l'énergie ou une meilleure efficacité de l'agrégat capital-travail » et (iii) une augmentation de l'efficacité technique de l'énergie fossile (A_e)².

La discussion sur les effets d'une réduction des quantités d'énergie consommées sur la croissance et la productivité doit s'inscrire dans un modèle macroéconomique bouclé. Il n'est pas juste d'envisager qu'une baisse de la quantité d'énergie fossile consommée dans l'économie n'a pas d'effet sur les autres grandeurs.

En effet, comme discuté dans le chapitre précédent, l'évolution de l'efficacité de l'énergie nécessite des dépenses de R & D qui peuvent se faire au détriment des efforts en faveur de l'efficacité de l'agrégat capital-travail. Si les dépenses de R & D pour économiser l'énergie n'évincent pas la R & D dans les autres secteurs, elles évinceront l'investissement ou de la consommation. D'autres mécanismes sont susceptibles de jouer : une éventuelle substitution du travail et du capital à l'énergie implique une augmentation de l'épargne des ménages et/ou de l'offre de travail.

Par ailleurs, l'évolution des grandeurs qui entrent dans la production dépend des politiques qui sont menées pour déclencher la baisse du recours à l'énergie. Pour prendre l'exemple le plus simple, une taxe sur la consommation d'énergie n'aura pas les mêmes effets sur la consommation d'énergie et l'activité économique selon la façon dont le rendement de la taxe est utilisé (reversé de façon forfaitaire aux ménages ou utilisé pour subventionner la R & D dans l'un ou l'autre secteur).

Nous présentons ici deux modèles macroéconomiques environnementaux avec progrès technique dirigé. Le premier est celui de Acemoglu *et al.* (2012)³ centré sur les possibilités de développer des processus de production propres (pour se passer des processus de

¹ Hassler J., Krusell P. et Olovsson C. (2021), « Directed technical change as a response to natural resource scarcity », *Journal of Political Economy*, vol. 129(11), novembre, p. 3039-3072.

² Il est ici question d'énergie fossile, mais on pourrait aussi considérer l'énergie dans son ensemble. Comme le montre Casey (2023), « la comptabilité carbone montre que les améliorations de l'efficacité énergétique ont été le principal moteur des réductions à long terme de l'intensité en carbone de la production finale : les réductions de l'intensité carbone de la production ont tendance à se produire lorsque les biens d'équipement et les biens de consommation durables nécessitent moins d'énergie pour fonctionner, et non lorsqu'une économie utilise davantage de sources d'énergie renouvelables ou améliore la transformation de l'énergie primaire en énergie d'utilisation finale » ; Casey G. (2023), « [Energy efficiency and directed technical change: Implications for climate change mitigation](#) », *Review of Economic Studies*, mars.

³ Acemoglu D., Aghion P., Bursztyn L. et Hémous D. (2012), « [The environment and directed technical change](#) », *American Economic Review*, vol. 102(1), février, p. 131-166.

production polluants), le second est celui de Hassler *et al.* (2021)¹ dont l'analyse est centrée sur le développement de technologies qui augmentent l'efficacité de l'énergie dans le processus de production.

Dans ces deux approches, la transition énergétique est coûteuse en termes de croissance de la productivité et donc de croissance pendant la transition. La nécessité d'orienter le progrès technique vers le développement de technologies propres (dans le premier cas) ou de technologies qui économisent l'énergie (dans le second cas) réduit la croissance. Cependant, les politiques optimales ne sont pas les mêmes. L'approche Acemoglu *et al.* (2012) préconise d'accompagner une taxe sur les énergies fossiles d'une subvention à la R & D, alors que dans l'approche d'Hassler *et al.* (2021) la hausse du prix de l'énergie déclenchée par une taxe est suffisante pour que le progrès technique se dirige suffisamment vers les technologies qui économisent l'énergie.

1.1. L'approche d'Acemoglu, Aghion, Bursztyn et Hémous

Acemoglu *et al.* (2012) ont proposé un modèle de croissance endogène avec progrès technique endogène dans lequel la production de bien final Y_t vient d'une combinaison de deux inputs : les biens sales Y_{st} et les biens propres Y_{pt} qui sont substituables, avec une élasticité de substitution entre ces deux biens notée ε .

$$Y_t = \left[Y_{st}^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} + Y_{pt}^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \right]^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}}$$

Le paramètre ε représente les possibilités de substitution entre l'énergie fossile et les autres inputs.

Les efforts de R & D permettent de réduire le coût de production des biens sales ou celui des biens propres. Ces efforts de R & D (et les chercheurs) s'orientent vers l'un ou l'autre de ces secteurs en fonction de la rentabilité de la recherche. Acemoglu *et al.* (2012) montrent que les efforts relatifs de R & D entre les deux secteurs dépendent de trois effets : (i) un effet prix (si le prix de l'énergie fossile augmente relativement à celui des biens propres, les efforts se portent vers la R & D qui augmente l'efficacité de l'énergie fossile) (ii) un effet « taille du marché » relative des secteurs propres et des secteurs sales et (iii) un effet de niveau de productivité relative des deux biens.

¹ Hassler J., Krusell P. et Olovsson C. (2021), « Directed technical change as a response to natural resource scarcity », *op. cit.*

Au total, l'innovation va se diriger vers un secteur ou l'autre en fonction des possibilités de substitutions entre les deux types de biens :

- Si l'élasticité de substitution est élevée (et s'il n'y a pas de spillovers de recherche entre les secteurs), l'effet prix relatif joue peu dans l'orientation de la recherche et celle-ci se dirige vers la technologie initialement la plus productive (la production de biens sales). Cela renforce encore l'avantage relatif de cette technologie en termes de productivité et favorise de surcroît la recherche dans ce domaine. C'est ce que Acemoglu *et al.* (2012) appellent la dépendance au sentier. Sans intervention publique, les biens propres ne se développent pas et nos objectifs climatiques ne sont pas atteints.
- Si au contraire l'élasticité de substitution est faible (ou si les biens sales et propres sont complémentaires), alors l'innovation va se diriger initialement vers le secteur le moins productif (les technologies propres) jusqu'à ce que la productivité de ce secteur rejoigne celui des biens sales. À terme, les productivités des deux secteurs s'égalisent et nos objectifs climatiques ne sont pas atteints non plus parce que les deux biens sont complémentaires : on ne peut se passer du bien sale. La seule façon de réduire l'utilisation du bien sale est la décroissance.

Les auteurs se placent dans la situation qu'ils jugent la plus réaliste dans laquelle l'élasticité de substitution entre biens sales et propres est supérieure à l'unité. Dans ces conditions, la politique optimale comprend plusieurs volets. La dépendance au sentier, repérée dans les études empiriques, justifie une action rapide de la puissance publique pour inciter les entreprises à innover dans le vert, même avec un taux d'actualisation élevé à la Nordhaus¹. Le coût à changer de sentier est en effet d'autant plus élevé que l'économie s'est engagée loin sur celui de l'innovation brune. La combinaison d'une taxe sur les émissions et d'une subvention à l'innovation apparaît pertinente. D'une part, une taxe carbone permet de s'assurer que le progrès technique soit bien dirigé vers les innovations propres. D'autre part, une politique industrielle portée par des subventions à la R & D permet d'internaliser l'externalité technologique et de garantir le rythme optimal de progrès technique. Si les possibilités de substitution sont suffisamment élevées (élasticité de substitution supérieure à 1,5 environ), la subvention peut même n'être que temporaire.

¹ Acemoglu *et al.* (2012), « [The environment and directed technical change](#) », *op. cit.* ; Gerglath R., Kverndokk S. et Einar Rosendahl K. (2009), « Optimal timing of climate change policy: Interaction between carbon taxes and innovation externalities », *Environmental and Resource Economics*, vol. 43(3), p. 369-390.

1.2. La prise en compte du progrès technique qui économise l'énergie

L'approche de Hassler, Krusell et Olovsson (2021)¹ se base sur la fonction de production (1). Ils considèrent que les possibilités de substitution entre l'énergie et l'agrégat capital-travail sont assez faibles à court terme (le paramètre ε est proche de zéro) et les innovations techniques permettant d'augmenter l'efficacité de l'énergie (A_e) mettent du temps à apparaître et ou se diffuser.

Compte tenu des difficultés de substitution entre l'énergie fossile et l'agrégat capital-travail, à très court terme seule la baisse de production peut permettre de réduire l'utilisation de l'énergie fossile. Mais les objectifs de réduction de l'utilisation de l'énergie fossile sont fixés à des horizons plus lointains (2030 et 2050). La question est donc de savoir si, à ces horizons, les substitutions vers l'agrégat capital-travail et son efficacité et/ou l'augmentation de l'efficacité de l'énergie fossile dans le processus de production peuvent permettre de réduire drastiquement l'utilisation de l'énergie fossile tout en maintenant de la croissance économique.

Comme l'énergie est complémentaire à l'agrégat capital-travail, l'effet qui domine pour l'orientation du progrès technique est l'effet prix. La hausse du prix de l'énergie oriente le progrès technique vers le développement de techniques qui économisent l'énergie et l'effet de productivité relative ne joue pas dans l'orientation du progrès technique. Avec une taxe carbone bien calibrée, les subventions à la R & D ne sont pas nécessaires. À long terme, l'économie croît sur un sentier de croissance où le progrès technique dirigé vers l'énergie croît plus vite que le progrès technique qui augmente l'efficacité du travail.

La calibration de la taxe carbone nécessaire à la transition énergétique est délicate. Elle dépend crucialement des paramètres de la fonction de production. Comme le montre Casey (2023)², le choix d'une fonction de production type Cobb-Douglas – par construction sans progrès technique dirigé³ mais où les possibilités de substitution du capital et du travail à l'énergie sont élevées – donne une image trop favorable de la trajectoire possible de réduction de l'utilisation de l'énergie fossile. Même si à long terme (une fois la transition achevée) le modèle Cobb-Douglas est proche d'un modèle avec faible substituabilité et progrès technique dirigé, les deux modèles diffèrent sur la vitesse de la transition. Avec faible substituabilité à court terme et progrès technique dirigé, la

¹ Hassler J., Krusell P. et Olovsson C. (2021), « Directed technical change as a response to natural resource scarcity », *op. cit.*

² Casey G. (2023), « [Energy efficiency and directed technical change...](#) », *op. cit.*, s'interroge sur la politique à mener pour que les émissions cumulées de gaz à effet de serre des États-Unis pour les cent prochaines années soient compatibles avec l'objectif d'un réchauffement de 2°.

³ Avec une fonction de production Cobb-Douglas, les activités de recherche augmentent l'efficacité de tous les facteurs dans la même proportion.

réduction de l'utilisation de l'énergie fossile est plus lente que dans un modèle Cobb-Douglas. En conséquence, une taxe carbone calibrée avec un modèle de type Cobb-Douglas risque de ne pas être suffisante pour assurer la vitesse souhaitable de réalisation de la transition énergétique.

2. Quelle est l'ampleur de la réduction de la productivité associée à la transition énergétique ?

Plusieurs chercheurs ont calibré des modèles macroéconomiques pour évaluer l'impact des mesures environnementales.

Nous analysons ici les modèles calibrés pour reproduire les séries macroéconomiques observées en France ou aux États-Unis puis qui introduisent des mesures de politiques économiques pour déclencher et accompagner la transition énergétique. Aucun de ces exercices n'est mené pour étudier l'impact sur la productivité et la croissance de la transition énergétique et les questions de recherche sont différentes d'un article à l'autre. Par exemple Henriet *et al.* (2014)¹ s'intéressent à la taille de la taxe carbone nécessaire pour réduire de 75 % les émissions de gaz à effet de serre en France. Le questionnement de Fried (2018)² est proche : il s'agit de mesurer la taille de la taxe carbone nécessaire aux États-Unis pour réduire de 30 % l'utilisation de l'énergie fossile. Jondeau *et al.* (2023)³ cherchent à identifier, au niveau mondial, le mix optimal entre taxe et subventions à la R & D dans les technologies d'abattement pour parvenir à l'objectif de zéro émissions nettes au niveau mondial. Dans ces articles, le coût de la transition énergétique est le plus souvent évalué en termes d'effet sur le bien-être. Il est néanmoins possible de réinterpréter les résultats en termes d'impact sur la productivité.

Les principaux résultats de ces simulations de modèles et de politiques visant à réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre sont les suivants :

- pendant la période de transition énergétique, la croissance économique est plus faible qu'en l'absence d'effort de réduction de l'utilisation de l'énergie. Le progrès technique dirigé facilite l'atteinte des objectifs de réduction de la consommation d'énergie fossile (par rapport au cas où le progrès technique n'est pas dirigé) au prix d'un plus grand ralentissement de la croissance pendant la période de transition ;

¹ Henriet F., Maggiar N. et Schubert K. (2014), « A stylized applied energy – Economy model for France », *The Energy Journal*, vol. 35(4), p. 1-37.

² Fried S. (2018), « Climate policy and innovation: a quantitative macroeconomic analysis », *American Economic Journal: Macroeconomics*, vol. 10(1), p. 90-118.

³ Jondeau E., Leveuge G., Sahuc J.-G. et Vermandel G. (2023), « [Environmental subsidies to mitigate net-zero transition costs](#) », Working Paper, n° 910, Banque de France, mars.

- une fois la transition effectuée, dans la plupart des calibrations disponibles, la croissance économique dans le nouvel état stationnaire est identique ou légèrement inférieure à celle qui prévalait avant la transition énergétique.

Ces résultats sont conformes à l'arbitrage présenté par Hassler *et al.* (2021)¹ qui évaluent sur données américaines qu'un gain d'efficacité de l'énergie de 1 % se traduit par une moindre croissance de la productivité de l'agrégat capital-travail de 0,1 %.

2.1. Un modèle calibré sur l'économie française

Henriet *et al.* (2014) considèrent une économie calibrée sur données françaises dans lequel à la fois les ménages et les entreprises utilisent de l'énergie fossile. Ces consommations d'énergie fossile sont en partie substituables à du capital (pour les entreprises) et à des biens durables (pour les ménages), le tout étant substituable à du travail dans la fonction de production des entreprises et à des services et biens non durables dans le cas des ménages. Toutes les élasticités de substitution sont égales à 0,5.

L'État taxe l'utilisation de l'énergie fossile (taxe carbone). Le rendement de cet impôt est reversé sous forme de transferts forfaitaires aux ménages, ou utilisé pour subventionner la R & D permettant les gains d'efficacité dans le secteur de l'énergie.

L'hypothèse concernant le progrès technique dirigé est la suivante : la part des dépenses de R & D dans le PIB (l'effort de recherche) est constante et exogène (hypothèse commune à l'ensemble des modèles), tandis que la répartition entre la R & D visant à améliorer l'efficacité énergétique et celle visant à augmenter la productivité du travail est endogène : elle dépend des bénéfices privés de la recherche dans les deux secteurs. La taxe carbone et les subventions à la recherche sont les deux outils à la disposition de l'État pour piloter la transition énergétique. Une autre hypothèse importante de ce modèle, reprise d'Acemoglu *et al.* (2012), est qu'il n'y a pas de spillover de recherche entre les deux secteurs : une innovation permettant d'accroître l'efficacité énergétique n'aura pas d'effet sur la productivité du travail. Par ailleurs, la probabilité de réussir à innover est constante (le rendement de la recherche n'est pas décroissant).

Les résultats des simulations sont assez pessimistes sur la capacité de l'économie française à parvenir à réduire la consommation d'énergie fossile de 75 % à l'horizon 2050. Même avec du progrès technique dirigé, l'instauration d'une taxe carbone de l'ampleur de celle suggérée par le rapport Quinet de 2009² ne permet de réduire la

¹ Hassler J., Krusell P. et Olovsson C. (2021), « Directed technical change as a response to natural resource scarcity », *op. cit.*

² Quinet A. (2009), *La valeur tutélaire du carbone*, Centre d'analyse stratégique, *Rapport et documents* n° 16, Paris, La Documentation française.

consommation d'énergie fossile que de 40 % au bout de quarante ans. Sans progrès technique dirigé, la même taxe permet de réduire la consommation de l'énergie fossile de seulement 25 % au bout de quarante ans. Dans un scénario où le rendement de la recherche dans le secteur de l'énergie est augmenté de 20 % grâce à une subvention, la consommation d'énergie fossile est réduite de 50 % environ au bout de quarante-cinq ans au prix d'une perte de croissance annuelle de l'ordre de 0,15 % sur la période, mais avec une perte plus importante sur les dix premières années (environ -0,4 % par an). La croissance de long terme n'est pas affectée. L'objectif de réduction de 75 % des émissions peut être atteint à l'horizon 2050 si le revenu de la taxe carbone est réinjecté dans l'économie sous forme de subvention à la R & D dans le secteur de l'énergie fossile mais au prix d'une réduction drastique de la R & D dans le reste de l'économie, aboutissant à éliminer toute croissance de la productivité du travail. Une taxe carbone plus importante (à la fois en niveau initial et en taux de croissance) que celle suggérée dans le rapport Quinet permet de réduire de 75 % la consommation d'énergie fossile au prix d'une réduction permanente de croissance d'environ 0,3 point de pourcentage par an en moyenne sur quarante-cinq ans qui persiste à long terme.

Ces résultats illustrent plusieurs choses. La taxe carbone – ou le renchérissement du prix de l'énergie fossile – permet la transition énergétique via un surcroît d'innovations dans le secteur énergétique. Cependant, comme l'innovation dans ce domaine se fait au détriment de l'innovation qui augmente la productivité du travail, l'effet négatif sur la croissance n'est pas négligeable.

2.2. Un modèle calibré sur l'économie américaine avec des spillovers de recherche entre secteurs et des possibilités de substitution entre énergie fossile et énergie verte

Il est intéressant de comparer les résultats de Henriet *et al.* (2014) avec ceux de Fried (2018) car la question de recherche est proche, mais les spécifications retenues différentes. Même si ce modèle est calibré sur données américaines, la comparaison des résultats permet d'identifier les hypothèses cruciales pour l'impact sur la croissance et la productivité des politiques environnementales destinées à assurer la transition énergétique. Fried (2018) développe un modèle de croissance avec progrès technique dirigé calibré sur données américaines. Dans le secteur du bien final, la fonction de production utilise de l'énergie et d'autres biens intermédiaires avec des possibilités de substitution faibles entre l'énergie et les autres inputs (élasticité de substitution de l'ordre de 0,05). La production de l'énergie résulte d'une combinaison d'énergie fossile¹ et d'énergie propre avec des possibilités de substitution entre les deux agrégats assez

¹ Dont une partie est importée.

élevées (élasticité de substitution de l'ordre de 1,5). Tous les biens intermédiaires sont produits par des technologies mêlant du travail et des machines spécifiques à chaque bien intermédiaire qui incorporent du progrès technique dirigé.

L'évolution de la productivité des machines spécifiques à chaque secteur dépend des efforts de R & D du secteur. Les efforts de R & D dans chaque secteur dépendent de la rentabilité de la recherche. Contrairement aux hypothèses retenues par Henriet *et al.* (2014), (i) le progrès technique d'un secteur bénéficie (en partie) aux deux autres secteurs (ce qui réduit le coût en croissance du progrès dirigé vers les secteurs de l'énergie) et (ii) à l'intérieur d'une période, le rendement de la recherche est décroissant (ce qui borne l'éviction de la R & D d'un secteur par celle des autres secteurs).

Le modèle est calibré sur la période 1953-2007. Une taxe carbone (sur les énergies fossiles) est introduite dans le modèle pour permettre de réduire les émissions de CO₂ (la consommation d'énergie fossile) de 30 % à un horizon de vingt ans. Cette taxe induit de larges mouvements dans l'innovation qui ont d'importants effets sur la consommation d'énergie et son efficacité. Par exemple, après vingt ans, la taxe induit un surcroît d'innovation de 50 % supérieur dans le secteur des énergies vertes et une diminution de 60 % dans le secteur de l'énergie fossile. La taxe carbone requise pour réduire de 30 % la consommation d'énergie fossile est de 30,30 dollars (de 2013) par tonne de CO₂ dans le modèle avec innovation exogène et de 24,50 dollars avec innovation endogène (soit 19,2 % de moins). L'innovation endogène réduit le coût en bien-être d'atteinte des objectifs de réduction des émissions¹. Par rapport à un modèle où l'innovation est exogène, le progrès technique dirigé affecte le bien-être par deux canaux opposés : la taxe carbone requise pour atteindre l'objectif est plus faible, mais la technologie verte étant initialement moins efficace (plus chère) que l'énergie fossile au moment où le gouvernement instaure la taxe, celle-ci déplace la demande vers une énergie moins productive. L'innovation endogène réduit ces pertes de productivité à mesure que les technologies vertes réduisent l'écart avec les énergies fossiles.

Comme dans Henriet *et al.* (2014) sur la France, il y a une tension entre, d'une part, l'innovation verte à court terme qui permet de réduire la consommation d'énergie fossile et, d'autre part, la croissance économique. À long terme, le sentier de croissance est inchangé. Si le coût en bien-être calculé sur les données américaines semble faible, c'est notamment du fait de l'hypothèse favorable sur les spillovers de connaissance entre les secteurs. Ainsi, les efforts de R & D dans le secteur vert bénéficient à la croissance de la productivité des deux autres secteurs, ce qui limite les pertes de croissance pendant la transition. Par ailleurs, la calibration des paramètres aboutit à ce que la R & D verte n'évince que la R & D dans le secteur de l'énergie fossile et pas dans le reste de

¹ Coût en équivalent consommation 0,3 % avec innovation endogène, 0,4 % avec innovation exogène.

l'économie. La structure du modèle de Henriët *et al.* (2014) n'offre pas cette possibilité, ni celle de spillovers de recherche entre secteurs, c'est peut-être la raison pour laquelle le coût de la transition en termes de croissance est si fort.

2.3. Un modèle calibré sur l'économie mondiale

Jondeau *et al.* (2023)¹ étudient eux aussi les politiques fiscales (taxes et subventions) pour assurer la transition énergétique au moindre coût en termes d'activité économique. Leur approche se place dans le cadre des modèles DSGE, usuellement destinés à analyser les fluctuations cycliques plutôt que les changements de régime de croissance. Néanmoins, les efforts nécessaires pour assurer la transition énergétique doivent être enclenchés et auront des conséquences dès le court terme, justifiant l'utilisation de ce type de modèle.

Pour déclencher la transition énergétique, un gouvernement mondial instaure une taxe carbone calibrée pour assurer l'objectif de zéro émissions nettes en 2060 au niveau mondial. En réaction, les entreprises achètent des processus leur permettant de réduire leurs émissions. Le secteur qui produit ces biens d'abattement est peu développé, la taxe carbone – dont le rendement est reversé aux ménages de façon forfaitaire – renchérit la demande pour ce secteur dont les prix augmentent alors. Le coût en termes de croissance de productivité du travail est élevé, surtout pendant les premières années (au bout de dix ans, le PIB mondial est inférieur de 7 % au niveau du scénario sans taxe, soit une perte de croissance de 0,7 point de pourcentage de la croissance de la productivité par an). Les auteurs étudient comment des subventions au secteur des biens d'abattement permettent d'attirer des nouvelles firmes dans ce secteur, ce qui augmente la productivité dans ce secteur. Dans un scénario où les subventions vont pour partie aux entreprises déjà en place et pour partie pour les « start-up », la baisse de la productivité est réduite de moitié pendant les dix premières années par rapport au scénario avec taxe carbone seule (par rapport au scénario sans politique environnementale, la croissance annuelle est réduite de 0,35 point de pourcentage pendant la période de transition). La taxe carbone nécessaire pour assurer le net zéro à l'horizon 2060 est aussi réduite de moitié.

¹ Jondeau E., Levieuge G., Sahuc J.-G. et Vermandel G. (2023), « [Environmental subsidies to mitigate net-zero transition costs](#) », *op. cit.*

Encadré 2 – Quels rôles pour les taxes et les subventions dans la transition énergétique ?

Les modèles macroéconomiques présentés dans ce document sont le plus souvent utilisés non pas pour mesurer l'impact de la transition énergétique sur la productivité mais plutôt pour identifier la politique fiscale optimale et notamment les rôles respectifs de la taxation des énergies fossiles et des subventions aux dépenses de R & D.

Politiques optimales en économie fermée

Dans le modèle initial d'Acemoglu *et al.* (2012) et Acemoglu *et al.* (2016)¹ la politique fiscale optimale consiste à taxer l'utilisation des biens sales et à subventionner la R & D dans les biens propres. Cette recommandation repose sur le fait que la taxation de l'énergie accroît la demande pour les biens propres au détriment des biens polluants. Les subventions à la R & D permettent d'assurer que le saut de connaissances nécessaire pour rendre les technologies propres aussi performantes (économiquement) que les technologies sales ait lieu suffisamment tôt afin de réduire le coût en croissance de la transition énergétique. Le besoin de subventionner la R & D repose sur l'hypothèse de possibilités de substitutions élevées entre les technologies propres et les technologies sales. Un grand nombre de travaux théoriques et empiriques ultérieurs ont confirmé le fait que les subventions à la R & D propre permettent de réduire le coût de la transition énergétique. Hart (2019)² montre que les taxes sur les émissions apparaissent bien plus décisives que les subventions à la recherche. Selon ses chiffres, un régulateur incapable de taxer aura du mal à atteindre les objectifs de réduction des émissions – sauf à accepter une perte importante en bien-être, là où un régulateur incapable de subventionner y parviendra plus facilement. L'ampleur des besoins de subventions de la R & D dans les technologies propres dépend cependant de paramètres assez peu connus, comme par exemple les retombées intersectorielles de la recherche (Fried, 2018). Si celles-ci sont importantes, le besoin de subventionner la R & D dans les technologies propres est moindre. Un débat existe aussi sur le besoin de subventionner la R & D qui augmente l'efficacité du capital et du travail, plutôt que la R & D des énergies vertes³.

¹ Acemoglu D., Akcigit U., Hanley D. et Kerr W. (2016), « Transition do clean technology », *Journal of Political Economy*, vol. 214(1), février, p. 52-104.

² Hart (2019), « To everything there is a season: carbon pricing, research subsidies, and the transition to fossil-free energy », *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, vol. 6(2), mars.

³ Voir Casey (2023), « [Energy efficiency and directed technical change...](#) », *op. cit.* ; et Golosov M., Hassler J., Krusell P. et Tsyvinski A. (2014), « Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium », *Econometrica*, vol. 82, p. 41-88.

L'approche de Hassler *et al.* (2021)¹ se démarque de ces modèles. La complémentarité entre l'énergie et les autres facteurs de production et la taxation de l'énergie suffisent à assurer le niveau nécessaire de R & D dans l'efficacité énergétique et les subventions ne sont pas indispensables pour la transition énergétique.

Politiques effectives

Les modélisations présentées ci-dessus ne prennent pas en compte deux dimensions : la dimension internationale (les modèles sont « en économie fermée ») et l'économie politique de la transition énergétique.

Alors que les économistes s'accordent pour soutenir la tarification du carbone – via une taxe ou un système de plafonnement et d'échange –, il y a un écart entre le niveau de tarification nécessaire à la transition et les niveaux mis en œuvre. De fait, dans plusieurs pays, la perspective d'une augmentation de la taxe carbone a suscité une forte opposition politique. Par conséquent, les politiques d'atténuation ne reposent pas exclusivement, ni même principalement, sur la tarification des émissions de carbone. Elles comprennent généralement des normes et des subventions qui rencontrent moins d'opposition politique. Les subventions sont alors utilisées, non pas seulement pour orienter la R & D vers les énergies vertes ou les produits propres mais aussi pour assurer l'acceptabilité de la politique de la transition. Les subventions aux produits verts ou aux technologies décarbonées profitent principalement aux ménages les plus riches mais sont néanmoins préférées à la tarification du carbone en raison d'une mauvaise perception des effets d'équilibre général (les subventions doivent être financées) et d'un préjugé favorable à une politique « positive » (subventionner) et défavorable à une politique « négative » (taxer).

Dans le cas des États-Unis, la tarification du carbone au niveau fédéral semble hors de portée (les propositions ont été rejetées à plusieurs reprises), même si quelques États (Californie, Oregon, Massachusetts) ont mis en place des systèmes de plafonnement et d'échange. Le renouvellement de la politique climatique grâce à l'administration Biden, tel qu'il est formalisé dans l'Inflation Reduction Act (IRA) d'août 2022, consiste en un paquet de subventions évalué par le Congressional Budget Office à 391 milliards de dollars sur dix ans pour l'énergie et le climat, dont 41 % sont des crédits d'impôt à la production et à l'investissement pour l'électricité propre. Bistline *et al.* (2023)² calculent cependant que le coût budgétaire pourrait être quatre fois supérieur en fonction de l'ampleur de la réaction des agents à ces crédits d'impôts.

L'Europe a également largement subventionné l'énergie propre au cours des dernières décennies. En 2020, les subventions aux énergies renouvelables ont atteint 80 milliards d'euros (Commission européenne, 2022), soit environ deux fois

¹ Hassler J., Krusell P. et Olovsson C. (2021), « Directed technical change as a response to natural resource scarcity », *op. cit.*

² Bistline J., Mehrotra N. et Wolfram C. (2023), « [Economic implications of the climate provisions of the Inflation Reduction Act](#) », Brookings Papers on Economic Activity, printemps.

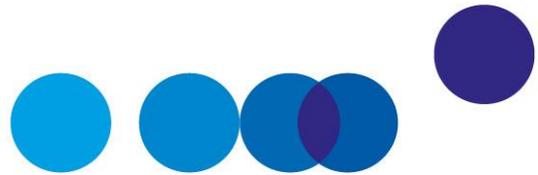
plus que les subventions annuelles américaines au titre de l'IRA. En Europe, toutefois, les subventions s'accompagnent d'une tarification du carbone. Le prix du carbone dans l'EU-ETS a été très bas dans le passé, trop bas pour déclencher à lui seul une décarbonation importante de l'économie européenne. Ce n'est plus le cas, l'ambition climatique européenne augmente clairement (voir le paquet politique Fit for 55). Cependant, l'Europe n'envisage pas d'abandonner les subventions aux énergies propres. Le prix du futur deuxième système d'échange de quotas d'émission pour le logement et les transports a été plafonné à 45 €/tCO₂, ce qui est encore beaucoup trop bas.

Pommeret *et al.* (2023)¹ proposent un modèle de transition énergétique dans lequel, en raison d'une contrainte d'acceptabilité, le régulateur n'est pas en mesure de mettre en œuvre la politique climatique optimale, qui consisterait à augmenter le prix du carbone au fil du temps. Il ne peut qu'appliquer une taxe carbone constante, insuffisamment élevée pour garantir, à elle seule, le respect de son objectif en termes d'émissions cumulées de carbone (budget carbone). Ils montrent alors qu'il est parfaitement possible de réaliser la transition énergétique avec une tarification du carbone très faible pour peu qu'elle soit complétée de subventions suffisantes en faveur des sources d'énergie propres, mais que cela a un coût en termes de bien-être et de finances publiques. De la même façon, Bistline *et al.* (2023) calculent, à l'aide d'un modèle macroéconomique bouclé, un coût d'abattement moyen de l'ordre de 83 \$/tCO₂ pour les subventions et crédits d'impôts contenus dans l'IRA, bien supérieur à celui obtenu par la mise en place d'une taxe carbone (de l'ordre de 15 \$/tCO₂).

La dimension internationale des politiques climatiques doit aussi être prise en compte. Avec le Mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF²), l'Union européenne cherche à uniformiser les règles du jeu. Ce mécanisme permet de maintenir la compétitivité des entreprises européennes soumises au marché du carbone tout en éliminant leurs allocations gratuites. Cependant, les subventions américaines dans le cadre de l'IRA jouent en sens inverse sur la compétitivité européenne et sont aussi vues comme un danger pour la R & D et la production vertes européennes, avec un risque de délocalisations des entreprises et/ou des chercheurs vers les États-Unis.

¹ Pommeret A., Ricci F. et Schubert K. (2023), « Confronting the carbon pricing gap: Second best climate policy », à paraître.

² Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) en anglais.



CONCLUSION ET LEÇONS POUR LA SCIENCE ÉCONOMIQUE

Les principales conclusions

Les études empiriques sur données de firmes et sectorielles montrent que les politiques environnementales contraignantes – réglementations et taxes – ont, à court terme, des effets négatifs sur la productivité. Au bout de quelques années, ces effets sont réduits au moins au niveau sectoriel, par le jeu de la démographie des entreprises (celles qui ne parviennent pas à s'adapter, souvent les moins productives, disparaissent) et des réallocations de production et d'emploi entre entreprises. Mais les effets diffèrent selon la productivité initiale des firmes, leur accès au financement, la familiarité des firmes avec les technologies d'abattement existantes.

De plus en plus de politiques environnementales contiennent un volet important de subventions à la recherche verte et à l'adoption de technologies vertes. Il n'y a pas ou peu de travaux empiriques quant à l'impact de ces subventions sur la productivité du travail au niveau des firmes.

Les politiques environnementales et en général les hausses du prix de l'énergie orientent le progrès technique des entreprises vers des processus qui économisent l'énergie, ce qui rend possible la transition énergétique. Il semble que ce soit davantage le cas lorsque la réglementation environnementale prend la forme d'une taxe plutôt que d'une norme. La réorientation du progrès technique aboutit à réduire la R & D dans les technologies fossiles, mais pas nécessairement celles permettant d'augmenter la productivité des facteurs. Il semble qu'il y ait des spillovers de connaissance des technologies vertes vers le reste de l'économie.

Au niveau macroéconomique, l'ampleur du ralentissement de la productivité à attendre de la transition énergétique est très incertaine. Un chiffrage disponible pour la France évoque -0,3 % par an pendant quarante ans. Il n'est pas très différent d'un chiffrage obtenu sur l'économie mondiale qui évalue à une perte de croissance de l'ordre de 0,35 point de pourcentage pendant la transition énergétique. Il reste que ces deux chiffreages sont fondés sur des hypothèses peu favorables (la R & D verte se fait au détriment de la R & D générale et n'engendre pas de spillovers vers le reste de l'économie).

Une fois la transition achevée, il y a peu de raison que le nouveau de sentier de croissance de la productivité soit inférieur à celui qui prévalait avant la transition énergétique.

Une limite importante des travaux dont ces conclusions sont tirées est qu'ils ignorent la dimension internationale. Ils ne prennent donc pas en compte les effets qui passeraient par la compétitivité et/ou par les transferts de connaissance entre pays ou entre zones.

Des pistes pour la politique environnementale

Une taxe sur l'énergie fossile permet d'orienter le progrès technique vers les technologies vertes et d'évincer les technologies sales. Des normes sont probablement moins efficaces qu'une taxe. Les subventions peuvent être nécessaires pour prendre en compte l'externalité de connaissance. Du fait de la dépendance au sentier, le coût en croissance de la transition est plus faible si le progrès technique est réorienté rapidement.

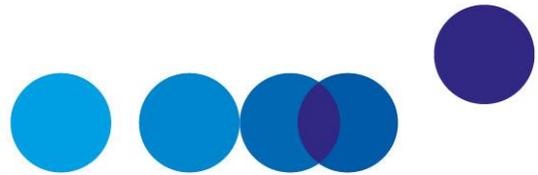
Il n'y a pas de consensus sur la suffisance des subventions à la R & D et l'innovation vertes (de type IRA) pour réaliser la transition énergétique, dans la mesure où elles ne décourageraient pas suffisamment l'innovation brune. Cependant, une tarification du carbone « trop basse » accompagnée de subventions peut permettre d'atteindre des objectifs climatiques ambitieux (voir Encadré 2 *supra*).

Il faut veiller à ce que la R & D verte ne détourne pas (trop) des fonds de la R & D des secteurs non énergétiques. De ce point de vue, et compte tenu de la durée anticipée de la transition énergétique (vingt-cinq ans), il peut être utile de former des chercheurs et de les retenir sur le territoire.

La dimension internationale des politiques climatiques doit aussi être prise en compte. Avec le Mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF¹), l'Union européenne cherche à uniformiser les règles du jeu. Ce mécanisme permet de maintenir la compétitivité des entreprises européennes soumises au marché du carbone tout en éliminant leurs allocations gratuites. Cependant, les subventions américaines dans le cadre de l'IRA jouent en sens inverse sur la compétitivité européenne et sont aussi vues comme un danger pour la R & D et la production vertes européennes, avec un risque de délocalisations des entreprises et/ou des chercheurs vers les États-Unis.

Les politiques d'éducation initiale et de formation continue qui permettent d'augmenter la productivité des individus devraient être utilisées pour contrer l'impact de la transition sur la productivité.

¹ *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM) en anglais.



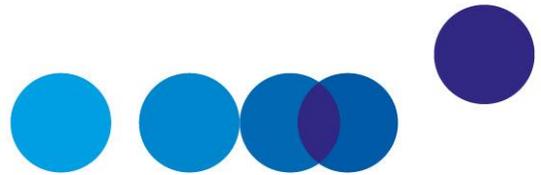
BIBLIOGRAPHIE

- Acemoglu D. (2002), « [Directed technical change](#) », *The Review of Economic Studies*, vol. 69(4), octobre, p. 781-809.
- Acemoglu D., Akcigit U., Hanley D. et Kerr W. (2016), « Transition do clean technology », *Journal of Political Economy*, vol. 124(1), février, p. 52-104.
- Acemoglu D., Aghion P., Bursztyn L. et Hémous D. (2012), « [The environment and directed technical change](#) », *American Economic Review*, vol. 102(1), février, p. 131-166.
- Aghion P., Dechezleprêtre A., Hémous D., Martin R. et Van Reenen J. (2016), « Carbon taxes, path dependency and directed technical change: Evidence from the auto industry », *Journal of Political Economy*, vol. 124, p. 1-51.
- Albrizio S., Kozluk T. et Zipperer (2017), « [Environmental policies and productivity growth: Evidence across industries and firms](#) », *Journal of environmental Economics and Management*, vol. 81, p. 209-226.
- Bistline J., Mehrotra N. et Wolftram C. (2023), « [Economic implications of the climate provisions of the Inflation Reduction Act](#) », Brookings Papers on Economic Activity, printemps.
- Bjørner T.B. et Mackenhauer J. (2013), « Spillover from private energy research », *Resource and Energy Economics*, vol. 35, p. 171-190.
- Botta E. et Koźluk T. (2014), « Measuring environmental policy stringency in OECD countries: A composite index approach », *OECD Economics Department Working Papers*, n° 1177.
- Broberg T., Marklund P.-O., Samakovlis E. et Hammar H. (2012), « Testing the Porter hypothesis: The effects of environmental investments on efficiency in Swedish industry », *Journal of Productivity Analysis*, vol. 40(1), p. 43-56.
- Brunnermeier S. et Cohen M.A. (2003), « Determinants of environmental innovation in US manufacturing industries », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 45, p. 278-293.
- Calel R. et Dechezleprêtre A. (2016), « Environmental policy and directed technological change: Evidence from the European carbon market », *Review of Economics and Statistics*, vol. 98, p. 173-191.
- Casey G. (2023), « [Energy efficiency and directed technical change: Implications for climate change mitigation](#) », *Review of Economic Studies*, mars.

- Copeland B. R., Shapiro J. S., Taylor M. S. (2022), « Globalization and the environment », in Gopinath G., Helpman E. et Rogoff K. (dir.), *Handbook of International Economics*, Elsevier, vol. 5, p. 61-146.
- Crabb J.M. et Johnson (D.K.N. 2010), « Fueling innovation: The impact of oil prices and CAFE Standards on energy-efficient automotive technology », *The Energy Journal*, vol. 31(1), p. 199-216.
- Dechezleprêtre A., Martin R. et Mohnen M. (2017), « Knowledge spillovers from clean and dirty technologies: A patent citation analysis », Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper n° 135.
- Demmou L., Costa H., Franco G. et C. André (2023), « Rising energy prices and productivity: short-run gain, long term gain », document préparé pour la réunion EPC WP1, 6-17 mars 2023, OCDE.
- Fried S. (2018), « Climate policy and innovation: a quantitative macroeconomic analysis », *American Economic Journal: Macroeconomics*, vol. 10(1), p. 90-118.
- Gerglath R., Kverndokk S. et Einar Rosendahl K. (2009), « Optimal timing of climate change policy: Interaction between carbon taxes and innovation externalities », *Environmental and Resource Economics*, vol. 43(3), p. 369-390.
- Golosov M., Hassler J., Krusell P. et A. Tsyvinski (2014), « Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium », *Econometrica*, vol. 82, p. 41-88.
- Graff Zivin J. et Neidell M. (2012), « The impact of pollution on worker productivity », *American Economic Review*, vol 102(7), p. 3652-3673.
- Greenstone M., List J. et Syverson C. (2012), « The effects of environmental regulation on the competitiveness of US manufacturing », *NBER Working Paper Series*, n° 18392, National Bureau of Economic Research, Cambridge Massachusetts.
- Hart (2019), « To everything there is a season: carbon pricing, research subsidies, and the transition to fossil-free energy », *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, vol. 6(2), mars.
- Hassler J., Krusell P. et C. Olovsson (2021), « Directed Technical Change as a Response to Natural Resource Scarcity », *Journal of Political Economy*, vol. 129 (11), novembre, p. 3039-3072.
- Hémous D. et Olsen M. (2021), « Directed technical change in labor and environmental economics », *Annual Review of Economics*, vol. 13, p. 571-597.
- Henriet F., Maggiar N. et Schubert K. (2014), « A stylized applied energy – Economy model for France », *The Energy Journal*, vol. 35(4), p. 1-37.
- Jaffe A. B. et Palmer K. (1997), « Environmental regulation and innovation: A panel data study », *The Review of Economics and Statistics*, vol. 79(4), p. 610-619.

- Jaffe A. B., Peterson S. R., Portney P. R. et Stavins R. N. (1995), « [Environmental regulation and the competitiveness of U.S. manufacturing: What does the evidence tell us?](#) », *Journal of Economic Literature*, vol. 33(1), American Economic Association, mars, p. 132-163.
- Jondeau E., Leveuige G., Sahuc J.-G. et Vermandel G. (2023), « [Environmental subsidies to mitigate net-zero transition costs](#) », Working Paper, n° 910, Banque de France, mars.
- Kalantzis F. et Niczyporuk H. (2021), « [Can European businesses achieve productivity gains from investments in energy efficiency?](#) », European Investment Bank, Working Paper, vol. 2021/07.
- Kozluk T. et Zipperer V. (2014), « [Environmental policies and productivity growth – a critical review of empirical findings](#) », *OECD Journal: Economic Studies*, vol. 2014(1).
- Lanjouw J. O. et Mody A. (1996), « Innovation and the international diffusion of environmentally responsive technology », *Research Policy*, vol. 25, p. 549-571.
- Lanoie P., Patry M. et Lajeunesse R. (2008), « Environmental regulation and productivity: Testing the Porter hypothesis », *Journal of Productivity Analysis*, vol. 30, p. 121-128.
- Managi S., Opaluch J. J., Jin D. et Grigalunas T. A. (2005), « Environmental regulations and technological change in the offshore oil and gas industry », *Land Economics*, vol. 81(2), p. 303-319.
- Marin G. et F. Vona (2021), « The impact of energy prices on socioeconomic and environmental performance: Evidence from French manufacturing establishments, 1997-2015 », *European Economic Review*, vol. 135.
- Nemet G. F. (2012), « Inter-technology knowledge spillovers for energy technologies », *Energy Economics*, vol. 34, p. 1259-1270.
- Newell R., Jaffe A. B. et R. Stavins (1999), « The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change », *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 114(3), p. 941-975.
- Noailly J. et Shestalova V. (2017), « Knowledge spillovers from renewable energy technologies: Lessons from patent citations », *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 22, p. 1-14.
- Noailly J. et Smeets R. (2015), « Directing technical change from fossil-fuel to renewable energy innovation: An application using firm-level patent data », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 72, p. 15-37.
- OCDE (2021), « Productivity growth, environmental policies and the Porter Hypothesis », in Dechezleprêtre A. et Kruse T. (dir.), [Assessing the Economic Impacts of Environmental Policies: Evidence from a Decade of OECD Research](#), Paris, Éditions de l'OCDE.
- Pommeret A., Ricci F. et Schubert K. (2023), « Confronting the carbon pricing gap: Second best climate policy », à paraître.

- Popp D. (2022), « Environmental policy and innovation: a decade of research », NBER WP, n° 25631.
- Popp D. (2002), « Induced innovation and energy prices », *American Economic Review*, vol. 92(1), p. 160-180.
- Popp D. et Newell R. (2012), « Where does energy R & D come from? Examining crowding out from energy R & D », *Energy Economics*, vol. 34(4), p. 980-991.
- Porter M. (1990), « America's green strategy », *Scientific American*, vol. 264/4.
- Porter M. et Van der Linde C. (1995), « [Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship](#) », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 9/4, p. 97-118.
- Quinet A. (2009), [La valeur tutélaire du carbone](#), Centre d'analyse stratégique, *Rapport et documents* n° 16, Paris, La Documentation française.
- Sorrell S., Schleich J., O'Malley E. et Scott S. (2004), *The Economics of Energy Efficiency: Barriers to Cost-Effective Investment*, Cheltenham, Edward Elgar.
- Yang C.-H., Tseng Y.-H et Chen C.-P. (2012), « [Environmental regulations, Induced R & D, and Productivity: Evidence from Taiwan's Manufacturing Industries](#) », *Resource and Energy Economics*, vol. 34, p. 514-532.



Directeur de la publication

Gilles de Margerie, commissaire général

Directeur de la rédaction

Cédric Audenis, commissaire général adjoint

Secrétaires de rédaction

Olivier de Broca, Gladys Caré

Contact presse

Matthias Le Fur, directeur du service Édition/Communication/Événements

01 42 75 61 37, matthias.lefur@strategie.gouv.fr

RETROUVEZ LES DERNIÈRES ACTUALITÉS
DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



www.strategie.gouv.fr



[@strategie_Gouv](https://twitter.com/strategie_Gouv)



[france-strategie](https://www.linkedin.com/company/france-strategie)



[francestrategie](https://www.facebook.com/francestrategie)



[@FranceStrategie_](https://www.instagram.com/FranceStrategie_)



[StrategieGouv](https://www.youtube.com/StrategieGouv)

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



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

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