

Effets macroéconomiques d'une transition bas carbone en France : quelques enseignements d'un modèle académique empirique

Darius Corbier*, Frédéric Gonand**

@ 53085

Mots-clés : décarbonation, efficacité énergétique, fiscalité, macroéconomie, mix électrique, modélisation

Cet article résume deux articles de recherche publiés dans Ecological Economics et Energy and Climate Change qui étudient des scénarios de transition bas carbone en France. Nous combinons un modèle d'équilibre général et un modèle de production d'électricité (MiCadO de RTE). Les résultats soulignent le rôle du prix relatif des énergies fossiles et de leur efficacité technologique relative. Le bouclage macroéconomique modifie le niveau de la demande d'électricité. L'électrification du mix ne pèse pas forcément sur les recettes publiques (en lien avec des effets de substitution qui favorisent la TVA). Si les agents anticipent mal la transition bas carbone, la décarbonation est plus lente mais la croissance plus élevée.

Introduction

Sous l'impulsion des pouvoirs publics, le secteur français de l'énergie est engagé dans une transition ambitieuse, avec des objectifs notamment en termes de mix électrique, d'efficacité énergétique et d'électrification des usages. À long terme, le poids des combustibles fossiles par rapport à celui de l'électricité sera plus faible, ce qui renforcera l'interaction entre le système électrique et le système économique. L'interaction entre les prix de l'électricité et des combustibles et leurs efficacités technologiques respectives sont donc des questions importantes pour l'étude des effets macroéconomiques des transitions bas carbone, et pour la prévision de la demande future d'électricité qui influence l'évolution du mix de production d'électricité et

motive les investissements dans le renforcement des réseaux.

Malgré le rôle important de l'électrification dans les politiques bas carbone, la littérature académique n'a pas souvent mis l'accent sur l'interaction entre le système électrique et le système économique. Historiquement, la littérature s'est principalement concentrée sur les canaux de transmission de l'évolution du prix du pétrole à l'économie (par exemple [Kim et Loungani, 1992] et [Finn, 2000]). Des articles récents évaluent les effets globaux des politiques de transition vers une économie sobre en carbone en se concentrant sur les combustibles fossiles (par exemple [Dhawan et Jeske, 2008; Hassler et al., 2012; Henri et al., 2014]). D'autres étudient les effets à l'échelle de l'économie des politiques de l'offre ou de la demande dans le système électrique (par exemple [Lutz et al., 2015; Sievers et al., 2019; Bachner et al., 2020; Vrontisi et al., 2020; Blaggrave et Furceri, 2021; Schreiner et Madlener, 2021]).

* RFF-CMCC European Institute on Economics and the Environment (EIEE), Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici.

** Université Paris Dauphine-PSL, LEDA-CGEMP.

Toutefois, ces études n'étudient pas la réponse de l'économie aux politiques bas carbone, réponse qui affecte aussi, en retour, le secteur de la production d'électricité.

Dans ce contexte, le présent article résume de façon non académique deux articles de recherche publiés en 2023 et 2024, sur données françaises, respectivement dans *Energy and Climate Change* et *Ecological Economics*¹, qui analysent l'interaction entre le système électrique et le reste de l'économie. Ces deux études portent sur les effets macroéconomiques des politiques de transition vers un système électrique bas carbone, en appliquant des scénarios à long terme pour le système électrique français (déjà fortement nucléarisé), dans le cadre de différents scénarios de prix du pétrole et de taxation du carbone. Notre modèle macroéconomique porte plutôt sur le long terme car il intègre assez peu de rigidités en dehors des coûts d'ajustement du capital.

L'évolution du système électrique peut affecter le système économique par plusieurs canaux. Les coûts totaux dans le secteur de la production d'électricité influencent les investissements totaux dans l'économie. Par ailleurs, l'étude de l'évolution du prix relatif de l'électricité est importante pour des économies qui seront davantage dépendantes de l'électricité et moins des combustibles fossiles à long terme. Enfin, l'électrification des usages et l'efficacité énergétique affectent la manière dont les agents substituent l'électricité aux combustibles à long terme. Les deux articles ici résumés étudient aussi l'effet des boucles de rétroaction macroéconomique dans la prévision de la demande d'électricité à long terme.

Concrètement, nous construisons un modèle hybride qui combine un modèle dynamique d'équilibre général pour l'économie et un modèle d'équilibre partiel pour le secteur de la production d'électricité (MICadO). Ce dernier a été développé par le gestionnaire du réseau de transport d'électricité français (GRT) RTE. L'évolution du secteur de la production d'électricité est liée au modèle d'équilibre général dynamique par un lien souple bidirectionnel. L'objectif du modèle hybride est,

par construction, de décrire l'interaction entre les systèmes économiques et techniques.

Nous utilisons deux scénarios de mix électrique de RTE, Ampère et Volt, qui affectent le prix de l'électricité sur le long terme. Nous considérons aussi trois scénarios de prix du pétrole (selon l'AIE et Saudi Aramco) qui influencent la consommation en combustibles des ménages, des secteurs d'activités et du secteur électrique pour la production d'électricité. Nous utilisons deux trajectoires d'évolution du prix du CO₂ sur le marché EU ETS qui affectent le secteur de production d'électricité dans le modèle. Enfin, nous avons une trajectoire d'évolution pour la taxe carbone qui influence les ménages et les secteurs d'activités, hors secteur de production d'électricité pour qui seul le prix des quotas de CO₂ sur le marché EU ETS s'applique. Ces scénarios permettent d'évaluer, via l'effet prix (et l'effet de l'efficacité énergétique calibré sur données RTE), l'influence des scénarios de RTE sur l'ensemble du système énergétique (consommation d'électricité et de combustibles fossiles) de l'économie française.

Ces travaux ne visent pas à réaliser des prévisions mais à étudier les effets de propagation de chocs sur l'économie et ses effets en retour sur le secteur électrique. Plus que les scénarios et leurs caractéristiques, ce sont les écarts entre deux scénarios qui ne diffèrent que par une variable modifiée qui sont significatifs, et ce sont eux qui sont commentés et discutés. Plus précisément, l'écart discuté est celui entre un scénario avec bouclage macroéconomique et le scénario sans bouclage macroéconomique (mais avec les mêmes scénarios de politique bas carbone). Cette méthode d'analyse en écart de scénario, qui est habituelle dans les revues académiques, permet de rendre nos conclusions raisonnablement robustes aux hypothèses de scénarios énergétiques futurs, lesquelles sont par construction bien incertaines. Une mise à jour de ces données exogènes ne modifierait que les prix de l'électricité et les effets de substitution déclenchés par une modification des prix relatifs des énergies électriques et non électriques. L'effet ne serait pas très sensible sur les résultats qui apparaissent davantage liés aux

Effets macroéconomiques d'une transition bas carbone en France : quelques enseignements d'un modèle académique empirique

prix des combustibles fossiles et du CO₂ (quotas ou taxe carbone).

Nos résultats suggèrent globalement, sur données françaises, que la dynamique de la consommation d'électricité simulée avec des rétroactions macroéconomiques diffère significativement de celle simulée sans effets de bouclage macroéconomique. L'influence du prix sur les décisions de consommation d'énergie des agents est significative, qu'il s'agisse des agents sous contrainte de liquidité ou non (i.e., des ménages en situation de précarité énergétique ou non)². La transition bas carbone peut améliorer le bien-être économique des ménages à long terme grâce à des possibilités de substitution de consommation entre biens, et à un mécanisme de redistribution des recettes d'un prix sur les émissions de CO₂.

Nos deux études montrent aussi le rôle clé que jouent les anticipations dans la réussite de la mise en œuvre des politiques bas carbone. L'évolution future des politiques de transition bas carbone et des prix de l'énergie est incertaine, en particulier à long terme, ce qui peut entraîner des erreurs d'anticipation. L'incertitude réglementaire et les questions de crédibilité entourent l'évolution des prix réglementés de l'électricité, des taxes environnementales, des programmes de soutien aux énergies renouvelables et à l'électrification. Nos travaux montrent l'effet potentiel de la crédibilité de ces politiques publiques dans les réponses des agents aux politiques bas carbone. Le manque de crédibilité ou de rationalité peut conduire à des erreurs d'anticipation, qui peuvent constituer un obstacle à l'efficacité de la décarbonation³.

Dans ce contexte, nos articles modélisent l'influence sur les comportements économiques des agents de deux versions différentes des structures d'information. Dans une version appelée «structure d'information imparfaite», les agents ne disposent pas d'informations complètes sur les futures politiques à faible émission de carbone. Ils ne connaissent pas l'évolution à long terme des politiques et des prix de l'énergie et sont surpris chaque année. Cela peut être considéré comme une forme de rationalité limitée, en ce sens que les agents ont un accès limité aux informations

économiques. Dans l'autre version (à «structure d'information parfaite»), les agents anticipent parfaitement l'évolution des politiques à faible intensité de carbone et des prix de l'énergie.

Dans notre modèle, le résultat à long terme des politiques bas carbone sur la dynamique globale d'une économie dépend du fait que les agents anticipent ou non les politiques. Une structure d'information imparfaite conduit à une décarbonation plus lente et à une croissance économique légèrement plus élevée⁴.

La section 1 présente de façon très brève et non académique la modélisation utilisée (les études associées à cet article les présentent de façon beaucoup plus détaillée, y compris dans leurs annexes en ligne). La section 2 présente certains des principaux résultats obtenus dans ces études publiées dans les revues académiques. La section 3 conclut.

1. Méthodologie

Notre modèle hybride articule un modèle d'équilibre partiel pour le secteur de l'électricité et un modèle d'équilibre général dynamique pour le reste de l'économie. Il existe au moins trois avantages à utiliser un modèle d'équilibre général couplé à un modèle d'équilibre partiel :

- Premièrement, le système électrique réagit à des facteurs externes tels que les effets de substitution entre capital, énergie et travail, les décisions intertemporelles des agents et des choix politiques. Cet aspect est essentiel lorsqu'il s'agit d'étudier les politiques de transition bas carbone dans le cadre de différents scénarios de prix du pétrole susceptibles de déclencher des mécanismes de substitution différents. Hasanov et al. [2022] soulignent que l'utilisation de modèles d'équilibre général est importante pour la prévision de la demande d'énergie, car ils permettent des boucles de rétroaction macroéconomiques. Böhringer et Rutherford [2013], Argentiero et al. [2018], et Karydas et Zhang [2019] étudient les politiques de transition bas carbone à l'aide d'un modèle d'équilibre général, mais le secteur

de l'électricité/énergie n'est pas aussi riche en technologies que dans notre modèle. D'autres économistes ont développé de vastes modèles hybrides multirégionaux pour étudier l'interaction entre les systèmes techniques énergétiques et l'économie (voir WITCH [Bosetti et al., 2006] et IMACLIM [Sassi et al., 2009]). Cependant, leurs modélisations du secteur de l'électricité ne prennent pas en compte les caractéristiques et les contraintes essentielles des marchés européens de l'électricité.

- Deuxièmement, un modèle riche en technologies pour le secteur de l'électricité permet de mieux prévoir les investissements, les prix de l'électricité et les subventions nécessaires pour atteindre une certaine part d'énergies renouvelables dans le mix électrique. Ces variables affectent directement l'économie à travers les décisions de consommation et de production.
- Enfin, en France, le mix électrique est déterminé par les politiques publiques, autant peut-être que par les forces du marché. Ces politiques reposent sur des objectifs d'atténuation du changement climatique et sur des scénarios de demande d'électricité à long terme qui sont simulés à partir de modèles d'équilibre partiel sans tenir compte de leur influence sur le reste de l'économie. Les modèles d'équilibre partiel peuvent ainsi sous-estimer ou surestimer la projection de la demande d'électricité et les capacités de production d'électricité nécessaires pour répondre à la demande.

Secteur de l'électricité

Le secteur de l'électricité est représenté par un modèle de mix électrique optimal (MICadO) développé par RTE, le GRT français, sur la base de [Camu, 2016]. Ce modèle d'optimisation linéaire calcule le développement optimal des technologies de production d'électricité pour couvrir la charge au moindre coût dans 12 pays européens, c'est-à-dire le coût d'investissement annualisé de la capacité de production installée (et des interconnexions) et le coût de production de l'électricité pour couvrir la charge chaque heure pendant

un an, sous réserve des contraintes physiques et de la demande d'électricité⁵. Les principales variables de décision sont les capacités installées du mix électrique et la production d'électricité sur une année. Le modèle prend en compte les échanges transfrontaliers d'électricité entre les pays européens, et modélise aussi une entreprise de réseau électrique.

Bouclage macroéconomique à l'aide d'un modèle d'équilibre général

La boucle de rétroaction macroéconomique de MICadO est calculée par un modèle d'équilibre général dynamique. À partir de MICadO, le modèle d'équilibre général prend comme variable d'entrée exogène l'évolution du coût annualisé du système électrique⁶ net de la balance commerciale, et des prix de gros de l'électricité.

Le modèle d'équilibre général distingue quatre catégories d'agents : un ménage soumis à des contraintes de liquidité, un ménage non soumis à ces contraintes («ricardien»)⁷, une entreprise produisant un bien final et l'autorité publique.

Les secteurs productifs de l'économie, à l'exception du secteur de la production d'électricité, sont agrégés en une seule entreprise de biens finaux, qui produit un bien générique dans un environnement parfaitement concurrentiel, en utilisant le capital, le travail et le progrès technologique. Ce progrès technologique peut être soit un progrès permettant d'économiser du travail, soit un progrès permettant d'économiser de l'électricité, soit un progrès permettant d'économiser des combustibles.

Les ménages et l'entreprise interagissent sur les marchés du travail et des capitaux.

L'énergie est modélisée à travers la production de services énergétiques par les ménages et la production de biens et de services par les entreprises. Le modèle prend en compte les gains d'efficacité électrique issus des scénarios de RTE et les gains d'efficacité énergétique. L'électricité est produite et fournie par le secteur de la production d'électricité du modèle MICadO.

Effets macroéconomiques d'une transition bas carbone en France : quelques enseignements d'un modèle académique empirique

L'autorité publique prélève des taxes et met en œuvre des politiques publiques (par exemple, un mécanisme de redistribution de la taxe carbone). Le modèle prend en compte plus de 86 % des recettes fiscales totales de la France, directes et indirectes⁸.

Le modèle du secteur de l'électricité et le modèle macroéconomique itèrent séparément et échangent des informations dans les deux sens jusqu'à convergence. Le modèle est simulé de 2018 à 2035.

Deux structures d'information possibles pour les agents

Enfin, la simulation du modèle d'équilibre général dynamique de base peut incorporer deux structures d'information distinctes, et distinguer les chocs anticipés et non anticipés. Dans le scénario d'information imparfaite, les agents n'anticipent pas les chocs et n'ont pas une connaissance complète des politiques bas carbone et des prix de l'énergie. Ils ne connaissent pas l'évolution future des prix de l'énergie, des taxes sur le carbone, de l'électrification de l'utilisation de l'énergie et des changements dans le mix de production d'électricité. Par conséquent, ils sont surpris par ces facteurs à chaque période. Ainsi les agents commettent des erreurs d'anticipation chaque année, car ils ne parviennent pas à anticiper avec précision l'évolution de la politique et du contexte macroéconomique. Les agents sont

réputés alors prendre leurs décisions en supposant constants dans le futur les prix existants et observés. Cette hypothèse n'a pas d'effet sur les résultats, qui sont présentés sous forme d'écart entre scénarios. Dans le scénario de la structure d'information parfaite, les agents ont une vision parfaite de l'évolution des politiques bas carbone et des prix de l'énergie. Ils ne commettent pas d'erreurs d'anticipation dans leur processus de prise de décision.

La calibration du modèle est présentée en détail dans les deux études associées à cet article [Corbier et Gonand, 2023; Corbier et Gonand, 2024].

Les scénarios de réforme bas carbone

Le modèle a été employé avec deux scénarios d'évolution du système électrique français (Ampère et Volt tels que définis par RTE [2017] notamment), chacun avec trois versions du prix du pétrole :

- Du côté de l'offre, Volt suppose un développement soutenu des énergies renouvelables (40 % du mix de production d'électricité en 2035) et une évolution du parc nucléaire (56 % du mix de production d'électricité en 2035) en fonction des opportunités économiques dans une Europe fortement interconnectée. Ampère suppose une réduction de la production d'électricité nucléaire (46 % du mix de production d'électricité d'ici 2035)

| (AIE notamment) | Hypothèse haute | Baseline | Hypothèse basse |
|----------------------------|-----------------|-----------|-----------------|
| Pétrole (prix de gros) | 80 €/b | 52 €/b | 34 €/b |
| Gaz naturel (prix de gros) | 24 €/Mbtu | 22 €/Mbtu | 22 €/Mbtu |
| CO ₂ (EU ETS)* | 33 €/t | 104 €/t | 104 €/t |

Tableau 1. Hypothèses de prix des énergies (exogènes) dans le modèle en 2035

* Au-delà des prix des quotas CO₂, la fiscalité énergétique et environnementale a les mêmes valeurs dans tous les scénarios. L'évolution de la taxation des produits pétroliers (TICPE) et de la taxation du gaz naturel (TICGN) est gelée jusqu'en 2022 (cf. loi de finances de 2019). À partir de 2023, l'évolution de la TICGN suit l'évolution de la composante carbone. L'évolution de la TICPE suit l'évolution de la composante carbone et du rattrapage fiscal diesel/essence. La composante carbone de la taxe sur les carburants passe de 44,6 €/tCO₂ en 2018 à 179,8 €/tCO₂ en 2035. La taxe sur la consommation d'électricité (CSPE) est gelée sur l'ensemble de la période.

au rythme du développement des énergies renouvelables (50 % du mix de production d'électricité d'ici 2035).

- Du côté de la demande, Volt se caractérise par des efforts moindres pour maîtriser la demande d'énergie (par exemple, normes d'efficacité énergétique et rénovation des logements) et une électrification plus faible des usages par rapport à Ampère. En outre, le développement des véhicules électriques et hybrides rechargeables est plus modéré que dans Ampère.
- En ce qui concerne les trois versions pour les prix des carburants⁹ et du CO₂ : la version de base correspond au scénario de développement durable de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la version haute correspond au scénario «*Stated Policies*» de l'AIE, et la version basse reprend les valeurs de la version de base pour les prix du gaz naturel et du CO₂ et le scénario de prix bas du pétrole de Saudi Aramco avec un prix de 12 dollars le baril d'ici 2050.

Pour mémoire, nos travaux ne visent pas à réaliser des prévisions, mais à étudier les effets de propagation de chocs sur l'économie et ses effets en retour sur le secteur électrique. Plus que les scénarios, ce sont donc les écarts entre deux scénarios qui ne diffèrent que par une variable modifiée qui sont significatifs (voir introduction de cet article). L'horizon temporel des deux scénarios, Ampère et Volt, est 2018-2035 (voir [RTE, 2017]).

2. Résultats obtenus

Résultat 1. L'effet des prix sur les décisions de consommation d'énergie des agents est significatif et, par conséquent, la dynamique de la consommation d'électricité simulée avec des rétroactions macroéconomiques diffère significativement de celle sans rétroactions macroéconomiques (Figure 1)¹⁰

Tenir compte des effets de bouclage macroéconomique modifie significativement le niveau de la demande d'électricité à long terme. Les trajectoires de consommation d'électricité simulées pour Ampère et Volt avec bouclage macroéconomique diffèrent sensiblement des trajectoires simulées pour Ampère et Volt sans bouclage

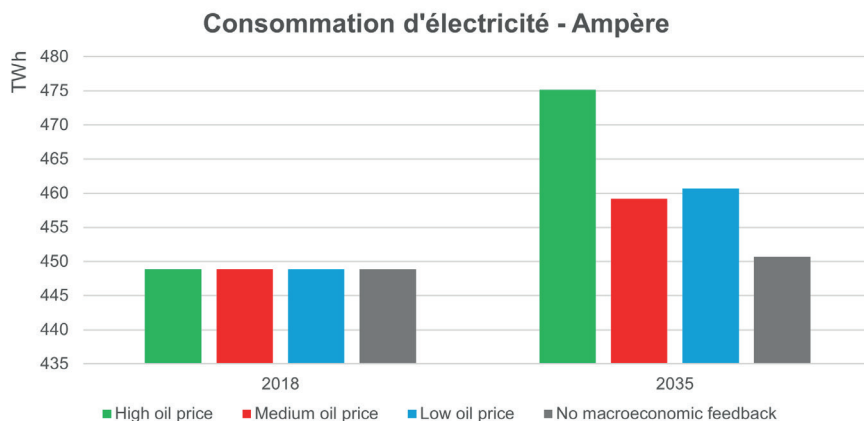


Figure 1. Réponse dynamique de la consommation totale d'électricité – scénario Ampère*

* Malgré un prix des combustibles plus bas, la consommation d'électricité est plus élevée dans le scénario de prix du pétrole bas que dans le scénario de référence. Ce résultat est attribué à l'évolution des prix de gros de l'électricité. Le prix de gros de l'électricité en 2035 pour Ampère haut est inférieur à celui d'Ampère baseline, à son tour inférieur à celui d'Ampère bas.

Effets macroéconomiques d'une transition bas carbone en France : quelques enseignements d'un modèle académique empirique

macroéconomique par RTE dans son bilan prévisionnel. Les écarts de consommation d'électricité par rapport à Ampère sans bouclage macroéconomique sont d'environ 10 TWh dans Ampère bas et Ampère baseline, et de 25 TWh dans Ampère haut. Pour Volt, les écarts sont plus importants : 34 TWh pour Volt bas et Volt baseline, et 52 TWh pour Volt haut.

Les causes en sont attribuées à trois effets qui sont discutés dans les études associées à cet article non académique : l'effet prix, l'effet technologique et l'effet croissance. Pour les ménages, l'effet prix reflète deux composantes : l'effet substitution d'une part et l'effet de revenu d'autre part. L'effet substitution vient modifier le partage entre la consommation d'énergie électrique et la consommation d'énergie non électrique selon l'évolution relative des efforts technologiques et l'évolution relative des prix. Dans le modèle, les ménages réagissent plus à l'effet substitution qu'à l'effet revenu dans leurs prises de décision de consommation d'énergie¹¹.

À long terme, nos deux études suggèrent globalement, et pour résumer, que les ménages substituent davantage en faveur de l'électricité dans Ampère haut, où le prix relatif des combustibles fossiles augmente et l'efficacité relative de l'électricité diminue. Dans le scénario de référence d'Ampère, la substitution en faveur de l'électricité est plus faible car l'augmentation du prix relatif des combustibles fossiles est plus faible que dans le scénario d'Ampère haut, ce qui donne plus de poids à l'effet de l'efficacité énergétique. À long terme, les ménages substituent en faveur des combustibles fossiles dans le scénario Ampère bas en raison d'un fort effet d'efficacité énergétique. Les entreprises substituent à l'électricité dans les trois scénarios, grâce à un fort effet-prix. Dans notre modèle, sur le long terme, l'entreprise base ses décisions de consommation d'énergie sur le prix relatif des énergies (TTC) plutôt que sur l'efficacité énergétique relative, quelle que soit l'évolution du prix des énergies.

Résultat 2. L'évolution de la taxe carbone et des politiques d'efficacité énergétique n'est pas suffisante pour atteindre la neutralité carbone en France en 2050 dans notre modèle

Pour atteindre la neutralité carbone en 2050, la consommation d'hydrocarbures devrait diminuer de 40 % en 2030 par rapport à 2012 (cf. loi énergie-climat). Cependant, dans le meilleur des cas, dans le scénario Ampère haut, la consommation de carburant ne diminue que de 15 % en 2030 par rapport à 2012 dans notre modèle avec effet de bouclage macroéconomique.

Premièrement, l'évolution du prix du carbone n'est pas suffisante pour découpler les émissions de la croissance lorsque le prix des combustibles fossiles diminue au fil du temps. Le résultat 1 montre que l'effet du prix sur les décisions de consommation d'énergie des agents est significatif. L'augmentation du prix du carbone permet d'influencer les décisions de consommation d'énergie, à condition que le prix de l'énergie, hors taxes énergétiques, soit initialement élevé. Ceci suggère que la taxe carbone devrait évoluer en fonction de la dynamique des prix des combustibles fossiles. Dans la littérature, Roach [2021] montre que la taxation du carbone doit être corrélée positivement avec le volume d'énergie consommé et négativement avec le prix de l'énergie au cours du temps (donc elle augmente quand le prix des combustibles fossiles baisse). De Miguel et Manzano [2006] et Heutel [2012] concluent que la taxation du carbone doit être procyclique.

Deuxièmement, la consommation de combustibles fossiles des ménages¹² diminue moins que celle des entreprises, en partie grâce au mécanisme de redistribution de la taxation du carbone. Comme le montre le résultat 1, les ménages fondent relativement plus leurs décisions en matière de consommation d'énergie sur l'efficacité énergétique¹³ lorsque les prix de l'énergie sont plus bas. Par conséquent, l'efficacité énergétique joue un rôle clé dans la réduction de la consommation en combustibles fossiles du côté des ménages. Henriot et al. [2014] concluent de même, sur la base de données françaises, que les

gains d'efficacité énergétique, en particulier dans le secteur résidentiel, ne sont pas suffisamment importants pour atteindre la neutralité carbone en France à long terme.

Résultat 3. L'effet dépressif des chocs des prix de l'énergie sur l'offre globale est atténué en partie par les possibilités de substitution entre les biens

L'évolution des prix de l'énergie et des politiques bas carbone ne pèse pas de manière significative sur le taux de croissance de l'économie. C'est lorsque les prix de l'énergie sont relativement élevés que les conditions sont les mieux remplies pour réduire suffisamment la consommation de combustibles fossiles au fil du temps sans affecter la croissance économique. Des prix de l'énergie relativement plus élevés et une efficacité énergétique accrue conduisent à des décisions d'électrification de l'économie par les agents et à un découplage des émissions et de la croissance. En outre, l'augmentation de la taxation du carbone permet d'accroître les subventions en faveur des énergies renouvelables, et donc de réduire la part des combustibles fossiles dans la production d'électricité. Le mix de production d'électricité est relativement plus vert à long terme dans Ampère avec 40 % de nucléaire et 55 % d'énergies renouvelables. La littérature, comme notre modèle, conclut aussi que l'effet des chocs de prix de l'énergie sur la production est contenu, en particulier lorsque les revenus de la taxe carbone sont redistribués (par exemple [De Miguel et Manzano, 2006; Henriot et al., 2014; Goulder et Hafstead, 2017]). Corbier et Gonand [2023] développent ce point plus en détail¹⁴.

Résultat 4. Malgré une érosion de la base taxable des combustibles fossiles, le passage au tout électrique peut ne pas se traduire, toutes choses égales par ailleurs, par une perte nette de recettes pour les pouvoirs publics

Malgré la baisse de la consommation de combustibles fossiles sur le long terme, l'évolution de la composante carbone augmente significativement les recettes fiscales des produits énergétiques par unité de travail efficace. Les effets de

substitution associés augmentent aussi les recettes fiscales de la consommation globale (TVA) grâce à la dynamique des biens non durables, semi-durables et des services.

Plus précisément, les recettes de TVA augmentent car, en diminuant leur consommation d'énergie et leurs investissements en biens durables (énergivores), les ménages se tournent vers d'autres biens, notamment les biens non durables et semi-durables, qui représentent plus de 80 % de la consommation totale des ménages en France et constituent ainsi la principale base de l'assiette fiscale de la TVA. Par conséquent, même une substitution modérée vers ces biens entraîne une augmentation significative des recettes de TVA.

De plus, une hausse de la demande en biens non durables et semi-durables stimule l'offre de ces produits, amenant les entreprises à augmenter leurs besoins en capital pour répondre à ce surplus de demande. Les investissements en capital croissent donc en réponse à l'augmentation de la demande en biens non durables et semi-durables, qui constituent la majeure partie de la consommation et, par conséquent, du secteur productif.

En d'autres termes, la perte de recettes fiscales sur les énergies fossiles est en partie compensée, certes, par des recettes supplémentaires de taxation de l'électricité, mais aussi par des gains en recettes de TVA et de fiscalité du capital.

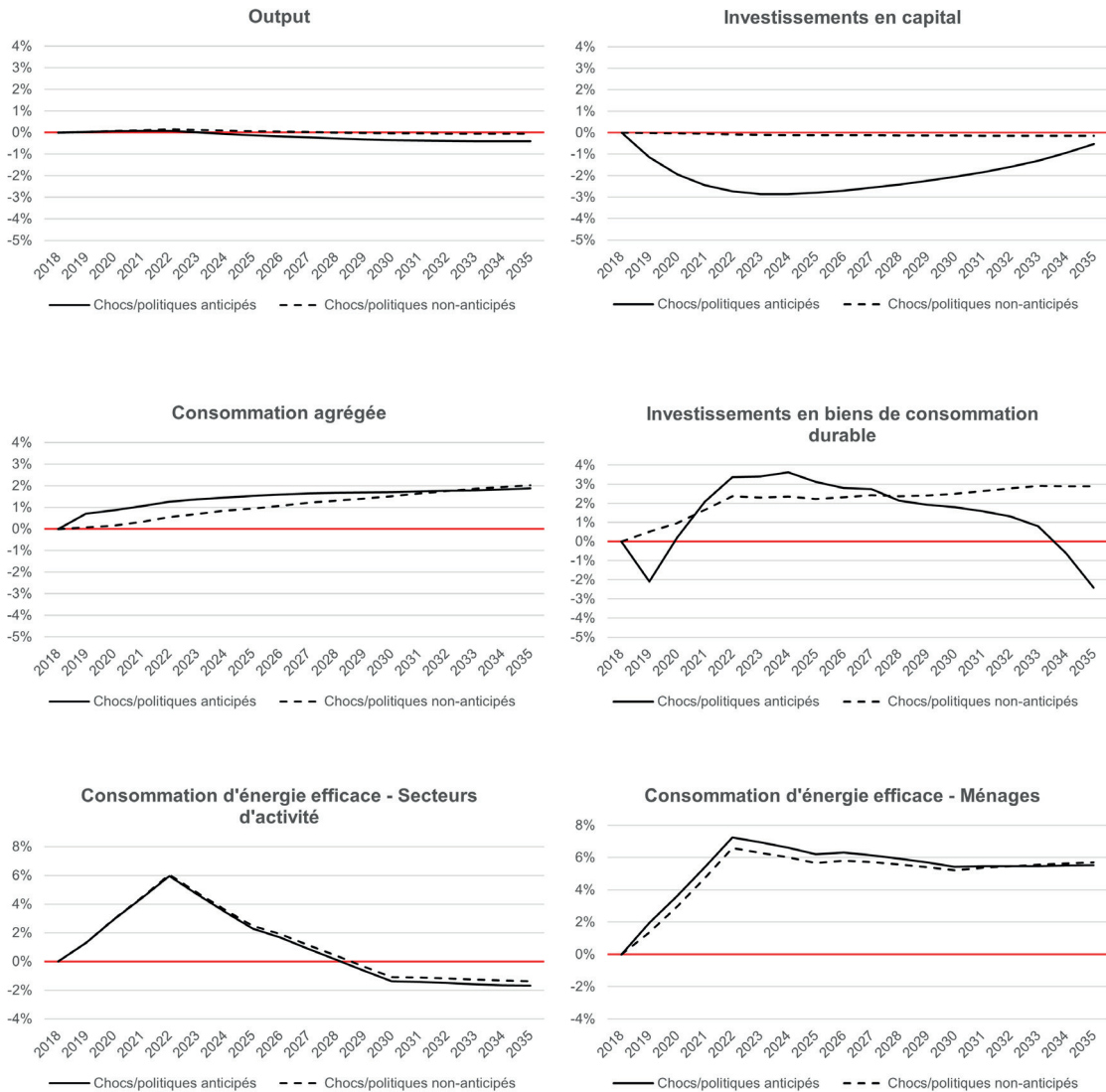
Résultat 5. Les anticipations des agents sur les efforts futurs d'efficacité énergétique, la tarification du carbone et le prix du pétrole à long terme — selon qu'elles sont parfaites ou non — modifient significativement la dynamique agrégée de l'économie et le bien-être non environnemental des ménages

La dynamique des variables agrégées, autres que la consommation d'énergie, est sensiblement différente entre les deux structures d'information. Dans le cas où les agents n'anticipent pas l'évolution des chocs énergétiques et en fonction de l'information dont ils disposent, les agents ne réagissent pas de manière sensible à ces changements

Effets macroéconomiques d'une transition bas carbone en France : quelques enseignements d'un modèle académique empirique

par rapport au cas où ils anticipent avec précision l'occurrence future des chocs. L'une des raisons est que, dans le cadre de l'information parfaite, les ménages répartissent les effets de l'évolution des prix de l'énergie sur l'ensemble de l'horizon temporel et se protègent à l'avance contre l'occurrence future des chocs. Plus précisément, lorsque les ménages anticipent l'augmentation

prochaine de la taxe carbone ou d'autres chocs, ils ont la possibilité de se couvrir de manière proactive contre ces chocs futurs afin de lisser leurs modèles de consommation dans le temps. Sachant cela, dans notre modèle, ils diminueront de manière permanente leurs investissements dans les biens durables à long terme, malgré l'augmentation de l'efficacité énergétique¹⁵.



**Figure 2. Pourcentage de variation des variables (par unité de travail efficace)
en écart à 2018 dans le modèle – scénario Ampère**

Ce n'est pas le cas lorsqu'ils ignorent l'évolution à long terme des chocs. Dans ce cas, ils ne savent pas que le coût unitaire de la production de services énergétiques à partir de biens durables augmentera au fil du temps. Par conséquent, les ménages ne réduiront pas leur stock de biens durables en réponse à l'évolution des prix de l'énergie. Il en va de même pour les entreprises : la demande de capital réagira relativement moins si l'entreprise n'anticipe pas l'évolution des chocs à long terme que si elle le fait. L'acte de couverture tend à rendre les agents plus prudents, puisqu'ils anticipent les chocs futurs. Par conséquent, les niveaux de consommation et d'investissement présentent des fluctuations plus importantes au cours des prochaines années, par rapport à un scénario où les agents n'anticipent pas les chocs. Les agents qui n'anticipent pas les chocs réagiront relativement moins aux chocs que s'ils étaient parfaitement informés des chocs futurs. Par conséquent, la demande globale est moins affectée.

Résultat 6. Une structure d'information imparfaite des agents entraîne, dans notre modèle, une décarbonation plus lente de l'économie avec un impact moindre sur la production, toutes choses égales par ailleurs

Une séquence de changements politiques non anticipés est plus bénéfique pour l'économie que pour l'environnement et la décarbonation. La différence entre les agents qui anticipent ou non les chocs énergétiques sur l'offre globale est d'environ 0,4 point de pourcentage en 2035. Des résultats antérieurs ont montré que les agents réduisent relativement plus leur consommation de biens consommateurs d'énergie lorsqu'ils disposent d'informations complètes sur les changements de politiques à venir. Comme dans [Smulders et al., 2012], le prix du carbone annoncé à l'avance dans notre modèle augmente la consommation d'énergie, et donc les émissions de CO₂, au cours de la période précédant la mise en œuvre (de 2018 à 2023), ce qui donne lieu à ce que l'on appelle le «paradoxe vert».

Ce résultat paraît assez intuitif. Lorsqu'une politique bas carbone est annoncée, la consommation

d'énergie est moins élevée. En effet, si les ménages savent à l'avance que la taxe carbone va fortement augmenter pendant vingt ans, ils réduiront davantage leurs investissements dans des biens durables énergivores, ce qui fera diminuer leur consommation globale d'énergie, et se tourneront plus vers l'électricité. À l'inverse, s'ils n'ont aucune certitude, ils ajusteront moins leurs choix, entraînant une consommation énergétique plus élevée¹⁶.

En outre, les chocs énergétiques non anticipés produisent des résultats comparativement plus avantageux pour la croissance que les chocs énergétiques anticipés. Une consommation élevée, les recettes du marché de l'électricité et les investissements dans le capital physique et les biens durables contribuent tous à réduire la perte de production par unité de travail efficace. Les arbitrages en faveur de l'économie de consommation, les différents types de propriété d'actifs (biens durables et biens d'équipement) et les possibilités de substitution entre les différents types de biens et d'énergies expliquent en grande partie ce résultat.

3. Conclusion et implications

Cet article s'appuie sur un modèle hybride qui combine un modèle dynamique d'équilibre général et un modèle d'optimisation pour le secteur de la production d'électricité, afin d'étudier les effets agrégés des scénarios officiels de la transition vers une économie bas carbone dans le secteur de l'électricité à long terme en France. Dans notre modèle, le principal canal de transmission de la transition vers une économie sobre en carbone est la demande d'énergie par le biais du prix relatif de l'énergie et de l'efficacité relative de l'énergie. Les effets macroéconomiques d'une transition bas carbone sont liés au prix des combustibles fossiles. Tenir compte des effets de bouclage macroéconomique modifie significativement le niveau de la demande d'électricité à long terme. Nos travaux visent également à mieux comprendre les processus de décision qui influencent les réponses des agents à la transition énergétique en France en examinant le rôle de la crédibilité à travers deux versions de structures d'information.

Effets macroéconomiques d'une transition bas carbone en France : quelques enseignements d'un modèle académique empirique

Les agents ne réagissent pas excessivement aux chocs énergétiques s'ils ne sont pas annoncés à l'avance. Par rapport aux chocs anticipés, les chocs non anticipés ont un bénéfice économique plus important et un taux de décarbonation plus faible. En d'autres termes, une annonce crédible de politiques bas carbone est relativement plus bénéfique pour la décarbonation.

NOTES

1. Ces deux revues académiques sont classées en catégorie 1 dans le classement SJR des revues scientifiques internationales en économie. Cf. [Corbier, Gonand, 2024] et [Corbier, Gonand, 2023].

2. Les consommateurs sous contrainte de liquidités sont des ménages pauvres qui ne peuvent pas emprunter et consomment l'entièreté de leur revenu. Les ménages non contraints ont accès au marché du crédit, et peuvent investir leur épargne dans l'économie.

3. De nombreuses études ont mis en évidence le rôle joué par la crédibilité des politiques dans le soutien aux investissements. Cf. [Pindyck, 1991; Marsiliani et Renstrom, 2000; Helm, Hepburn, Mash, 2003; Reinelt et Keith, 2007; Bosetti et Victor, 2011; De Cian, Bosetti, Tavoni, 2012; Faehn et Isaksen, 2016; Rogge et Reichardt, 2016; Rogge et Dutschke, 2018]. Et de nombreux articles étudient l'effet du calendrier des chocs de revenus et des politiques fiscales sur le comportement des agents et ont montré l'importance de l'effet d'annonce des chocs sur le comportement des ménages. Voir [Corbier et Gonand, 2024] pour une analyse synthétique de cette littérature.

4. S'agissant d'un modèle macroéconomique, la croissance à laquelle il est fait référence ici est celle du PIB, et non d'une valeur socio-économique des baisses d'émissions de CO₂, par exemple.

5. La demande d'électricité est une donnée d'entrée du modèle de production d'électricité et une donnée de sortie du modèle d'équilibre général.

6. i.e., investissements (Capex) pour les capacités installées, coûts d'exploitation et de maintenance fixes et variables, coût du CO₂ et des combustibles, coût d'investissement des interconnexions. Les flexibilités sont aussi prises en compte telles que le stockage et l'effacement.

7. Les « ménages ricardiens » ont accès au marché des capitaux et possèdent le stock de capital de l'économie (à l'exception de celui du secteur de la production d'électricité). La fraction restante, les ménages non ricardiens, n'ont pas accès aux marchés des capitaux et sont donc limités par leur liquidité. Ils représentent des ménages à faibles revenus. La raison principale du modèle à agents hétérogènes est que les politiques publiques peuvent affecter les ménages différemment en fonction de leur revenu. Les deux types de ménages consomment des biens non durables, des biens durables et de l'énergie (cf. [Dhawan et Jeske, 2008] et [Henriet et al., 2014]).

8. Nos travaux ne portent pas sur l'étude de la notion de « double dividende » d'un prix du carbone, i.e., nous n'étudions pas comment la taxe carbone peut remplacer d'autres taxes plus distorsives qui ralentissent la croissance. Les évolutions des taux de prélèvements obligatoires dans le modèle sont les mêmes dans toutes les simulations, ils n'influencent donc pas au premier ordre les résultats qui sont présentés en écarts entre scénarios. Les écarts entre scénarios ne reflètent que des modifications de prix relatifs des énergies. Sur le double dividende, voir par exemple [Gonand et Jouvét, 2015].

9. On pourra noter que les scénarios de prix du pétrole de notre modèle, fondés sur les simulations de l'AIE de 2018, sont très proches de celles de 2024 (cf. World Energy Outlook 2024, pp. 31 et 90).

10. Les tableaux et les chiffres de Volt sont disponibles sur demande. La dynamique est la même que celle d'Ampère, seuls les niveaux changent.

11. Dans le modèle, les ménages non ricardiens sont plus sensibles aux variations des prix de l'énergie que les ménages ricardiens. L'effet de substitution et l'effet technologique sont les mêmes pour les deux types de ménages, mais l'effet du revenu sur la consommation est différent. Les ménages non ricardiens diminuent davantage leur consommation d'énergie que les ménages ricardiens à cause de l'effet revenu.

12. Cette consommation inclut la consommation résidentielle et de transport.

13. On rappelle que notre modèle n'utilise pas une efficacité énergétique « toutes énergies confondues » mais distingue entre une efficacité énergétique spécifique aux usages

électriques d'une part et une efficacité énergétique spécifique aux usages de combustible d'autre part.

14. Nos travaux ne portent pas sur l'étude de la notion de «double dividende» d'un prix du carbone, i.e., nous n'étudions pas comment la taxe carbone peut remplacer d'autres taxes plus distorsives qui ralentissent la croissance, ni les différentes possibilités de recycler les recettes associées. Sur le double dividende, voir par exemple [Gonand et Jouvét, 2015].

15. Le modèle ne différencie pas les biens durables à usage électrique versus les biens durables à usage non électrique. La fonction de production de services énergétiques combine ici un bien durable agrégé et de l'énergie. L'énergie est elle-même une fonction qui combine électricité et combustibles fossiles. De fait, nous ne capturons pas, dans le modèle macroéconomique, la substitution entre technologies vertes (voitures électriques) et technologies sales (voitures à combustion). En d'autres termes, nous n'étudions pas si et comment une bascule vers les usages électriques nécessite une bascule vers de nouveaux types de biens durables.

16. De même, Mertens et Ravn [2012] montrent que l'économie réagit différemment selon qu'un changement dans la fiscalité est anticipé ou pas. Ils distinguent entre annonce d'une mesure fiscale et mise en œuvre de la mesure. La phase d'avant mise en œuvre de la politique fiscale permet au ménage optimisateur d'ajuster ses comportements à une hausse ou une baisse future anticipée de la fiscalité. Qualitativement, nos résultats convergent ici avec les leurs. L'effet d'annonce dans le modèle se traduit par une réponse en forme de cloche de l'investissement en biens durables et de l'investissement en capital physique. En revanche, dans la version à information imparfaite, le ménage ricardien désinvestit relativement moins dans le capital physique et investit dans les biens durables sur toute la période d'étude, ce qui augmente l'output sur le long terme dans la version basse et médiane des scénarios Ampère et Volt. Au total, les effets d'annonce sont plus bénéfiques à la décarbonation de l'économie mais au détriment de la croissance économique.

BIBLIOGRAPHIE

Argentiero A., Bollino C., Micheli S., Zopounidis C., 2018. "Renewable energy sources policies in a Bayesian DSGE model", *Renewable Energy*, 120, 60-68.

Bachner G., Mayer J., Steininger K.W., Anger-Kraavi A., Smith A., Barker T.S., 2020. "Uncertainties in macroeconomic assessments of low-carbon transition pathways – the case of the European iron and steel industry", *Ecological Economics*, 172, 106631.

Blagrove P., Furceri D., 2021. "The macroeconomic effects of electricity-sector privatization", *Energy Economics*, 100, 105245.

Böhringer C., Rutherford T., 2013. "Transition towards a low carbon economy: A computable general equilibrium analysis for Poland", *Energy Policy*, 55, 16-26.

Bosetti V., Carraro C., Galeotti M., Massetti E., Tavoni M., 2006. "WITCH a world induced technical change hybrid model", *The Energy Journal*, 13-37.

Bosetti V., Victor D., 2011. "Politics and Economics of Second-Best Regulation of Greenhouse Gases: The Importance of Regulatory Credibility", *The Energy Journal*, 32(1), 1-24.

Camu A., 2016. Modeling the optimal energy mix in 2030: Impact of the integration of renewable energy sources.

Chan Y.T., 2020. "Collaborative optimal carbon tax rate under economic and energy price shocks: A dynamic stochastic general equilibrium model approach", *Journal of Cleaner Production*, 256, 120452.

Corbier D., Gonand F., 2023. "The aggregate effects of the structure of information in low-carbon transition policies: an empirical application to France", *Energy and Climate Change*, v. 4, 100115.

Corbier D., Gonand F., 2024. "A hybrid electricity-economy model to assess the aggregate impacts of low-carbon transition: an application to France", *Ecological Economics*, v. 216, 108027.

Effets macroéconomiques d'une transition bas carbone en France : quelques enseignements d'un modèle académique empirique

De Cian E., Bosetti V., Tavoni M., 2012. "Technology innovation and diffusion in 'less than ideal' climate policies: An assessment with the WITCH model", *Climatic Change*, 114(1), 121-143.

De Miguel C., Manzano B., 2006. "Optimal oil taxation in a small open economy", *Review of Economic Dynamics*, 9(3), 438-454.

Dhawan R., Jeske K., 2008. "Energy price shocks and the macroeconomy: the role of consumer durables", 40(7), 1357-1377.

Faehn T., Isaksen E., 2016. "Diffusion of Climate Technologies in the Presence of Commitment Problems", *The Energy Journal*, 37(2), 155-180.

Finn M., 2000. "Perfect competition and the effects of energy price increases on economic activity", *Journal of Money, Credit and Banking*, 32(3), 400-416.

Golosov M., Hassler J., Tsyvinski A., 2014. "Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium", *Econometrica*, 82(1), 41-88.

Gonand F., Jouvét P.-A., 2015. "The 'second dividend' and the demographic structure", *Journal of Environmental Economics and Management*, 72, 71-97.

Goulder L., Hafstead M., 2017. "Confronting the climate challenge: US policy options", Columbia University Press.

Goulder L.H., Hafstead M.A., Kim G., Long X., 2019. "Impacts of a carbon tax across US household income groups: What are the equity-efficiency trade-offs?", *Journal of Public Economics*, 175, 44-64.

Hasanov F.J., Javid M., Joutz F.L., 2022. "Saudi Non-Oil Exports before and after Covid-19: Historical Impacts of Determinants and Scenario Analysis", *Sustainability*, 14(4), 2379.

Hassler J., Krusell P., Olovsson C., 2012. "Energy-saving technical change", National Bureau of Economic Research, Working Paper n° 18456.

Helm D., Hepburn C., Mash R., 2003. "Credible Carbon Policy", *Oxford Review of Economic Policy*, 19(3), 438-450.

Henriet F., Maggiar N., Schubert K., 2014. "A stylized applied energy-economy model for France", *The Energy Journal*, 35(4).

Heutel G., 2012. "How should environmental policy respond to business cycles? Optimal policy under persistent productivity shocks", *Review of Economic Dynamics*, 15, 244-264.

Karydas C., Zhang L., 2019. "Green tax reform, endogenous innovation and the growth dividend", *Journal of Environmental Economics and Management*, 97, 158-181.

Kim I., Loungani P., 1992. "The role of energy in real business cycle models", *Journal of Monetary Economics*, 29(2), 173-189.

Klump R., McAdam P., Willman A., 2012. "The Normalized CES Production Function: Theory and Empirics", *Journal of Economic Surveys*, 26(5), 769-799.

Lee K., Ni S., 2002. "On the dynamic effects of oil price shocks: a study using industry level data", *Journal of Monetary Economics*, 49(4), 823-852.

Lutz M., Flaute M., Lehr U., Wiebe K.S., 2015. Economic impacts of renewable power generation technologies and the role of endogenous technological change (No. 2015/9), GWS Discussion Paper.

Marsiliani L., Renstrom T., 2001. "Time Inconsistency in Environmental Policy: Tax Earmarking as a Commitment Solution", *The Economic Journal*, 110(462).

Pindyck R., 1991. "Irreversibility, uncertainty and investment", *Journal of Economic Literature*, 29, 1110-48.

Reinelt P., Keith D., 2007. "Carbon Capture Retrofits and the Cost of Regulatory Uncertainty", *The Energy Journal*, 28(4), 101-128.

Rogge K., Dutschke E., 2018. "What makes them believe in the low-carbon energy transition? Exploring corporate perceptions of the credibility of climate policy mixes", *Environmental Science & Policy*, 87, 74-84.

Rogge K., Reichardt K., 2016. "Policy mixes for sustainability transitions: An extended concept and framework for analysis", *Research Policy*, 45(8), 1620-1635.

RTE, 2017. Bilan prévisionnel, https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bp2017_complet_vf_compressed.pdf.

Sassi O., Crassous R., Hourcade J., Gitz V., Waisman H., Guivarch C., 2009. "IMACLIM-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways", *International Journal of Global Environmental Issues*, 10(1-2), 5-24.

Schreiner L., Reinhar M., 2021. "A pathway to green growth? Macroeconomic impacts of power grid infrastructure investments in Germany", *Energy Policy*, 156.

Sievers L., Breitschopf B., Pfaff M., Schaffer A., 2019. "Macroeconomic impact of the German energy transition

and its distribution by sectors and regions", *Ecological Economics*, 160, 191-204.

Smulders S., Tsur Y., Zemel A., 2012. "Announcing climate policy: can a green paradox arise without scarcity?", *Journal of Environmental Economics and Management*, 64(3), 364-376.

Vrontisi Z., Fragkiadakis K., Kannavou M., Capros P., 2020. "Energy system transition and macroeconomic impacts of a European decarbonization action towards a below 2 °C climate stabilization", *Climatic Change*, 162(4), 1857-1875.

BIOGRAPHIES

DARIUS CORBIER, détenteur d'un doctorat en économie de l'Université Paris-Dauphine-PSL, est chercheur au Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) dans la division Sustainable Earth Modelling Economics.

FRÉDÉRIC GONAND est professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine-PSL (HDR, CNU), directeur de masters et d'executive master, consultant, conseiller économique de l'UIMM, membre du Conseil des prélèvements obligatoires (Cour des comptes), ancien commissaire de la Commission de régulation de l'énergie, ancien conseiller économique du ministre de l'Économie (2007-2011), ancien élève de l'ENA, docteur en économie, docteur en histoire de l'art, enseignant à l'École du Louvre.

À lire également dans *La Revue de l'Énergie*

- Combiner efficacement les moyens de production électrique pour un futur réseau décarboné, *Jean-Guy Devezeaux de Lavergne (n° 673, juillet-août 2024)*
- Les Certificats d'Économie d'Énergie (CEE) : enseignements économiques généraux et comparaisons internationales, *Frédéric Gonand (n° 673, juillet-août 2024)*

À retrouver sur www.larevuedelenergie.com.