

Economie Statistique **ET**

Economics **AND** Statistics

Dossier
**Environnement : la réduction
des émissions de carbone**

Varia
Difficultés de recrutement
Diversité sectorielle et emploi

Thematic Section
**Environment: The Reduction of
Carbon Emissions**

Varia
Recruitment Difficulties
Sectoral Diversity and Employment

Economie Statistique ^{ET}

Economics AND Statistics

La revue est en accès libre sur le site **www.insee.fr**.
Il est possible de s'abonner aux avis de parution sur le site. La revue peut être achetée sur le site **www.insee.fr**, rubrique « Services / Acheter nos publications ».

The journal is available in open access on the Insee website **www.insee.fr**. Publication alerts can be subscribed online. The printed version of the journal (in French) can be purchased on the Insee website **www.insee.fr**.

Conseil scientifique / Scientific Committee

Jacques LE CACHEUX, président (Université de Pau et des pays de l'Adour)
Frédérique BEC (Thema, CY Cergy Paris Université et CREST-ENSAE)
Flora BELLONE (Université Côte d'Azur et GREDEG-CNRS)
Céline BESSIERE (Université Paris-Dauphine, IRISSO, PSL Research University)
Jérôme BOURDIEU (École d'Économie de Paris)
Pierre CAHUC (Sciences Po)
Sandrine CAZES (OCDE)
Gilbert CETTE (NEOMA Business School)
Dominique GOUX (Insee)
Yannick L'HORTY (Université Gustave Eiffel - Erudite, TEPP)
Daniel OESCH (LINES et Institut des sciences sociales-Université de Lausanne)
Katheline SCHUBERT (École d'Économie de Paris, Université Paris D)
Louis-André VALLET (CNRS & Sorbonne Université - GEMASS)
François-Charles WOLFF (Université de Nantes)

Comité éditorial / Editorial Advisory Board

Luc ARRONDEL (École d'Économie de Paris)
Lucio BACCARO (Max Planck Institute for the Study of Societies et Département de Sociologie-Université de Genève)
Antoine BOZIO (Institut des politiques publiques/École d'Économie de Paris)
Clément CARBONNIER (Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis et LIEPP-Sciences Po)
Erwan GAUTIER (Banque de France)
Pauline GIVORD (Insee et CREST)
Florence JUSOT (Université Paris-Dauphine, Leda-Legos et Irdes)
François LEGENDRE (Erudite/Université Paris-Est)
Claire LOUPIAS (Université d'Evry Val d'Essonne)
Pierre PORA (Insee)
Ariell RESHEF (École d'Économie de Paris, Centre d'Économie de la Sorbonne et CEPII)
Thepthida SOPRASEUTH (Théma/Université de Cergy-Pontoise)

Directeur de la publication / Director of Publication:

Jean-Luc TAVERNIER

Rédactrice en chef / Editor in Chief:

Dominique GOUX

Rédacteur en chef adjoint / Deputy Editor in Chief:

Riyad ABBAS

Assistante éditoriale / Editorial Assistant: Véronique EGLOFF

Traductions / Translations: RWS Language Solutions

Chiltern Park, Chalfont St. Peter, Bucks, SL9 9FG, Royaume-Uni

Maquette PAO / CAP: LUMINESS

1, rue du Docteur-Sauvé, BP3, 53101 Mayenne, France

Impression / Printing: PARAGON TRANSACTION

39 rue des Rivières Saint-Agnan, 58200 Cosne-Cours-sur-Loire, France

Economie et Statistique / Economics and Statistics
Numéro 544 – 2024

ENVIRONNEMENT : LA RÉDUCTION
DES ÉMISSIONS DE CARBONE

- 3 En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?**
Riyad Abbas, Nicolas Carnot, Matthieu Lequien, Alain Quartier-la-Tente et Sébastien Roux
- 27 À la chasse aux « zombies bruns » pour réduire les émissions de carbone de l'industrie**
Gert Bijnens et Carine Swartenbroekx
- 47 Commentaire – Le défi du siècle et la science économique**
Aude Pommeret

ENTREPRISES

- 57 Difficultés de recrutement anticipées par les entreprises : quels facteurs explicatifs en France ?**
Thomas Bézy, Catherine Bruneau, Cédric Crofils, Étienne Lavenant et Dimitris Mavridis
- 77 Diversité sectorielle et croissance de l'emploi local en France**
Mounir Amdaoud et Nadine Levratto

Les jugements et opinions exprimés par les auteurs n'engagent qu'eux-mêmes,
et non les institutions auxquelles ils appartiennent, ni a fortiori l'Insee.

En chemin vers la neutralité carbone. Mais quel chemin ?

On the Way to Net Zero. But Which Way?

Riyad Abbas*, Nicolas Carnot*, Matthieu Lequien*,
Alain Quartier-la-Tente* et Sébastien Roux*

Résumé – À partir d'un modèle de choix d'investissement optimal, nous décrivons les transitions optimales vers la neutralité carbone qui respectent des contraintes climatiques de type plafonds ponctuels d'émissions de gaz à effet de serre ou plafond du cumul d'émissions. Nous montrons que *i*) une mise au rebut anticipée du capital brun – émetteur de gaz à effet de serre – ne peut pas se produire avec des cibles ponctuelles ; *ii*) pour limiter le réchauffement à un niveau donné, introduire explicitement cette contrainte sous la forme d'un cumul d'émissions à ne pas dépasser minimise le coût économique associé, induisant une mise au rebut initiale élevée avec des émissions cumulées limitées. Des plafonds d'émissions réguliers dès la première année bien choisis entraînent une trajectoire proche ; *iii*) à contrainte de cumul d'émissions donné, retarder la transition augmente les coûts et la mise au rebut ; *iv*) l'investissement annuel total durant et après la transition est inférieur à celui de l'état initial.

Abstract – Based on an optimal investment choice model, we describe the optimal transitions to carbon neutrality that are in line with climate-related constraints such as one-off greenhouse gas emission caps or a cap on cumulative emissions. We show that *i*) the early scrapping of brown capital – greenhouse gas emitters – cannot occur with one-off targets; *ii*) in order to limit global warming to a given level, the explicit introduction of such a constraint in the form of a cumulative emissions total not to be exceeded minimizes the associated economic cost, resulting in an initially high level of scrapping with limited cumulative emissions. Well-chosen regular emissions caps from the first year result in a similar trajectory; *iii*) with a given cumulative emissions constraint, delaying the transition increases both costs and scrapping; *iv*) the total annual investment during and after the transition is lower than that of the initial state.

JEL : Q01, Q54, Q56, E01, E21, O13

Mots-clés : changement climatique, modèle de Ramsey, technologie verte, modèle dynamique

Keywords: climate change, Ramsey model, green technology, dynamic model

* Insee. Correspondance : sebastien.roux@insee.fr

Les auteurs remercient Didier Blanchet, Dominique Bureau, Pauline Givord, Alexandre Godzinski, Adrien Hainaut, Selma Mahfouz, Aude Pommeret, Jean Pisani-Ferry, Katheline Schubert, Xavier Timbeau, Xavier Ragot, ainsi que deux rapporteurs anonymes d'Economie et Statistique / Economics and Statistics et les participants à des séminaires à l'Insee et PSE pour leurs suggestions précieuses.

Reçu en août 2023, accepté en juin 2024.

Les jugements et opinions exprimés par les auteurs n'engagent qu'eux-mêmes, et non les institutions auxquelles ils appartiennent, ni a fortiori l'Insee.

Citation: Abbas, R., Carnot, N., Lequien, M., Quartier-la-Tente, A. & Roux, S. (2024). On the Way to Net Zero. But Which Way? *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 544, 3–26. doi: 10.24187/ecostat.2024.544.2121

La lutte contre le réchauffement climatique exige des efforts importants pour limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES). En 2015, avec l'accord de Paris, 196 parties (195 états + l'Union européenne) se sont mises d'accord pour prendre les mesures nécessaires afin de limiter le réchauffement climatique moyen de la planète bien en deçà de 2 °C, et de préférence sous 1,5 °C, par rapport aux niveaux préindustriels. D'après le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), l'atteinte de la neutralité carbone au niveau mondial avant 2050 est une condition indispensable pour ne pas dépasser 1,5 °C de réchauffement, et avant 2075 pour 2 °C maximum (GIEC, 2022). Afin de respecter l'accord, chacune des parties a établi sa propre feuille de route, fondée sur des engagements censés collectivement conduire à un monde neutre en émissions. En France, il s'agit de la Stratégie française sur l'énergie et le climat (SFEC)¹, qui propose un chemin de décarbonation vers zéro émission nette (ZEN) de gaz à effet de serre en 2050. Cette stratégie inclut également le respect d'un objectif intermédiaire, fixé au niveau de l'Union européenne, celui d'une baisse de 55 % des émissions nettes en 2030 par rapport à 1990 (paquet *Fit for 55*).

La hausse de la température du globe suit quasi-linéairement la hausse du stock de GES dans l'atmosphère terrestre² : pour piloter la lutte contre le réchauffement climatique, il devient donc naturel de chercher à plafonner le cumul des émissions futures directement issues des activités humaines. Le GIEC estime ainsi des « budgets carbone » résiduels pour limiter le réchauffement à un niveau donné (e.g. 1,5 ou 2 °C) avec une certaine probabilité (GIEC, 2022) : ces budgets représentent des plafonds que le cumul des émissions de GES nettes futures (i.e. les émissions brutes moins les capacités d'absorption de la planète) ne doit pas dépasser pour maintenir le réchauffement sous un certain niveau avec une probabilité donnée.

Du lien très fort entre température et stock de GES dans l'atmosphère, il découle aussi naturellement que le réchauffement ne peut être stabilisé que si le stock de GES dans l'atmosphère n'augmente plus, c'est-à-dire si le monde est « neutre en carbone » : les émissions brutes de GES s'établissent alors au même niveau que le puits de carbone, c'est-à-dire les capacités d'absorption de la planète (naturelles : océans, sols et végétation ; et artificielles : technologies de captage et de séquestration du carbone). Les stratégies nationales de décarbonation, qui affichent souvent un objectif de neutralité

carbone, sont aussi souvent présentées comme des réponses pour limiter le réchauffement de la planète à moins de 1,5 °C (et au maximum 2 °C). Or la neutralité à partir d'une date donnée est atteignable par de nombreux sentiers possibles, induisant des cumuls d'émissions nettes qui peuvent être très différents en fin de transition. Le monde peut devenir neutre après avoir émis n'importe quelle quantité de GES a priori. En particulier, rien ne garantit que les trajectoires visant la neutralité carbone en 2050 soient cohérentes avec un réchauffement limité à 1,5 °C (ou 2 °C).

Parvenir à la neutralité nécessite une action de décarbonation profonde de la consommation et des modes de production, mobilisant trois principaux leviers : la sobriété, l'efficacité (en particulier énergétique) et la décarbonation de la production. Ces deux derniers leviers conduisent à substituer aux technologies carbonées des technologies propres, peu ou non émissives (la voiture électrique, les énergies renouvelables, les logements à haute performance énergétique ou encore l'agrobiologie). Ces technologies existent déjà pour la plupart. À l'avenir le progrès technique devrait en faire apparaître de nouvelles, et rendre les modes de production verts plus compétitifs face aux carbonés.

La transition peut nécessiter de mettre au rebut prématurément du capital brun pour respecter les objectifs de limitation des émissions de carbone, créant des actifs sans valeur, que l'on qualifie d'échoués. Ces actifs incluent les ressources naturelles (stocks de charbon, gaz et pétrole laissés dans le sol), les actifs physiques (centrales à charbon, hauts fourneaux) et les actifs financiers (actions et obligations des industries extractives ou énergivores). Le NGFS (2022) a établi des scénarios de décarbonation mondiaux, variant selon l'intensité et la précocité des efforts : transition ordonnée (efforts immédiats et progressifs jusqu'en 2050), désordonnée (pas d'effort avant 2030 puis rattrapage vigoureux), ou désordonnée et inefficace (efforts insuffisants et variables entre pays). L'IRENA (2017) estime les actifs échoués à 1 point de PIB de 2019 annuellement entre 2019 et 2050 en cas de transition désordonnée, soit deux fois

1. La SFEC est constituée de la loi de programmation énergie-climat (LPEC), de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) et du plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC).

2. Le GIEC (2022) estime ainsi la sensibilité climatique (i.e. l'augmentation de la température moyenne globale résultant d'un doublement du stock de GES dans l'atmosphère) à une valeur moyenne de 3 °C. Cette relation linéaire entre hausse du stock de GES et hausse des températures est valable également en projection grâce aux modélisations (voir figure SPM.10, GIEC, 2023).

plus qu'avec une transition ordonnée. Cette estimation compare deux scénarios : transition immédiate pour la cible de 2 °C et transition différée à 2030 respectant aussi cette cible de 2 °C. Les montants d'actifs échoués, calculés par différence entre les deux scénarios, toucheraient principalement le secteur du bâtiment dans l'Union européenne.

Nous proposons ici un modèle macroéconomique stylisé visant à éclairer les enjeux liés à la transition de processus de production carbonés à d'autres plus propres, au niveau français, et à évaluer les effets de différentes stratégies de décarbonation, comme l'introduction d'une contrainte de budget carbone résiduel à respecter et/ou la fixation de plafonds d'émissions annuels. Nous abordons ainsi les questions suivantes : quelle stratégie d'investissements mettre en œuvre pour respecter un budget carbone compatible avec une limitation ambitieuse du réchauffement climatique ? Quelles sont les différences, économiques et environnementales, entre une politique fondée sur le plafonnement d'un cumul d'émissions et des politiques contraignantes sur les flux annuels (comme ZEN ou *Fit for 55*) ? Quel est le coût à payer selon la stratégie de décarbonation retenue ? Quel coût y a-t-il à prendre du retard dans la décarbonation ? La transition conduit-elle nécessairement à mettre au rebut du capital brun, et si oui, dans quelle mesure et quand ?

Notre « modèle-jouet » s'inscrit dans l'esprit du rapport Pisani-Ferry & Mahfouz (2023), qui encourage à l'élaboration et l'utilisation de modèles stylisés pour éclairer les grands enjeux de la transition énergétique. Ces modèles n'ont pas vocation à remplacer les modèles détaillés existants (ils seraient bien trop frustes, par exemple, pour évaluer un sentier de décarbonation aussi détaillé que ne le fait la SFEC) mais plutôt à éclairer des questions particulières, sur la base de jeux d'hypothèses restreints, quitte à les comparer ensuite aux résultats des modèles détaillés et à s'interroger sur les écarts. Par ses chroniques d'investissements bruns et verts, les résultats de notre modèle apportent un nouvel éclairage. Tandis que Pisani-Ferry & Mahfouz (2023) privilégie une approche ascendante (*bottom-up*), consistant à agréger les besoins d'investissements par secteur, notre choix de modélisation conduit à calculer des chroniques d'investissements au niveau macroéconomique (*top down*), en réponse à des contraintes et en tenant compte des effets de bouclage.

Dans la lignée de Rozenberg *et al.* (2020) et Acemoglu *et al.* (2012), le modèle prend en

compte deux formes de capital, selon que son utilisation pour produire émet des GES (capital brun) ou non (capital vert). Les quantités utilisées dans l'économie de ces deux types de capitaux dépendent des contraintes sur les émissions de carbone, fixées de façon exogène. Dans ce cadre, la décarbonation de l'économie a lieu par le remplacement progressif du capital brun par le capital vert. Ces deux formes de capital participent au processus de production, mais peuvent avoir des productivités différentes et sont imparfaitement substituables. Une partie de la production annuelle sert à la consommation des ménages, le reste aux investissements brun et vert. Les chroniques de consommation, d'investissements brun et vert et de quantités de capital échoué³ sont décidées par un planificateur social, qui a pour objectif de maximiser le bien-être intertemporel sous contraintes d'émissions. L'investissement est irréversible : le planificateur ne peut transformer du capital brun en vert ou en consommation. En revanche il a la possibilité de jeter tout ou partie du capital brun à n'importe quelle date, contrairement à Rozenberg *et al.* (2020) où le capital brun peut seulement être sous-utilisé⁴.

Pour décarboner, le planificateur peut remplacer le capital brun obsolète par du capital vert, au rythme de sa dépréciation. Si une forte réduction des émissions est nécessaire, cette stratégie est insuffisante, car la baisse des émissions est limitée par cette dépréciation naturelle. Le planificateur peut alors éliminer du capital brun, réduisant ainsi la production future. Le modèle examine l'évolution des investissements et des stocks de capital selon le type et la sévérité des contraintes de chaque scénario de décarbonation. Le calibrage est fait pour la France, avec une estimation initiale du capital brun fondée sur les comptes nationaux et les chroniques d'investissements climat d'I4CE (2022). Ces investissements représentent le montant nécessaire pour remplacer le capital brun excédentaire (celui dépassant les capacités du puits de carbone), permettant d'estimer sa valeur initiale à son coût de remplacement.

3. Les énergies, fossiles et renouvelables, ne sont pas directement modélisées comme des intrants, mais sont intégrées au bien agrégé, consommé ou investi. Le capital installé, brun ou vert, inclut celui nécessaire à la production d'énergie : une partie du capital brun produit des énergies fossiles (gaz et charbon) et une partie du capital vert produit les autres énergies (nucléaire et renouvelables).

4. Nous n'introduisons pas la possibilité de sous-utiliser le capital. Les contraintes climatiques visent à transformer l'économie pour qu'elle fonctionne normalement tout en respectant les limites d'émissions. La sous-utilisation du capital pourrait contourner les politiques de décentralisation de l'équilibre centralisé, une possibilité que le législateur doit anticiper. Cependant, pour le planificateur central recherchant des trajectoires de transition optimales, cette stratégie n'est pas pertinente.

Contrairement à Rozenberg *et al.* (2020), notre modèle est calibré au niveau français.

Les résultats des simulations doivent être interprétés avec prudence, car ils sont intrinsèquement liés au cadre de modélisation et au choix des paramètres retenus, dont certains sont encore mal connus dans la littérature. Une approche ascendante pourrait avoir des conclusions différentes sur l'échouage mis en évidence dans certaines simulations. Les nombreuses analyses de robustesse menées révèlent d'ailleurs que les résultats obtenus sont parfois sensibles au paramétrage. Il s'agit donc de proposer des ordres de grandeur, sous un certain jeu d'hypothèses, des efforts induits par la transition et de leur répartition dans le temps, ainsi qu'une illustration des mécanismes économiques à l'œuvre lorsque différentes politiques d'atténuation sont mises en place. En outre, le modèle reste très stylisé et dévoile l'équilibre centralisé, il ne prend pas en compte les instruments de décentralisation de cet équilibre centralisé et les imperfections de marchés qui pourraient compliquer l'atteinte de cet équilibre dans un monde décentralisé. Par conséquent, les simulations représentent probablement une borne basse des coûts de la transition. Enfin, les résultats en termes de réchauffement mondial reposent sur l'hypothèse que dans les autres pays, les émissions cumulées restent également inférieures au budget correspondant à ce réchauffement. De fait, l'action en France ne renseigne que sur la part de la France aux efforts mondiaux de limitation du réchauffement⁵. Ils reposent aussi sur l'estimation des budgets carbone restants et le lien température-GES projeté pour des niveaux de GES supérieurs à ce qui est observé. Les équivalences entre émissions cumulées de GES en France et réchauffement mondial sont données à titre illustratif.

Nos simulations permettent de comparer les conséquences de différents objectifs de décarbonation sur la chronique optimale des investissements bruns et verts et des actifs échoués en France, entre 2022 et 2050 (année de réalisation visée de la neutralité carbone). Un scénario de référence, d'inaction climatique, est construit, dépourvu de toute contrainte sur les émissions. Puis quatre scénarios de décarbonation sont évalués, partageant tous l'objectif ZEN à partir de 2050, avec pour cibles : 1) l'objectif ZEN uniquement, 2) la baisse de 55 % des émissions nettes en 2030 par rapport à leur niveau de 1990 (*Fit for 55*), 3) *Fit for 55* en 2030 et la baisse de 90 % des émissions nettes en 2040, et 4) la mise en place d'un budget carbone national compatible avec l'objectif le plus ambitieux de

l'accord de Paris (+1,6 °C de réchauffement). Puis une série de scénarios, proposant d'évaluer les effets de l'intensification du ciblage par plafonds annuels d'émissions est présentée, avec un ciblage tous les 10, 5 puis 2 ans. Enfin, trois scénarios de transition retardée sont évalués, selon la date du début de la gestion intertemporelle optimale du budget carbone restant (2023, 2028 ou 2033).

Avec les trajectoires optimales, et en retenant les équivalences mentionnées entre émissions et réchauffement, le scénario ZEN est compatible avec un réchauffement à 1,8 °C, le scénario *Fit for 55* à 1,75 °C, et celui *Fit for 55 + 90* à 1,65 °C. Parmi les différents scénarios étudiés, c'est avec la gestion intertemporelle d'un budget carbone que la montée en charge de l'investissement vert est la plus précoce. Dès la première année, l'investissement brun disparaît, engageant ainsi rapidement la transition. En revanche, avec le seul objectif ZEN, l'investissement brun survit plusieurs années, retardant ainsi la transition. Ce n'est qu'à partir de 2027 qu'il disparaît, en même temps que le vert se déploie enfin. L'ajout de l'objectif *Fit for 55* en 2030 permet bien d'avancer la transition et d'accélérer la disparition de l'investissement brun, mais elle suscite également l'apparition d'un phénomène indésirable de *stop and go* : l'investissement brun réapparaît provisoirement en 2030 et continue juste après, avant de disparaître définitivement. L'ajout à ce dernier scénario d'une cible en 2040 de baisse des émissions nettes de 90 % élimine ce phénomène : l'investissement brun ne redémarre pas juste après le point de passage 2030, ni après le point de passage 2040 d'ailleurs.

Ces premiers scénarios permettent également d'illustrer un enseignement fondamental du modèle : un échouage anticipé n'est jamais optimal avec des plafonds ponctuels d'émissions, ainsi l'échouage de capital brun ne s'observe qu'en 2050 avec le seul objectif ZEN, en 2030 et 2050 avec l'ajout de *Fit for 55*, et en 2030, 2040 et 2050 avec un plafond supplémentaire en 2040. Ces contraintes ponctuelles ne permettent pas naturellement d'étaler les efforts dans le temps, ce qui peut compliquer leur implémentation. Au contraire la gestion optimale d'un budget carbone dans le temps s'accompagne d'échouages qui peuvent avoir

5. Le modèle décrit les émissions à la production nationale, c'est-à-dire l'inventaire national de GES, sur lequel portent les engagements internationaux. L'inventaire national diffère de l'empreinte carbone, qui correspond aux émissions liées à la consommation nationale (en excluant les émissions liées aux exportations et en intégrant celles liées aux importations).

lieu chaque année et être massifs la première année avec un objectif climatique ambitieux.

Un autre enseignement du modèle est que, dans tous les scénarios de transition, l'investissement total est en moyenne inférieur à ce qu'on observe initialement. En effet, la contrainte carbone déplace la frontière de production de sorte que, à l'état final post-transition, moins de capital est mobilisé pour produire, le surcroît de capital vert ne compensant pas la baisse de capital brun forcée par la contrainte. Par rapport à l'état initial, l'investissement total est donc forcément plus faible à l'équilibre final, et il ressort aussi plus faible en moyenne durant la transition dans tous les scénarios étudiés.

Pour atteindre un objectif de réchauffement maximal donné (un cumul d'émissions donné), introduire explicitement cette contrainte, sous la forme d'un budget carbone restant, permet de minimiser le coût économique associé. Une trajectoire proche d'une telle trajectoire optimale associée au respect d'un budget carbone peut être obtenue avec des plafonds d'émissions régulièrement espacés dans le temps, qui s'appliquent dès la première année, et choisis à partir de la chronique d'émissions de cette trajectoire optimale. Quand l'objectif climatique est ambitieux, rapprocher dans le temps ces jalons intermédiaires réduit la dérive qui peut se produire entre ces jalons.

Enfin, la transition est d'autant plus coûteuse qu'elle est tardive. Nous comparons des scénarios de transition différée⁶ : objectif ZEN dans un premier temps puis démarrage de la transition à partir d'une certaine date pour respecter le budget restant compatible avec un réchauffement à 1,6 °C. Plus cette date est tardive, plus une part importante de ce budget est déjà consommée, et plus le stock de capital brun doit être réduit pour émettre très peu de GES sur la durée restante avant 2050. Ainsi, l'année du passage à la gestion du budget carbone restant, l'échouage est deux fois supérieur avec un changement de politique en 2028 plutôt qu'en 2023, et trois fois supérieur avec un changement en 2033. La consommation est inférieure d'1 % en moyenne sur la période de transition dans le cas d'un changement de politique retardé à 2033 plutôt qu'en 2023.

Avec tous les différents types de contraintes sur les émissions de GES, les trajectoires optimales font souvent apparaître des échouages très importants une année donnée. Il est probable que pour réduire les conflits intergénérationnels qui en découlent, l'effort soit lissé dans le temps. Nous introduisons donc un coût à échouer du

capital dans la fonction d'utilité, quadratique en la quantité de capital échoué. L'échouage est alors plus ou moins étalé dans le temps selon l'importance de ces coûts, reflétant des chroniques plus réalistes, par leurs montants comme par leur profil temporel. Avec des coûts élevés à l'échouage, qui limitent la baisse du capital brun en début de période, les émissions baissent plus lentement qu'avec des coûts modérés ou nuls, l'économie doit donc être plus proche de la neutralité en fin de période pour compenser le surcroît d'émissions du début de période.

Nous présentons le fonctionnement de ce modèle dans la section 1, puis décrivons nos différents résultats en section 2 avant de conclure. Une revue de littérature situant la contribution de ce modèle par rapport à l'état de l'art est disponible en Annexe en ligne (lien de l'Annexe en ligne à la fin de l'article).

1. Présentation du modèle

1.1. Secteur productif

Chaque année t , l'économie évolue suivant les étapes suivantes :

1. Au début de l'année t , le capital disponible est K_{t-1}^i ($i = b$ (brun) ou v (vert)), issu de l'accumulation du capital jusqu'à la date précédente. À ce moment, un montant de capital brun, ϕ_t^b , peut être mis au rebut (capital échoué), de sorte que seul le capital brun restant $K_{t-1}^b - \phi_t^b$ est utilisé pour la production.
2. Une quantité de bien est produite, dépendant du capital brun encore disponible et du capital vert, $Y_t = F(K_{t-1}^b - \phi_t^b, K_{t-1}^v, \bar{L})$, où $\bar{L}$ correspond à la population, supposée ici stable et constante dans le temps. La présence du facteur travail permet, si on le souhaite et comme c'est souvent le cas dans les modèles de type Ramsey, de se placer dans un cadre où les rendements d'échelle sont constants, tout en ayant décroissance des rendements du capital.
3. Une fois la production réalisée, les niveaux de consommation C_t et d'investissements I_t^i ($i = b, v$) peuvent être choisis, avec comme contrainte que $C_t + I_t^b + I_t^v \leq Y_t$.
4. Une fraction δ du capital disparaît.

6. Nos scénarios de transition différée se distinguent de ceux de l'IRENA (IRENA, 2017) pour la période de prétransition. Pour l'IRENA, jusqu'en 2030, c'est un business as usual qui est mis en place. Dans nos simulations, en revanche, la période de prétransition est une trajectoire ZEN, déjà compatible avec l'objectif 1,8 °C (d'après nos simulations), mais insuffisante pour 1,6 °C.

Finalement, la dynamique d'investissement conduit à une accumulation du capital brun et du vert représentée par les équations suivantes :

$$\begin{cases} K_t^b = (1 - \delta)(K_{t-1}^b - \phi_t^b) + I_t^b \\ K_t^v = (1 - \delta)K_{t-1}^v + I_t^v \end{cases}$$

Dans notre modélisation, les deux formes de capital ne sont pas exclusives l'une de l'autre : elles coexistent dans l'économie. À l'équilibre stationnaire, leur part respective dépend de leur productivité et de leur substituabilité. L'utilisation de capital brun pour la production émet des GES, l'utilisation du capital vert n'en émet pas. Ainsi, les émissions brutes de l'année t sont égales à $e_b(K_{t-1}^b - \phi_t^b)$, où e_b est l'émissivité moyenne, c'est-à-dire l'émission de GES générée par l'utilisation d'une unité de capital brun.

L'objectif ZEN permet que survive du capital brun au-delà de 2050, mais de manière contrainte par la capacité du puits de carbone, les émissions devant simplement le saturer. Dans le modèle, une partie du capital brun, dite « résiduelle », est calculée pour que ses émissions saturer exactement le puits. Ce puits étant considéré constant, le capital résiduel l'est également, un investissement brun résiduel compensant chaque année sa dépréciation. Le capital brun résiduel est noté $\underline{K}^b$, et le non résiduel $\tilde{K}_t^b$, avec $K_t^b = \tilde{K}_t^b + \underline{K}^b$. Le niveau d'investissement brun résiduel est égal à $\delta \underline{K}^b$, et les émissions nettes e_t sont celles émises par le capital brun non résiduel (et qui est le seul concerné par l'échouage) : $e_t = e_b(\tilde{K}_{t-1}^b - \phi_t^b)$.

La dynamique d'accumulation du capital suit le modèle de Ramsey (Ramsey, 1928 ; Mercenier & Michel, 1994) : il faut arbitrer entre consommation courante et investissement, qui servira à la consommation future. Avec deux types de capital, une nouvelle considération émerge : remplacer le capital brun par le capital vert tout en préservant la consommation. Cela peut se faire en laissant disparaître naturellement le capital brun et en le remplaçant progressivement par du capital vert. Ces décisions de remplacement conduisent naturellement à diminuer le potentiel de l'économie, dans la mesure où elles ne sont pas induites par l'efficacité relative des deux types de capital. L'urgence de la transition peut nécessiter une réduction des émissions plus rapide que la dépréciation du capital brun, impliquant son retrait anticipé. La section suivante détaille les contraintes d'émissions et l'incitation à éliminer plus ou moins rapidement le capital brun.

1.2. Contraintes sur les émissions

Les ambitions de lutte contre le réchauffement climatique se traduisent par des contraintes sur

les émissions nettes de GES. Leur introduction favorise le capital vert au détriment du brun dans le processus productif.

Trois types de contraintes sont considérées :

1. La contrainte de ZEN : elle est commune à tous les scénarios de décarbonation et détermine l'état stationnaire terminal. À partir de l'année T_E : $K_t^b = \underline{K}^b$, après que le planificateur s'est débarrassé du capital brun non résiduel au début de T_E : $\phi_{T_E} = K_{T_E-1}^b - \underline{K}^b$.

$$\forall t \geq T_E, e_t = 0.$$

2. Un budget carbone, sur les émissions nettes cumulées, compatible avec une limitation du réchauffement climatique à un niveau donné :

$$\sum_{t=t_0+1}^{T_E} e_t \leq E_{max} \quad (1)$$

où t_0 est l'année de base et la date d'introduction de la contrainte dans l'économie. Dans les applications, nous partons de $t_0 = 2022$, et considérerons dans la plupart des situations un budget carbone compatible avec un réchauffement inférieur à 1,6 °C ou 1,8 °C avec une probabilité de 50 %.

3. Les contraintes ponctuelles sur les flux d'émissions nettes l'année t , telles que $e_t \leq \bar{e}_t$. Par exemple, *Fit for 55* en 2030 : $e_{2030} \leq 0,45 \times e_{1990}$.

Le modèle repose sur l'hypothèse que, une fois connues, les contraintes sont parfaitement anticipées, ce qui permet au planificateur d'établir des chroniques d'investissements brun et vert pour toute la période. D'une certaine manière, un choc sur l'économie a lieu au moment où les contraintes sont révélées, et le modèle décrit justement les conséquences de ce choc. La section suivante précise comment les décisions d'investissement sont prises.

1.3. Programme du planificateur social

On suppose que les décisions d'investissement et de consommation sont prises par un planificateur social, qui maximise la somme intertemporelle actualisée des utilités tirées de la consommation à chaque date ($u(C_t)$), sous contraintes. L'équilibre est atteint, par résolution du programme suivant, assorti des contraintes ci-dessous :

$$\max_{\substack{\tilde{I}_{t_0+1}^b, \dots, \tilde{I}_{T_E}^b \geq 0 \\ \phi_{t_0+1}^b, \dots, \phi_{T_E}^b \geq 0 \\ I_{t_0+1}^v, \dots, I_{T_E}^v \geq 0}} \sum_{t=t_0+1}^{+\infty} \frac{u(C_t)}{(1 + \rho)^{t-t_0}}.$$

- Équilibre ressources-emplois :

$$F(K_{t-1}^b - \phi_t^b, K_{t-1}^v, \bar{L}) = C_t + \tilde{I}_t^b + \delta \underline{K}^b + I_t^v.$$

Ce qui est produit à l'aide du capital installé (duquel on enlève le capital échoué ϕ_t^b) est utilisé

pour consommer et pour investir en capital brun (y compris résiduel) ou vert à la date t .

- Accumulation des capitaux brun et vert :

$$\begin{cases} K_t^b = \tilde{K}_t^b + \underline{K}^b \\ \tilde{K}_t^b = (1-\delta)(\tilde{K}_{t-1}^b - \phi_t^b) + \tilde{I}_t^b \\ K_t^v = (1-\delta)K_{t-1}^v + I_t^v \\ 0 \leq \phi_t^b \leq \tilde{K}_{t-1}^b \end{cases}$$

Ces équations décrivent la dynamique d'accumulation du capital brun non résiduel et du capital vert. Le capital brun résiduel reste constant : il n'y est investi ($\delta \underline{K}^b$) que pour le renouveler.

- Accumulation des émissions nettes de carbone : $E_t = E_{t-1} + e_t$, avec $e_t = e_b(\tilde{K}_{t-1}^b - \phi_t^b)$.
- Contrainte ZEN : $\phi_{T_E}^b = \tilde{K}_{T_E-1}^b$, puis $\forall t \geq T_E$: $\tilde{K}_t^b = \tilde{I}_t^b = 0$ et $K_t^b = \underline{K}^b$, et $\forall t \geq T_E + 1$: $\phi_t^b = 0$.
- Contraintes ponctuelles sur les émissions annuelles :

$$e_t \leq \bar{e}_t, \phi_t^b = \max\left(\tilde{K}_{t-1}^b - \frac{\bar{e}_t}{e_b}, 0\right).$$
- Budget carbone à ne pas dépasser (équation (1)).

Ce programme peut se réécrire sous forme récursive de la manière suivante, à chaque date t (Stokey *et al.*, 1989), en définissant

$$V(I_t^b, I_t^v, \phi_t^b | K_{t-1}^b, K_{t-1}^v, E_{t-1}) = u(C_t) + \frac{1}{1+\rho} W(K_t^b, K_t^v, E_t)$$

où les variables $(K_{t-1}^b, K_{t-1}^v, E_{t-1})$ sont les variables d'état, affectées d'une période à l'autre par les variables de contrôles (I_t^b, I_t^v, ϕ_t^b) , et où

$W(K_{t-1}^b, K_{t-1}^v, E_{t-1}) = \max_{I_t^b, I_t^v, \phi_t^b} V(I_t^b, I_t^v, \phi_t^b | K_{t-1}^b, K_{t-1}^v, E_{t-1})$ est la valeur atteinte par la fonction d'utilité indirecte, une fois optimisée par rapport aux variables de contrôle, toujours sous les mêmes contraintes que celles exposées ci-dessus.

Le système est alors complètement résolu en définissant les valeurs initiales des variables d'état, et admet une solution unique sous les hypothèses standard de régularité et de convexité des fonctions d'utilité et de production (Stokey *et al.*, 1989).

1.4. Solutions stationnaires

En l'absence de contrainte carbone, capitaux brun et vert coexistent à l'équilibre stationnaire lorsqu'ils ne sont pas parfaitement substituables dans le processus de production. Leurs niveaux respectifs, K_0^v et K_0^b , sont alors solutions des équations (voir Annexes en ligne S1 et S2 pour la démonstration) :

$$\rho + \delta = \frac{\partial F}{\partial K^b}(K_0^b, K_0^v) = \frac{\partial F}{\partial K^v}(K_0^b, K_0^v).$$

Avec une économie initialement stationnaire et des contraintes carbone annoncées à la date t_0 , les niveaux de capital brun et vert installés au début de l'année $t_0 + 1$ correspondent à leur niveau stationnaire de la fin de l'année t_0 . Ce n'est qu'à cette date que le planificateur prend des décisions d'investissements et de consommation compatibles avec les contraintes carbone, faisant alors sortir l'économie de son état initial.

Entre $t_0 + 1$ et T_E , les différentes contraintes carbone peuvent s'appliquer (notamment ponctuelles), générant des chocs dans l'économie.

Au-delà de T_E , la contrainte ZEN s'impose, et l'environnement redevient stable. Le seul capital brun restant est le capital brun résiduel ($\underline{K}^b$), qui sature le puits de carbone. À long terme, un nouvel état stationnaire est atteint, tel que l'investissement total maintient la consommation constante. Le capital vert final ainsi obtenu (K_∞^v) est solution de l'équation :

$$\rho + \delta = \frac{\partial F}{\partial K^v}(\underline{K}^b, K_\infty^v).$$

1.5. Calibrage

1.5.1. Les formes fonctionnelles

La fonction de production prend comme intrants les capitaux brun et vert ainsi que le travail : $Y = F(k(K^b, K^v), \bar{L})$, avec $F(k, \bar{L}) = k^\alpha \bar{L}^{1-\alpha}$, avec $\bar{L} = 1$ par normalisation, et k la fonction de capital synthétique. On fait l'hypothèse que celle-ci combine les capitaux brun et vert selon une technologie CES, à élasticité de substitution constante σ . Ainsi :

$$Y = F(k(K^b, K^v), 1) = \left[\left(a_b K^b \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \left(a_v K^v \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}.$$

La forme CES autorise la coexistence du brun et du vert dans les choix d'investissements.

Pour l'utilité, on choisit, classiquement, une forme logarithmique : $u(C) = \ln(C)$.

Les formes choisies sont donc bien concaves (pourvu que $\sigma > 1$ dans la fonction de production), ce qui garantit l'existence d'une solution stationnaire au programme du planificateur ainsi que la convergence vers cette solution.

1.5.2. Initialisation et paramètres structurels

Les valeurs du PIB et du capital net fixe installé total sont initialisées sur 2019, année pour laquelle les grandeurs économiques sont bien connues, mais l'année 2022 est choisie comme année de base pour le démarrage des simulations (tableau 1). Les émissions de GES sont tirées des inventaires nationaux pour 2022, afin de tenir compte de la décarbonation de l'économie depuis 2019 (SDES, 2023).

Tableau 1 – Valeurs initiales et observées des grandeurs du modèle

Variable	Niveaux de départ
PIB	2 426 Mds €
Capital brun	4 481 Mds €
Capital vert	3 667 Mds €
Émissions brutes de GES	404 MtCO ₂ eq

Les parts respectives de vert et de brun dans le capital total⁷ sont estimées à partir des chroniques d'investissements climat d'I4CE (2022)⁸.

Dans notre approche, le brun correspond aux biens émissifs ou à leur partie émissive. Par exemple, dans un logement, la chaudière au fioul et les murs mal isolés sont du capital brun, tandis que le reste du logement est du capital vert. Si les parties émissive et non émissive ne sont pas séparables, l'ensemble est considéré comme brun. Ainsi, décarboner le transport implique de remplacer les voitures thermiques par des électriques, pas seulement les moteurs : donc les voitures thermiques sont entièrement du capital brun. La distinction entre capital brun et vert dépend des technologies existantes : du fait des émissions de GES induites par sa production, une cimenterie est considérée comme du capital brun ; mais associée à une technologie efficace de décarbonation, comme un système de captage et de stockage du CO₂, elle deviendrait verte.

L'élasticité de substitution σ entre capitaux brun et vert est fixée à trois, valeur cohérente avec la valeur de l'action pour le climat (VAC) en 2050 du rapport A. Quinet (2019)⁹ et alignée avec les estimations empiriques existantes¹⁰. Le paramètre α est déduit des valeurs du PIB et des capitaux brun et vert à l'année initiale :

$$\alpha = \frac{(\rho + \delta)(K_{2019}^b + K_{2019}^v)}{Y_{2019}}.$$

Les valeurs des paramètres a_b et a_v sont déduites des conditions du premier ordre à l'état stationnaire initial.

On retient un taux de dépréciation du capital de 5 %, proche de celui estimé à partir des données de comptabilité nationale pour 2019, en rapportant la consommation de capital fixe au capital fixe installé. Le taux d'actualisation de 2,5 % découle de la règle de Ramsey élargie, suivant É. Quinet (2013), tenant compte des incertitudes sur la croissance économique future. Cette valeur est un compromis entre les propositions de Stern (2006) (1,4 %) et de Nordhaus (2007) (4,5 %), et se situe dans l'intervalle des valeurs de référence des pays de l'OCDE, allant de 0 % (Pays-Bas) à 3,5 % (Royaume-Uni) (OECD, 2019).

Le tableau 2 présente les valeurs retenues pour les différents paramètres dans la spécification de base.

Pour ces différents paramètres, des analyses de sensibilité sont conduites, afin de mettre en perspective les principaux messages déduits de la spécification de base (voir Annexe en ligne S4).

Sauf mention contraire, le budget carbone utilisé est de 3,93 GtCO₂eq correspondant à une cible de réchauffement de 1,6 °C, avec probabilité de réussite de 50 %. Il est déduit des budgets carbone planétaires estimés par Lamboll *et al.* (2023). La part de la France dans un budget mondial est considérée comme égale à sa part dans la population mondiale en 2019 (soit 0,88 %). Les équivalences entre budgets carbone pour la France et réchauffement sont fournis dans l'Annexe en ligne S3.

2. Résultats

Nos simulations comparent les conséquences de différents objectifs de décarbonation sur la chronique optimale des investissements bruns et verts, des actifs échoués et de la consommation en France, entre 2023 et 2050 (année de réalisation visée de la neutralité carbone). Un scénario

7. Les comptes de patrimoine de l'Insee ne permettent pas de mesurer directement capital brun et capital vert. Par exemple, pour l'énergie, il n'est pas possible de séparer le vert (renouvelable et nucléaire) et le brun (centrales à gaz et à charbon).

8. Les chroniques d'I4CE (2022) sont déclinées en cinq scénarios cohérents avec l'objectif ZEN en 2050 : le scénario SNBC et les quatre scénarios « Transitions 2050 » de l'Ademe. Pour le calibrage, nous avons choisi le scénario 3, « Technologies vertes », de l'Ademe, dont la philosophie est proche de notre modèle. Nous supposons que tous les investissements du Panorama visent à remplacer du capital brun par du vert (par exemple les chaudières à gaz ou au fioul par des pompes à chaleur et les voitures thermiques par des électriques). La valeur du capital brun en 2019 est considérée comme égale au coût de son remplacement futur par du vert, soit la somme des investissements climat entre 2019 et 2050. Ainsi, 55 % du capital est estimé brun au départ, le reste étant vert.

9. Avec une élasticité de substitution de trois et un puits de carbone de 85 MtCO₂eq, compatible avec le puits naturel prévu par A. Quinet (2019) entre 75 et 95 MtCO₂eq, le coût d'abattement en 2050 ressort très proche de la VAC obtenue par A. Quinet (2019), soit 775 €/tCO₂.

10. Papageorgiou et al. (2017) proposent une élasticité de substitution de deux entre intrants bruns et verts dans le secteur de l'électricité et proche de trois dans le reste de l'industrie, fondée sur une estimation macroéconomique mobilisant 26 pays entre 1995 et 2009 (hors France). Jo (2022) trouve des élasticités entre deux et cinq à partir de données d'entreprises manufacturières en France, entre 1995 et 2015. Cependant, nos concepts de capital brun et vert sont plus larges que ceux de la littérature, qui se concentrent sur certains secteurs de production, tandis que nous incluons tous les secteurs d'activité. Ainsi, les estimations empiriques ne suffisent pas à fournir une valeur d'élasticité parfaitement adéquate pour notre modèle.

Tableau 2 – Valeurs des paramètres du modèle calibré

Paramètres structurels	Valeur	Plage de valeurs analysées en robustesse
σ	3,00	1,5 - 5,5
e_b	0,09	paramètre dérivé
α	0,39	paramètre dérivé
a_b	3,07	paramètre dérivé
a_v	2,77	paramètre dérivé
ρ	0,025	0,005 - 0,04
δ	0,05	0,01 - 0,10
Puits de carbone	35	5 - 80
$\frac{K_b^b}{K_b^b + K_b^v}$	55	40 - 90

Note : e_b est exprimé en kgCO₂éq/€, le puits de carbone en MtCO₂éq, la part initiale du capital brun dans le capital total en %. Les autres grandeurs sont sans unité. Les paramètres dérivés sont calculés à partir des autres paramètres. Les analyses de robustesse sont disponibles dans l'Annexe en ligne S4.

de référence, d'inaction climatique, est construit, dépourvu de toute contrainte sur les émissions. La comparaison de ce scénario avec les autres permet de mettre en évidence les effets propres des politiques d'atténuation. Cette comparaison ne fournit qu'une analyse partielle de bien-être puisque les dommages climatiques, et donc leur plus ou moins grande atténuation dans les scénarios avec contraintes climatiques, ne sont pas modélisés. Puis quatre scénarios de décarbonation sont évalués, partageant tous l'objectif ZEN à partir de 2050, avec pour cibles : 1) l'objectif ZEN uniquement, 2) la baisse de 55 % des émissions nettes en 2030 par rapport à leur niveau de 1990 (*Fit for 55*), 3) *Fit for 55* + la baisse de 90 % des émissions nettes en 2040¹¹, et 4) la mise en place d'un budget carbone national compatible avec l'objectif de l'accord de Paris (+1,6 °C de réchauffement).

Ensuite, une série de scénarios évalue les effets de l'intensification du ciblage par plafonds annuels d'émissions, avec un ciblage tous les dix, cinq puis deux ans. Enfin, trois scénarios de transition retardée sont évalués, selon la date du début de la gestion intertemporelle optimale du budget carbone restant (2023, 2028 ou 2033), après une période où seule la contrainte ZEN s'applique.

À long terme, tous les scénarios de décarbonation présentent un profil analogue, car ils convergent vers un même état stationnaire, respectueux de l'objectif ZEN. Dès 2050, leurs trajectoires économiques sont très proches, avec une consommation et un PIB plus faibles que dans le scénario d'inaction.

Les cibles ponctuelles d'émissions maximales de GES, de type *Fit for 55*, s'appliquent en théorie une année seulement, elles ne limitent

pas en principe les émissions ultérieures. Nos simulations montrent qu'après avoir échoué du capital brun à la date du plafond d'émissions, il peut être optimal de réinvestir dans le capital brun juste après. Ce comportement gaspille des ressources et ne réduit que très peu les émissions. C'est une conséquence directe de la formulation de la politique climatique, qui ne plafonne les émissions que pour une année. En pratique, au lieu d'échouer puis de réinvestir dans du capital brun, les entreprises sous-utiliseraient probablement leur capital brun l'année cible, avec un échouage limité (Rozenberg *et al.*, 2020). Ce comportement d'évitement ne renseigne pas tant sur la transition en tant que telle, menée par le planificateur social, que sur les politiques publiques mises en œuvre pour l'atteindre. Or notre travail vise à éclairer avant tout l'équilibre centralisé de la transition, et non sa décentralisation. Nous modélisons donc, dans les différents scénarios, les cibles ponctuelles comme des plafonds qui s'appliquent aussi aux années ultérieures, respectant mieux ainsi l'esprit de la réglementation qui veut conduire à des émissions nettes nulles en 2050. Par exemple, pour *Fit for 55*, les émissions nettes ne peuvent dépasser 45 % de leur niveau de 1990, que ce soit en 2030 ou après.

2.1. Scénario sans contrainte carbone

Dans ce scénario, aucune contrainte ne pèse sur les émissions, ni en flux ni en stock. En 2022,

11. Pour arriver à l'objectif ZEN en 2050, la Commission européenne a récemment proposé de mettre en place une cible intermédiaire, en 2040, visant à réduire de 90 % les émissions de GES, relativement à 1990 (https://commission.europa.eu/news/recommendations-2040-targets-reach-climate-neutrality-2050-2024-02-06_en?prefLang=fr). Contrairement à l'objectif *Fit for 55*, cette nouvelle cible est encore à l'état de proposition.

l'année de base, l'économie est sur un sentier de croissance équilibrée, où investissements verts et bruns coexistent, du fait de leur imparfaite substituabilité dans le processus de production. En l'absence de progrès technique et de croissance démographique, l'économie reste stable et ne quitte jamais l'équilibre stationnaire correspondant à la situation initiale. Les différentes composantes du PIB gardent leurs niveaux de 2022 tout au long de la trajectoire. Les émissions croissent linéairement, ce qui épuise rapidement le budget carbone, en une dizaine d'années.

2.2. Plafonds d'émissions annuels vs respect d'un budget carbone

2.2.1. Zéro émission nette à partir de 2050

Lorsqu'on applique comme seule contrainte la cible de neutralité à l'horizon 2050 (ZEN), les investissements bruns commencent à baisser dès 2025 (figure I), par rapport au scénario sans contrainte carbone. Leur chute est rapide puisqu'ils tombent, dès 2027, au niveau qui assure juste le renouvellement du capital brun résiduel. L'évolution de l'investissement vert se fait en sens inverse : alors qu'il est stable au début à son niveau initial, il augmente nettement

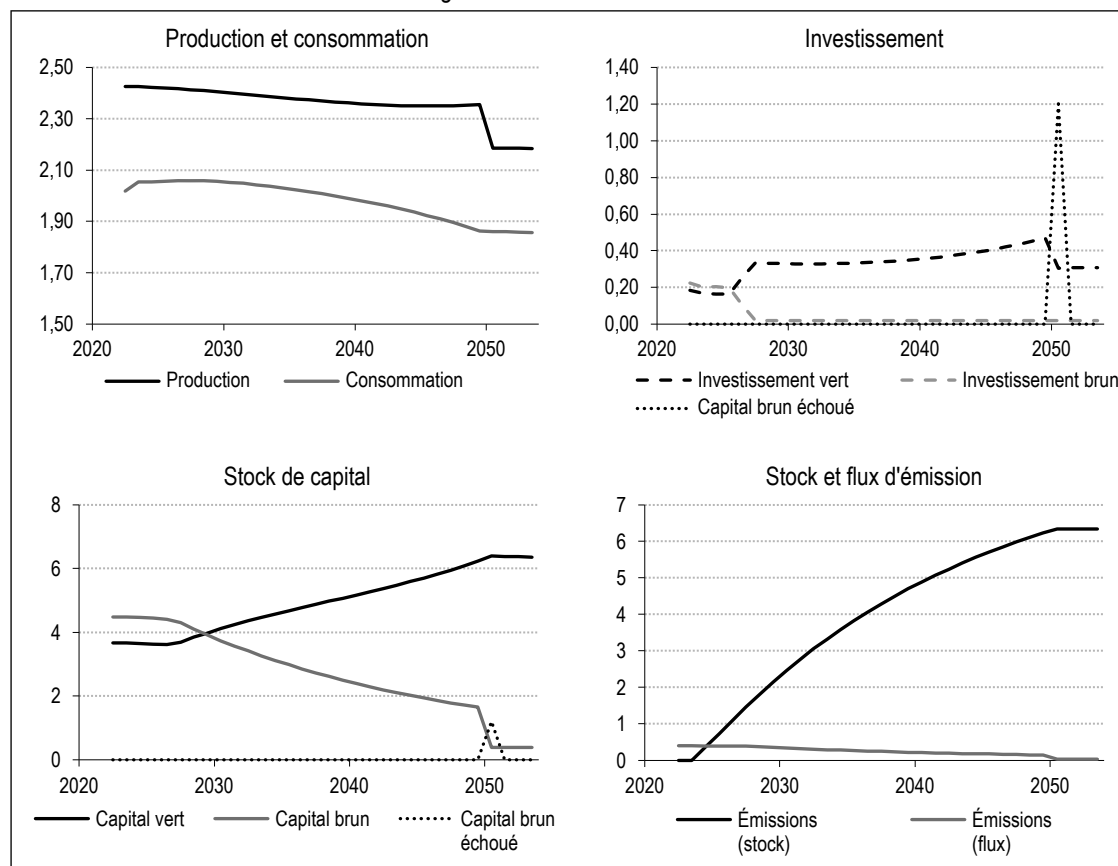
entre 2025 et 2027 pour ensuite se stabiliser. L'investissement vert augmente à nouveau progressivement à l'approche de 2050, ce qui permet de lisser la consommation et d'atténuer sa baisse induite par l'important échouage du capital brun en 2050. En effet, celui-ci provoque une brusque décarbonation de l'économie et une forte réduction des capacités de production, compensée par davantage de capital vert.

La transition du brun au vert est donc assez tardive : ce n'est qu'après plusieurs années que la contrainte ZEN 2050 enclenche vraiment la transition. En effet, comme la contrainte est lointaine, le nouveau capital brun acquis dans les premières années est pour partie naturellement déprécié avant l'horizon ZEN. Le supplément de productivité du capital brun, cumulé sur longue période, rentabilise la fraction restante et importante de capital brun qui est échouée en 2050 pour atteindre la neutralité.

2.2.2. Fit for 55 en 2030 + ZEN à partir de 2050

L'ajout d'une cible intermédiaire en 2030 sur les émissions entraîne une disparition immédiate de l'investissement brun, dont le niveau n'assure plus que le renouvellement du capital brun

Figure I – Scénario ZEN 2050



Note : les émissions de GES sont en GtCO₂ éq ; pour les autres graphiques, l'unité est le millier de Md€.

résiduel dès 2023 (figure II). Au même moment, l'investissement vert augmente. Il y a donc une avancée de la transition, qui est plus précoce que dans le scénario ZEN et commence dès la première année.

Néanmoins, la non-décroissance du plafond d'émissions après 2030 génère un effet pervers. En effet, une fois que le capital brun s'est suffisamment déprécié pour satisfaire la nouvelle contrainte, il devient à nouveau rentable en 2030 d'investir dans le brun pour quelques années encore. En résulte une trajectoire en dents de scie : l'investissement brun disparaît dans un premier temps, avant de réapparaître une fois que la contrainte se fait moins sentir, puis de s'éteindre définitivement en 2033¹².

2.2.3. Fit for 55 en 2030 + 90 % en 2040 + ZEN à partir de 2050

L'ajout au scénario *Fit for 55* d'une cible supplémentaire en 2040, de baisse de 90 % des émissions nettes par rapport au niveau de 1990, provoque un nouvel échouage du capital, cette fois en 2040 (figure III). Celui-ci est même l'échouage le plus important de la trajectoire, près de quatre fois supérieur à celui de 2030.

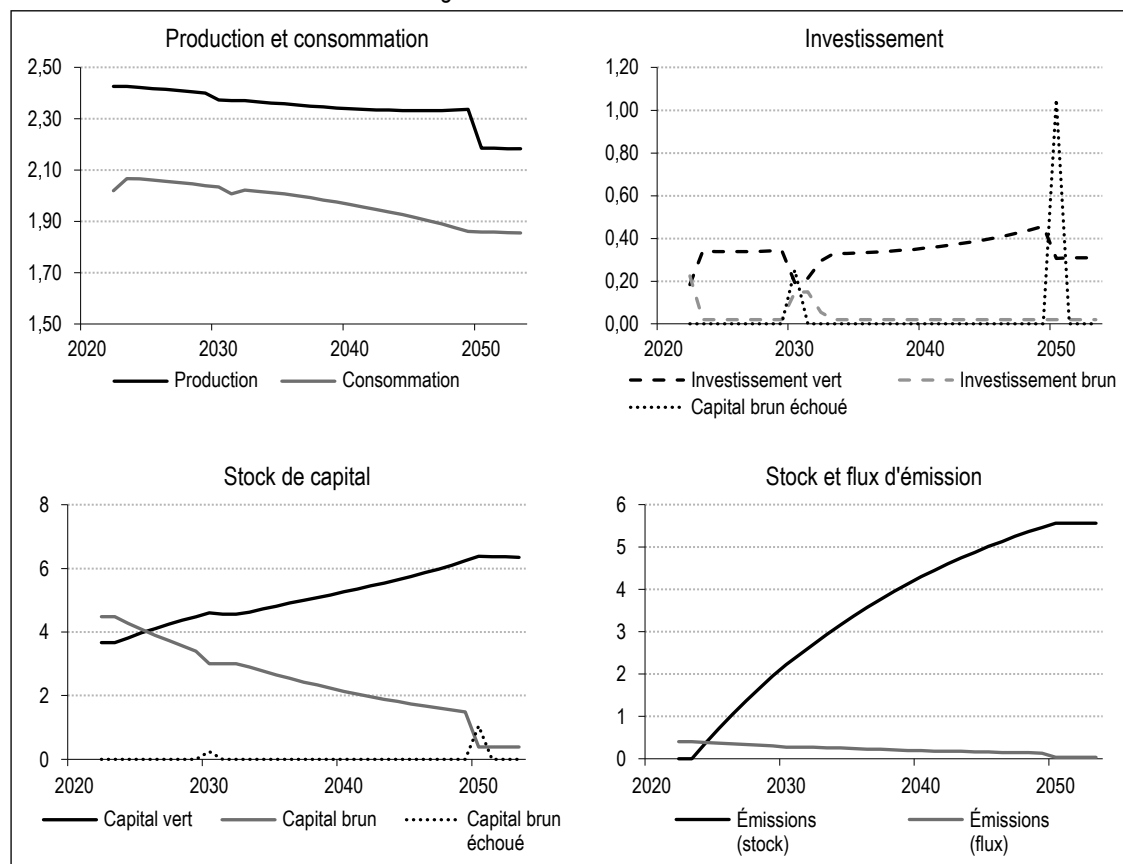
Cela révèle l'importance de l'effort qu'il reste à faire après 2030, même quand le défi *Fit for 55* a été précédemment relevé avec succès. En miroir de la chute brutale du stock de capital brun, les émissions chutent et restent faibles tout au long de la décennie 2040.

2.2.4. Budget carbone à 1,6 °C + ZEN à partir de 2050

La simulation présente la trajectoire optimale de décarbonation permettant de respecter le budget carbone national à 1,6 °C (soit 3,93 GtCO₂eq) tout en atteignant l'objectif ZEN en 2050. Ici, il y a donc deux contraintes : une sur les flux d'émissions (ZEN à partir de 2050), l'autre sur le stock (le cumul d'émissions devant rester inférieur au budget).

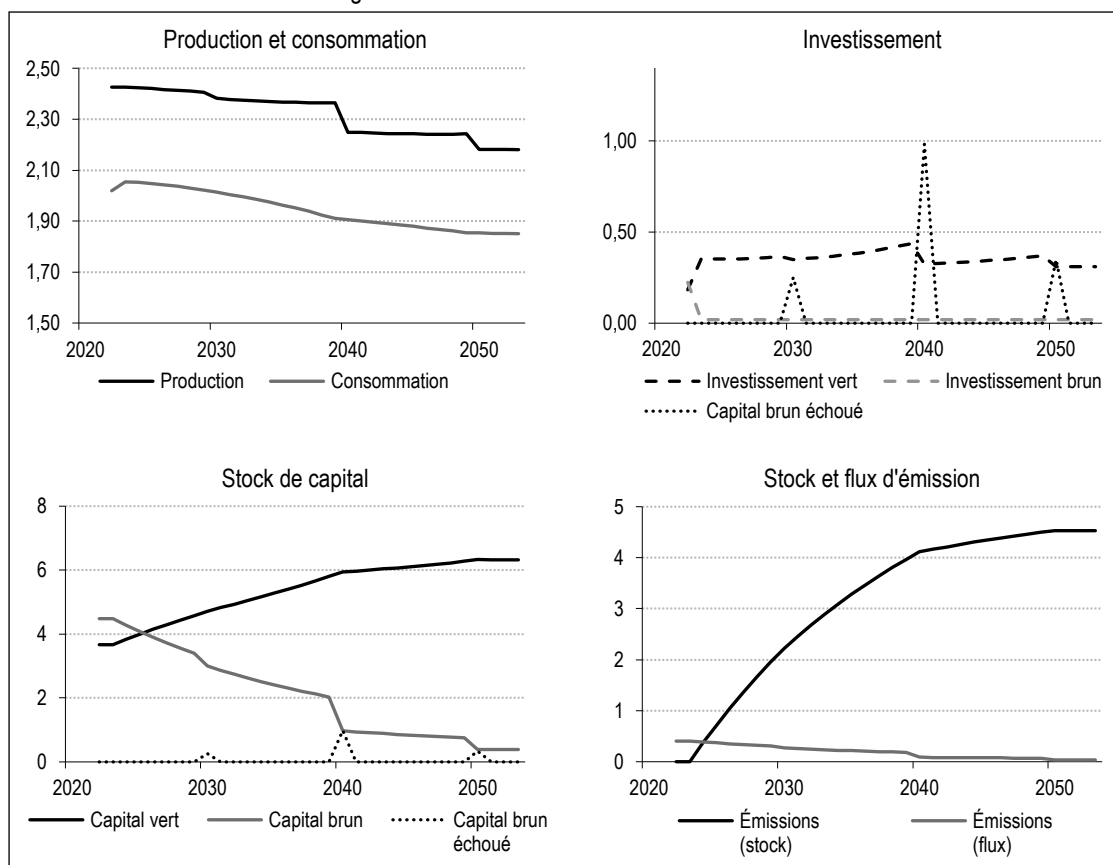
12. Dans des simulations non présentées ici, nous avons appliqué la contrainte *Fit for 55* seulement en 2030 et pas les années suivantes, ce qui correspondrait à une interprétation à la lettre de cet engagement : en 2030, l'investissement vert s'annule et l'investissement brun augmente nettement ; dès 2032 l'investissement brun retombe au niveau qui stabilise le capital brun résiduel. Le capital brun augmente en 2031, alors qu'il stagne quand la contrainte *Fit for 55* s'applique aux années ultérieures également. Bien que le surcroît de capital brun après 2030 soit modéré par rapport à ce qui est reporté figure II, il s'accompagne d'émissions supplémentaires qui cumulées jusqu'en 2050 représentent 0,15 GtCO₂eq.

Figure II – Scénario *Fit for 55*



Note : cf. figure I.

Figure III – *Fit for 55* et cible de -90 % en 2040



Note : cf. figure I.

La révélation de la contrainte en 2023 déclenche une transition immédiate. Dès cette date, l'investissement vert décolle tandis que l'investissement brun (hors renouvellement du brun résiduel) disparaît, définitivement (figure IV).

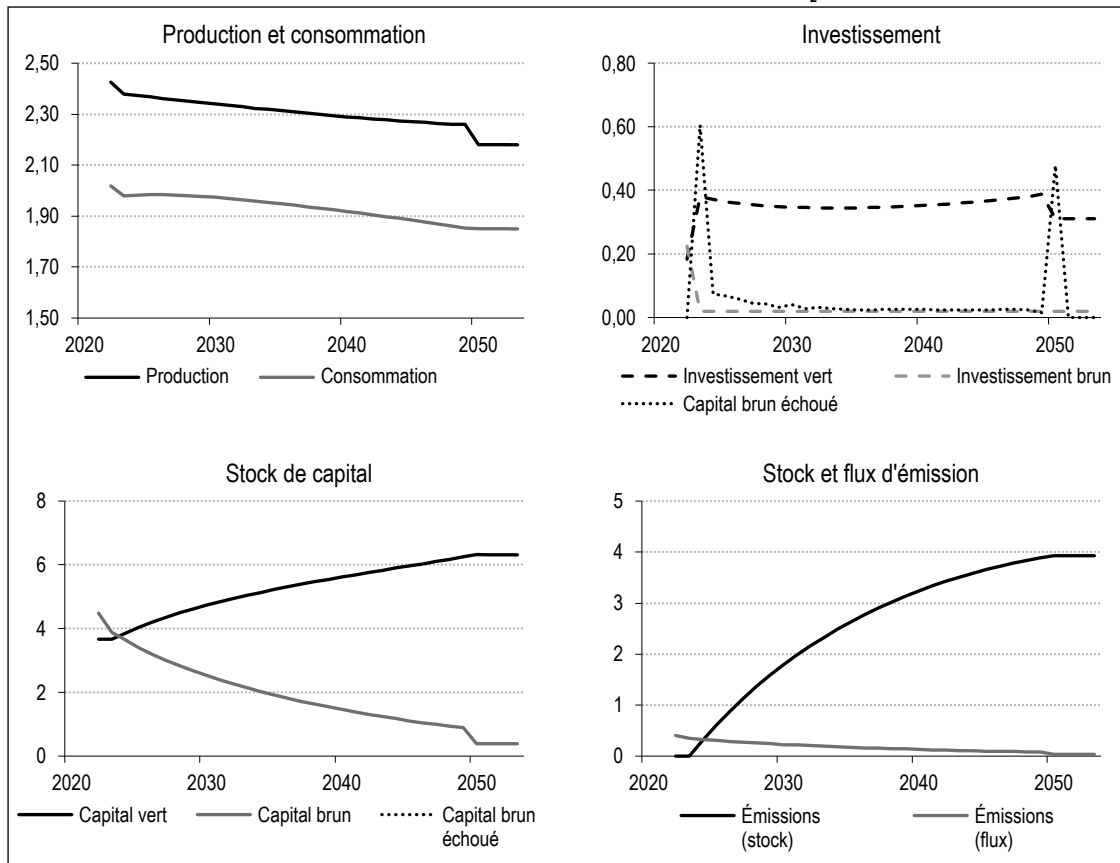
En outre, cette disparition de l'investissement brun ne suffit pas pour réduire suffisamment les émissions de GES. Un échouage du capital a lieu régulièrement, mais principalement à deux moments : une fois, massivement, la première année (14 % du capital brun initial), et une seconde fois en 2050 (11 % du capital brun de départ), pour atteindre la neutralité.

Les résultats obtenus pour ce scénario sont sensibles à la cible de budget carbone E_{max} retenue (figure V). Plus le budget carbone est faible, plus l'échouage et l'investissement vert sont élevés. Tant que ce budget carbone est inférieur à 5,5 GtCO₂éq, l'investissement brun (hors résiduel) est constamment nul. Avec des budgets carbone un peu supérieurs, l'investissement brun (hors résiduel) devient positif les premières années, mais reste modéré. Quand le budget carbone dépasse le cumul d'émissions du scénario ZEN (6,3 GtCO₂éq), ce budget

n'est plus contraignant, seule la contrainte ZEN s'applique, et les trajectoires sont donc celles du scénario ZEN.

2.2.5. Enseignements des différentes politiques d'atténuation climatique

Un échouage anticipé ne peut pas se produire avec des cibles ponctuelles d'émissions (ZEN, *Fit for 55*, -90 % en 2040). L'investissement brun peut diminuer ou s'arrêter avant que la contrainte sur les émissions ne devienne effective, mais il n'est jamais optimal d'échouer avant la contrainte. Intuitivement, si l'on suppose qu'il y a un échouage anticipé dans la trajectoire optimale associée à une cible d'émissions ponctuelle, alors si on conserve les mêmes trajectoires d'investissements vert et brun, qu'on n'échoue rien de manière anticipée et juste ce qu'il faut l'année de la cible pour la respecter, cette nouvelle trajectoire respecte la contrainte d'émissions et offre une consommation actualisée strictement supérieure. En effet la consommation y est strictement supérieure entre la date d'échouage anticipé et la date de la contrainte, puisque le capital brun et donc la production y sont strictement supérieurs, avec

Figure IV – Scénario de budget carbone (3,93 GtCO₂éq)

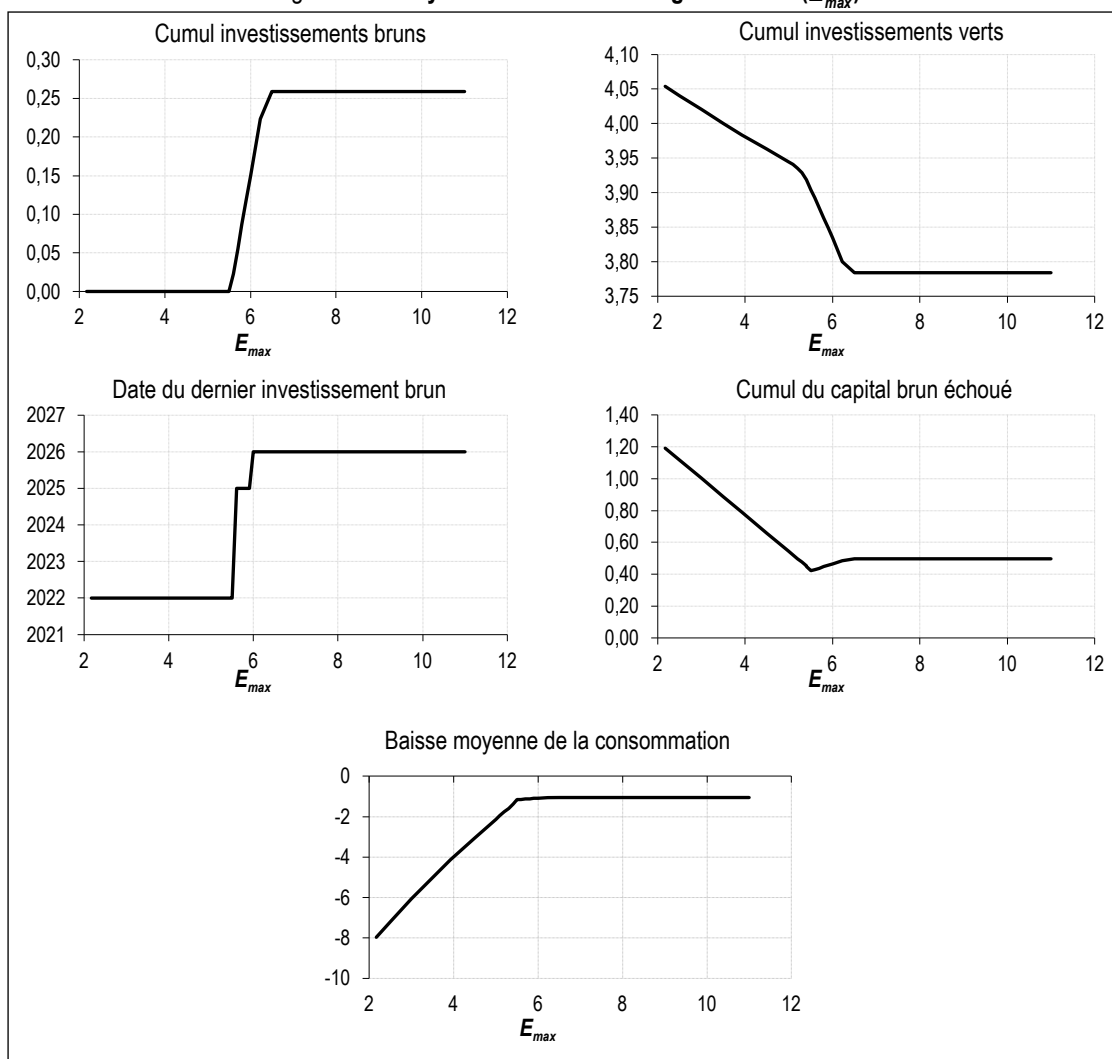
Note : cf. figure I.

des investissements identiques. De fait, dans le scénario ZEN, on n'observe d'échouage qu'en 2050 ; dans le scénario *Fit for 55* et ZEN, l'échouage a lieu uniquement en 2030 et en 2050 ; et quand y on ajoute la contrainte en 2040, le capital brun est échoué en 2030, 2040 et 2050. A contrario le respect d'une contrainte sur le cumul des émissions s'accompagne d'un échouage chaque année, particulièrement massif la première année. L'intuition économique sous-tendant ce résultat est importante en termes de politique économique : avec des cibles ponctuelles, il n'y a pas de force économique poussant à un échouage anticipé, ce qui ne permet pas d'étaler suffisamment les efforts dans le temps et conduit à des échouages très importants une année donnée, difficiles à mettre en place en pratique car la génération concernée pourra chercher à reporter dans le futur une partie de la baisse de production, et donc le respect de la contrainte climatique d'autant.

Le scénario ZEN est compatible avec un réchauffement à 1,8 °C, le scénario *Fit for 55* à 1,75 °C, et celui *Fit for 55 + 90* à 1,65 °C (voir Annexe en ligne S3). Le budget carbone respecte par construction le cumul d'émissions

cohérent avec un réchauffement donné. Ces résultats reposent sur au moins deux hypothèses importantes, en plus de la modélisation et du calibrage : *i)* dans les autres pays, les émissions cumulées restent également inférieures au budget correspondant à ce réchauffement. De fait, l'action en France ne renseigne que sur la part de la France aux efforts mondiaux de limitation du réchauffement. Les équivalences entre émissions cumulées de GES en France et réchauffement mondial sont illustratives avant tout, *ii)* les décisions sont optimales dans le cadre du modèle : en effet une infinité d'autres trajectoires peuvent satisfaire les contraintes ; par exemple celle du scénario sans contrainte carbone jusqu'en 2049, puis un échouage massif permettant de réduire le capital brun au niveau du capital résiduel, vérifie la contrainte ZEN ; les émissions cumulées sont alors largement supérieures aux 6,3 GtCO₂éq de la trajectoire optimale vérifiant la contrainte ZEN. Mais cette trajectoire n'est pas optimale, car le consommateur préfère lisser la chute brutale de consommation qui a alors lieu en 2050, en consommant moins avant cette date pour augmenter le stock de capital vert.

Figure V – Analyse de sensibilité : Budget carbone (E_{max})

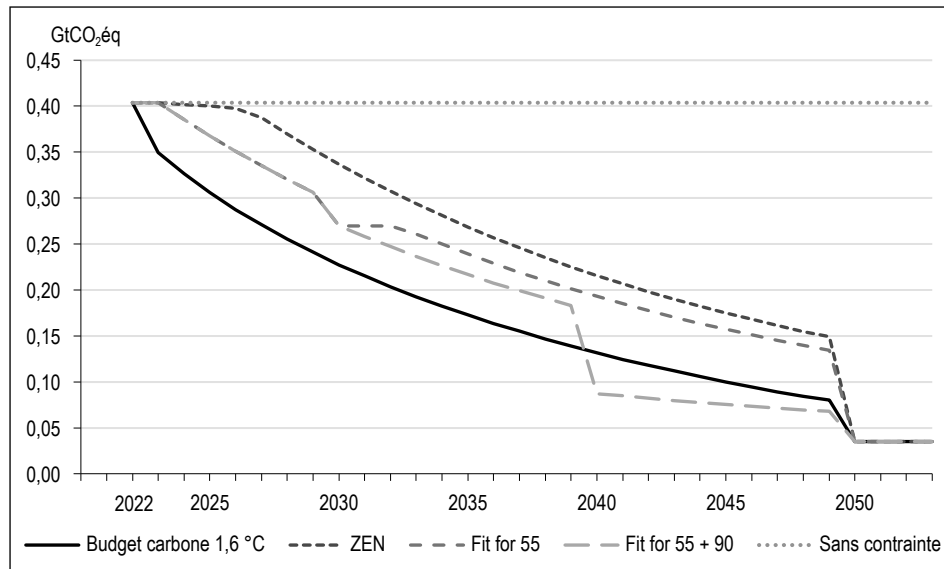
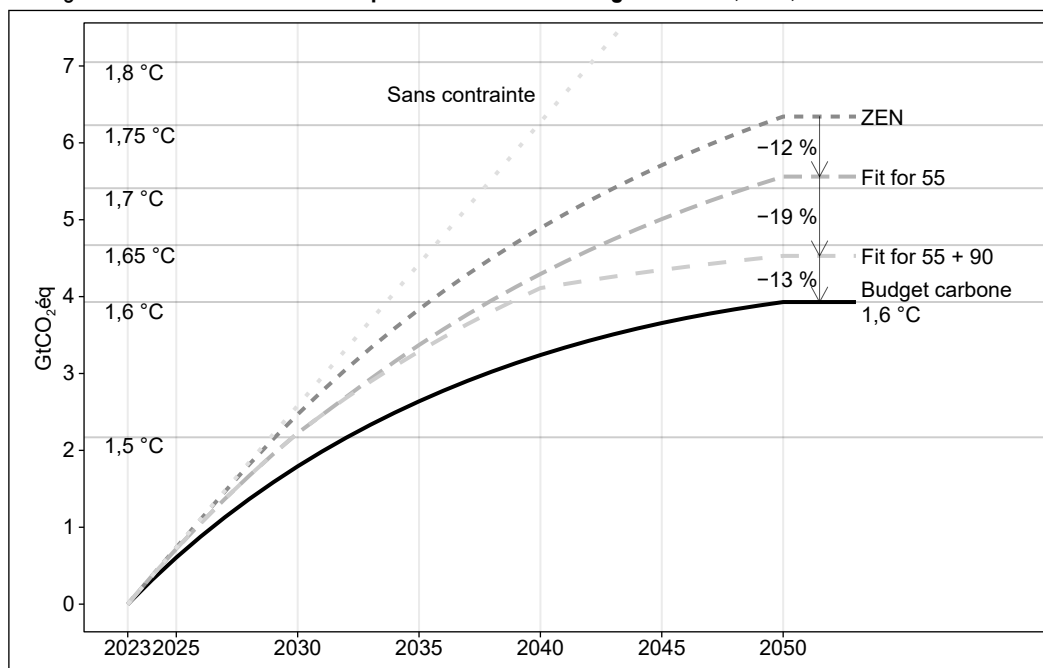


Note : la baisse moyenne de la consommation représente la moyenne sur la période 2023-2050 de l'écart, en %, de la consommation avec sa valeur initiale. Les cumuls d'investissements brun ou vert et d'échouage sont en milliers de Md€.

Quand elle est pérenne, la **décarbonation de l'économie produit un effet sur le climat d'autant plus important que l'horizon est éloigné**, puisque le cumul d'émissions évitées est alors d'autant plus élevé. Ainsi le budget carbone correspondant à un réchauffement de 1,6 °C (3,93 GtCO₂éq) est épuisé en 2036 avec l'objectif ZEN, en 2038 avec l'objectif *Fit for 55* et en 2039 avec l'objectif supplémentaire de -90 % en 2040 – sans effort, il est épuisé en 2033. Si les dates de dépassement de ce budget carbone sont proches pour ces différents scénarios, les contraintes plus fortes ont malgré tout placé l'économie sur une trajectoire d'émissions de GES bien plus faibles, ce qui se matérialise par un réchauffement moins élevé en 2050. Les émissions cumulées entre 2023 et 2050 sont inférieures de 39 % dans le scénario ZEN que sans aucune contrainte, et l'écart ne peut que grandir ensuite, puisque la

trajectoire ZEN à partir de 2050 n'émet plus de GES, contrairement à la situation initiale. Les émissions cumulées baissent de 12 % supplémentaires avec l'objectif *Fit for 55*, à nouveau de 19 % supplémentaires avec l'objectif en 2040. Enfin, le respect d'un budget carbone réduit ce cumul d'émissions de 13 % par rapport au scénario *Fit for 55 + 90 + ZEN* (les écarts d'émissions cumulées entre deux scénarios se mesurent à l'aire entre les courbes des flux d'émissions, figure VI, ou directement avec l'écart des courbes de cumul d'émissions, figure VII).

D'un point de vue économique, **ces différentes politiques climatiques ont une incidence différenciée sur le bien-être** (tableau 3). Les scénarios ZEN, *Fit for 55* et -90 % en 2040 entraînent une moindre perte d'utilité et de consommations cumulées actualisées que dans

Figure VI – Flux d'émissions pour les scénarios budget carbone, ZEN, *Fit for 55* et *Fit for 90*Figure VII – Cumul d'émissions pour les scénarios budget carbone, ZEN, *Fit for 55* et *Fit for 90*

le scénario de respect d'un budget carbone à 1,6 °C. C'est une vision partielle de la situation, puisque les effets des dommages liés au réchauffement ne sont pas modélisés : l'analyse porte sur les seuls effets des politiques de transition. L'effet total sur l'utilité du scénario budget carbone à 1,6 °C, la manière la plus efficace de limiter le réchauffement à ce niveau, est d'ailleurs probablement positif dans l'esprit des signataires l'accord de Paris en 2015, qui visait à limiter le réchauffement sous 2 °C, et si possible sous 1,5 °C.

Au premier ordre, plus le niveau d'ambition climatique est élevé, plus le dommage économique à subir est important (et plus les gains liés à de moindres dommages sont élevés). Ainsi le respect d'un budget carbone à 1,6 °C entraîne un échouage de capital brun, beaucoup plus précoce et massif qu'avec les cibles ponctuelles ou le respect d'un budget carbone moins contraignant, ce qui réduit production et consommation.

Mais au deuxième ordre, à ambition climatique donnée, différentes politiques dégradent plus ou moins le bien-être. Vu autrement, à perte

Tableau 3 – Émissions et grandeurs économiques selon les différentes contraintes d'émissions de carbone

	Sans contrainte carbone	Budget carbone 1,6 °C et ZEN	Budget carbone 1,75 °C et ZEN	ZEN	Fit for 55	Fit for 55 + 90
Cumul des émissions en 2050 (GtCO ₂ eq)	10,33	3,93	6,23	6,34	5,56	4,53
Écart utilité intertemporelle p/r scénario sans contrainte (%)	-	-6,94	-4,54	-4,53	-4,95	-6,09
Capital brun	4 482	1 254	1 722	1 745	1 582	1 408
Capital vert	3 667	5 679	5 493	5 477	5 575	5 712
Investissement brun	224	19	32	34	25	19
Investissement vert	183	334	320	319	326	337
Investissement total	407	354	353	353	352	356
Échouage brun	0	36	15	15	18	25
Consommation						
Niveau	2 018	1 893	1 925	1 925	1 920	1 904
Écart p/r scénario sans contrainte	-	-126	-93	-93	-99	-114
Écart p/r scénario sans contrainte en %	-	-6,22	-4,60	-4,60	-4,89	-5,64
PIB						
Niveau	2 406	2 227	2 258	2 259	2 252	2 241
Écart p/r scénario sans contrainte	-	-179	-148	-147	-154	-165
Écart p/r scénario sans contrainte, en %	-	-7,45	-6,14	-6,11	-6,41	-6,86

Note : les grandeurs représentées (hors %, et hors première ligne) correspondent à des moyennes annuelles actualisées. L'écart d'utilité correspond à l'écart (en %) d'utilité intertemporelle actualisée par rapport au scénario sans contrainte carbone. Les valeurs sont en milliards d'euros, sauf indication contraire.

de bien-être donnée, la trajectoire des investissements et de l'échouage peut être optimisée de manière à réduire les émissions du système productif, et donc les dommages climatiques. Ainsi le scénario ZEN et le respect d'un budget carbone à 1,75 °C génèrent le même niveau de bien-être et de consommations cumulées sur toute la période, mais les émissions cumulées jusqu'en 2050 sont légèrement plus élevées dans le scénario ZEN que dans le scénario budget carbone (6,3 vs 6,2 GtCO₂eq). Par construction, le scénario budget carbone maximise le bien-être sous contrainte de respecter ce budget carbone, ce qui assure qu'à cumul de GES donné, ce scénario offre une perte d'utilité moindre qu'avec des contraintes ponctuelles sur les émissions. En particulier, un échouage anticipé peut avoir lieu dans un scénario budget carbone, ce qui n'est pas le cas face à ces contraintes ponctuelles.

Les scénarios de cibles ponctuelles retardent la transition par rapport à celui de budget, ce qui se traduit par un cumul plus important d'investissements bruns, qui sont à la fois plus forts et plus durables. Pour ce qui est de l'échouage, comme il y a davantage de capital brun accumulé, il y a aussi plus d'actifs à mettre au rebut en fin de

période, car ce n'est pas seulement le capital initial qui est concerné par l'échouage, dans ces scénarios, mais également celui qui a été accumulé tout au long de la trajectoire.

Dans tous les scénarios de transition, l'investissement total est en moyenne inférieur à ce qu'on observe initialement. En effet, la fonction de production étant concave en fonction du capital, le stock de capital étant déterminé par sa productivité marginale nécessairement égale à $\rho + \delta$ (section 1.4), le stock de capital vert et brun résiduel à l'état final post-transition est inférieur au stock de capital brun et vert initial. Par rapport à l'état initial, l'investissement total est donc forcément plus faible à l'équilibre final, et il ressort aussi plus faible en moyenne durant la transition dans tous les scénarios étudiés. L'investissement total peut ponctuellement être plus élevé qu'à l'état initial (ce qui est par exemple le cas dans les scénarios ZEN et *Fit for 55* à l'approche de 2050).

2.3. Cibles d'émissions tous les 10, 5 ou 2 ans + ZEN à partir de 2050

Plutôt que respecter un budget carbone, les différents pays du monde ont opté en pratique pour des cibles d'émissions, avec en particulier

une date pour leur neutralité carbone, et parfois des objectifs intermédiaires comme *Fit for 55*. Mais comme l'ont montré nos simulations (section 2.2), des cibles trop éloignées dans le temps entraînent une transition trop tardive et des à-coups dans les efforts, avec un relâchement sitôt une étape franchie, ce qui n'est pas optimal. Une solution naturelle est alors d'introduire une autre cible intermédiaire, dans le cas européen entre 2030 et 2050 : avant même d'être contraignante et de réduire fortement les émissions en 2040, la cible en 2040 permet d'abaisser la trajectoire des émissions durant la décennie 2030 en empêchant l'investissement brun de repartir début 2030 (figure VIII).

Introduire des cibles intermédiaires d'émissions peut ainsi permettre de rapprocher les trajectoires des trajectoires optimales respectant un objectif climatique donné. De fait, avec des plafonds d'émissions correspondant chaque année entre 2023 et 2049 aux émissions du scénario budget carbone à 1,6 °C, la solution

obtenue coïncide avec la trajectoire optimale de ce budget carbone (tableau 4). Pour déterminer à quel point il est important de rapprocher les cibles ponctuelles, nous construisons plusieurs scénarios qui respectent des cibles ponctuelles d'émissions, espacées régulièrement de 10, 5 ou 2 ans, et choisies à partir de la chronique d'émissions du scénario optimal de respect d'un budget carbone donné.

Des cibles intermédiaires fréquentes apparaissent importantes pour des objectifs ambitieux, mais pas pour des objectifs peu ambitieux. Dans les scénarios respectant un budget carbone élevé, supérieur à 5,5 GtCO₂eq, il n'y a pas d'échouage anticipé (sur 2023-2049) ; les solutions des scénarios avec des jalons tous les 10, 5 et 2 ans, choisis en accord avec la chronique d'émissions du scénario budget carbone correspondant, coïncident avec celle du scénario budget carbone (figure IX avec un budget carbone associé à 1,75 °C, de 6,23 GtCO₂eq). Ainsi, le problème fondamental de l'instrument

Figure VIII – Cibles régulières d'émissions, budget carbone 1,6 °C

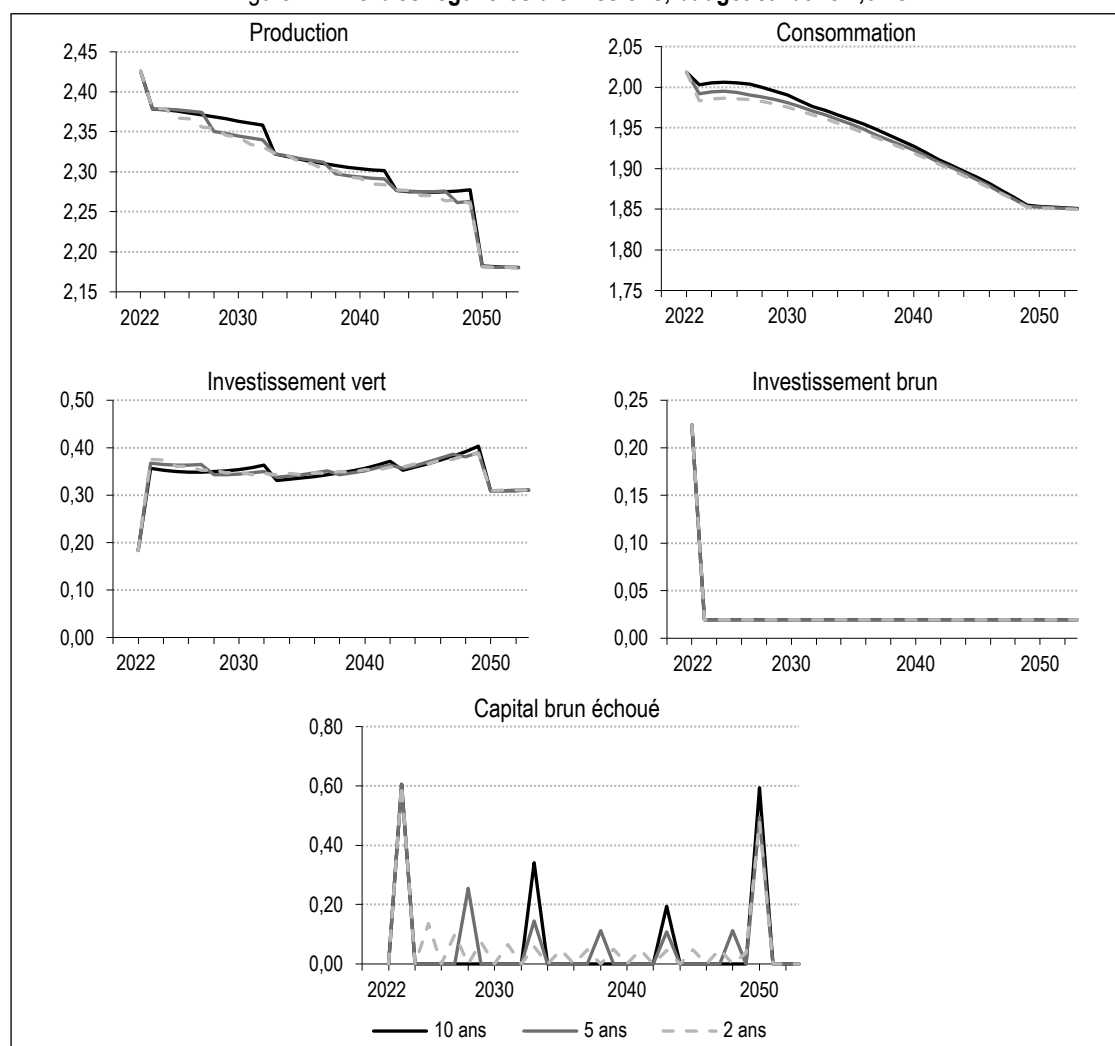


Tableau 4 – Des cibles ponctuelles d'émissions plus rapprochées rapprochent l'économie de la trajectoire optimale respectant le budget carbone à 1,6 °C

	Cibles			
	Annuelles	Tous les 2 ans	Tous les 5 ans	Tous les 10 ans
Cumul des émissions en 2050 (GtCO ₂ éq)	3,93	3,97	4,08	4,25
Écart utilité intertemporelle p/r scénario sans contrainte (%)	-6,94	-6,88	-6,70	-6,44
Capital brun	1 254	1 263	1 286	1 321
Capital vert	5 679	5 678	5 673	5 663
Investissement brun	19	19	19	19
Investissement vert	334	334	334	333
Investissement total	354	354	353	352
Échouage brun	36	36	34	32
Consommation				
Niveau	1 893	1 894	1 896	1 899
Écart p/r scénario sans contrainte	-126	-125	-122	-119
Écart p/r scénario sans contrainte en %	-6,22	-6,18	-6,07	-5,89
PIB				
Niveau	2 227	2 228	2 230	2 232
Écart p/r scénario sans contrainte	-179	-179	-177	-174
Écart p/r scénario sans contrainte en %	-7,45	-7,42	-7,34	-7,22

Note : les cibles d'émissions sont fixées égales aux émissions de la trajectoire optimale respectant un budget carbone de 3,93 GtCO₂éq, cohérent avec un réchauffement limité à 1,6 °C. Des cibles annuelles entraînent la même solution que le respect du budget carbone (colonne Budget carbone 1,6 °C et ZEN du tableau 3). Les grandeurs représentées (hors %) correspondent à des moyennes annuelles actualisées. L'écart d'utilité correspond à l'écart (en %) d'utilité intertemporelle actualisée par rapport au scénario sans contrainte carbone. Les valeurs sont en milliards d'euros, sauf indication contraire.

cible ponctuelle, qui est de ne pas pouvoir déclencher d'échouage avant que la contrainte ne devienne effective, n'est plus problématique quand le budget carbone est élevé et qu'il n'y a pas d'échouage anticipé dans la trajectoire du scénario budget carbone. En revanche, dans les scénarios avec un budget carbone inférieur, il y a un échouage anticipé de capital¹³. Les solutions correspondant aux jalons intermédiaires à 10, 5 ou 2 ans s'écartent alors de la trajectoire optimale du budget carbone, d'autant plus que *i*) le budget carbone est faible, et donc l'échouage anticipé élevé, et *ii*) ces jalons sont espacés les uns des autres. Ainsi, en partant d'un budget carbone de 1,6 °C, les émissions cumulées sur 2023-2050 atteignent avec des cibles décennales 4,25 GtCO₂éq, près de 10 % supérieures aux 3,93 GtCO₂éq du budget carbone associé. Ce cumul d'émissions atteint 4,08 GtCO₂éq avec des cibles tous les 5 ans et dépasse à peine le budget carbone avec des cibles tous les 2 ans. Ces écarts de chemins ne proviennent pas des investissements bruns et verts, qui sont très proches dans les différentes simulations, mais de l'échouage de capital brun, qui n'intervient qu'au moment où le plafond d'émissions est contraignant : l'échouage est plus faible avec des cibles espacées, ce qui se traduit en moyenne sur la période par un capital productif plus élevé,

et donc une production, une consommation et une utilité plus élevées.

En définitive, il ressort que pour atteindre un objectif de réchauffement maximal donné, introduire explicitement cette contrainte, sous la forme d'un budget carbone restant, permet de minimiser le coût économique associé. Une trajectoire proche d'une telle trajectoire optimale associée au respect d'un budget carbone peut être obtenue avec des plafonds d'émissions régulièrement espacés dans le temps, qui s'appliquent dès la première année, et choisis à partir de la chronique d'émissions de cette trajectoire optimale. Quand l'objectif climatique est ambitieux, rapprocher dans le temps ces jalons intermédiaires réduit la dérive qui peut se produire entre ces jalons.

2.4. Une transition retardée dégrade le bien-être

Nous avons vu que le scénario budget carbone + ZEN correspondait à la politique optimale pour assurer le respect du budget carbone et l'atteinte de l'objectif ZEN. Se pose néanmoins la question de la date de sa mise en place. En effet, d'après NGFS (2022), une

13. Cet échouage anticipé commence en 2034 et reste présent jusqu'en 2050 avec un budget de 5,4 GtCO₂éq.

transition retardée est plus coûteuse. Il serait possible d'étudier, comme NGFS (2022), les conséquences du respect d'un budget carbone à une date future, après une certaine période d'inaction. Cela se traduirait peu ou prou par le décalage dans le temps d'un scénario budget carbone respectant un cumul d'émissions amputé des GES émis pendant cette période d'inaction (figure V). Plutôt que de supposer un effort nul jusqu'à la décision de respecter un budget carbone, nous supposons que l'économie suit la trajectoire ZEN à partir de 2023 puis, à une date donnée et jusqu'en 2050, bascule sur un sentier compatible avec le respect d'un budget carbone à 1,6 °C – ce qu'il en reste. Trois dates de bascule sont retenues : 2023, 2028, et 2033¹⁴. Puisque le cumul d'émissions et donc les dommages sont les mêmes dans ces différents scénarios, les bien-être sont directement comparables.

Il en ressort qu'à cumul d'émissions donné, plus la transition est tardive, plus elle est coûteuse, et moins elle est crédible. En effet,

plus le démarrage de la trajectoire respectant un budget carbone donné pour 2023-2050 est tardif, plus une part importante de ce budget est déjà consommée au moment de cette bascule, et plus le stock de capital brun doit être réduit fortement pour émettre très peu de GES sur la durée restante avant 2050 (figure X). L'année de changement de politique, l'échouage est deux fois supérieur avec un changement en 2028 plutôt qu'en 2023, et trois fois supérieur avec un changement en 2033 (à un niveau qui frôle 2 000 milliards d'euros). Dans le cas d'un changement en 2033, le budget carbone est déjà quasiment épuisé (avec le scénario ZEN, il est épuisé en 2036), les émissions chutent d'environ 60 % entre 2032 et 2033 (figure XI). En miroir, avec une transition plus tardive, la consommation et le bien-être sont plus pénalisés : ils

14. Comme le scénario ZEN épuise le budget carbone correspondant à 1,6 °C en 2036, il n'est pas possible d'étudier une bascule ultérieure, à moins d'introduire des émissions nettes négatives, ce qui sort du cadre de notre modèle.

Figure IX – Cibles régulières d'émissions, budget carbone 1,75 °C

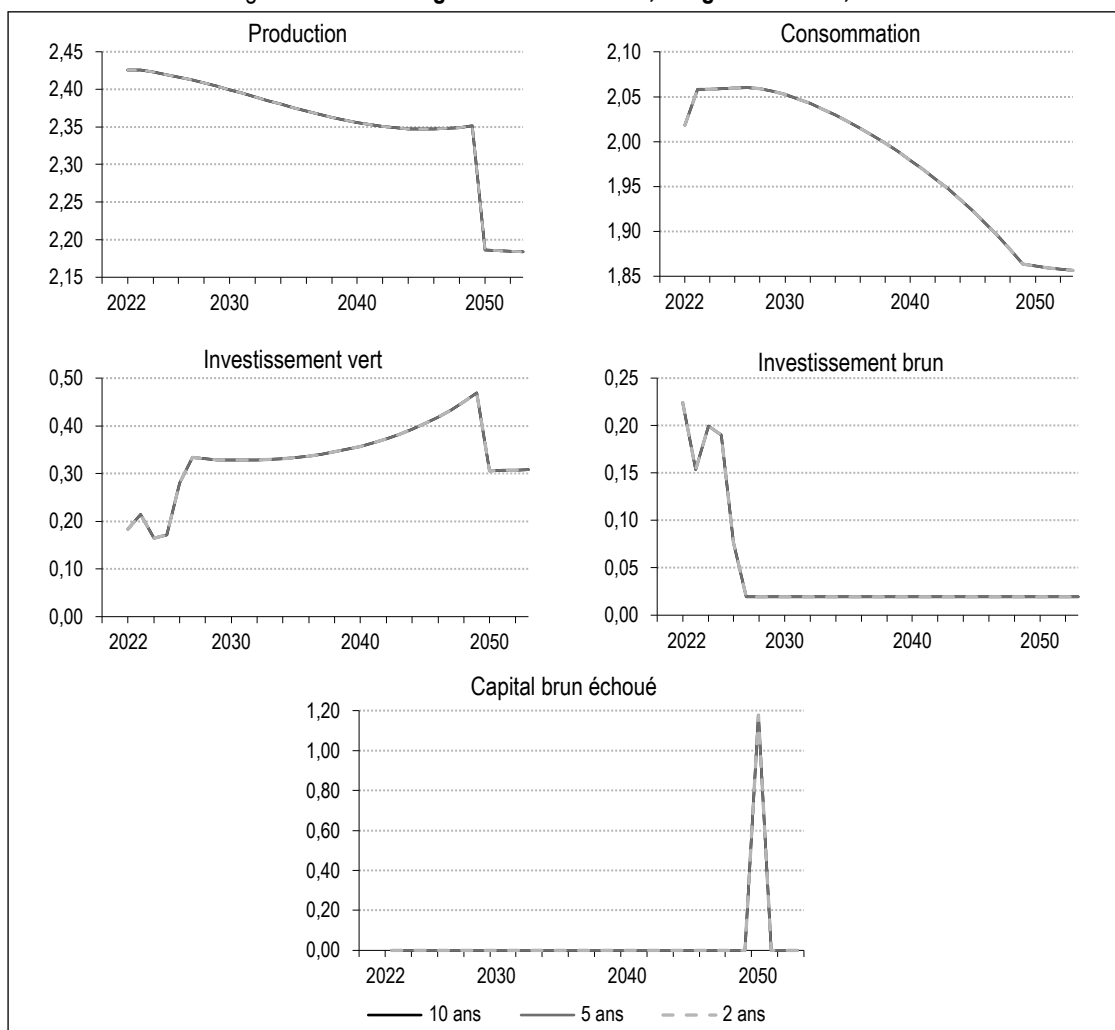


Figure X – Budget carbone 1,6 °C avec différentes dates de démarrage de la transition

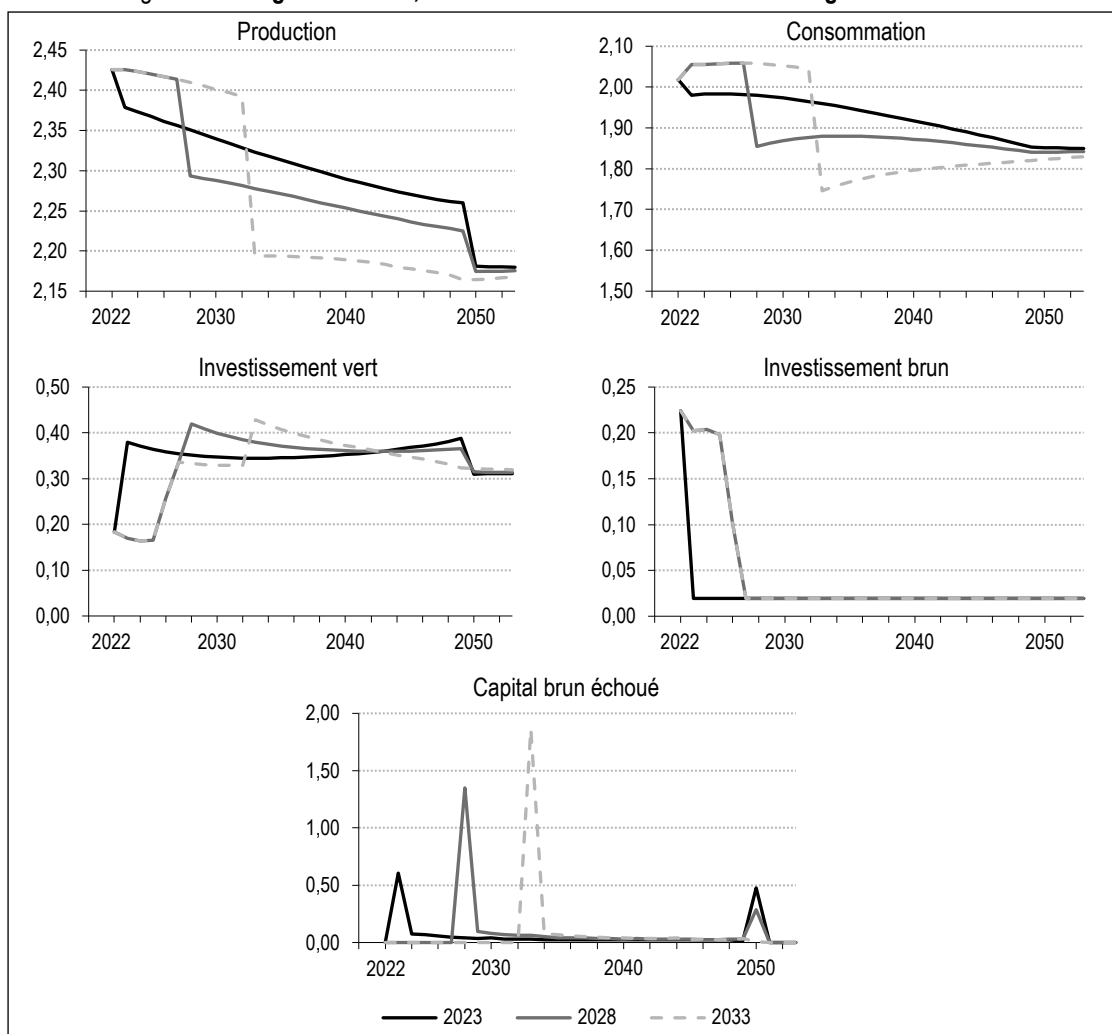
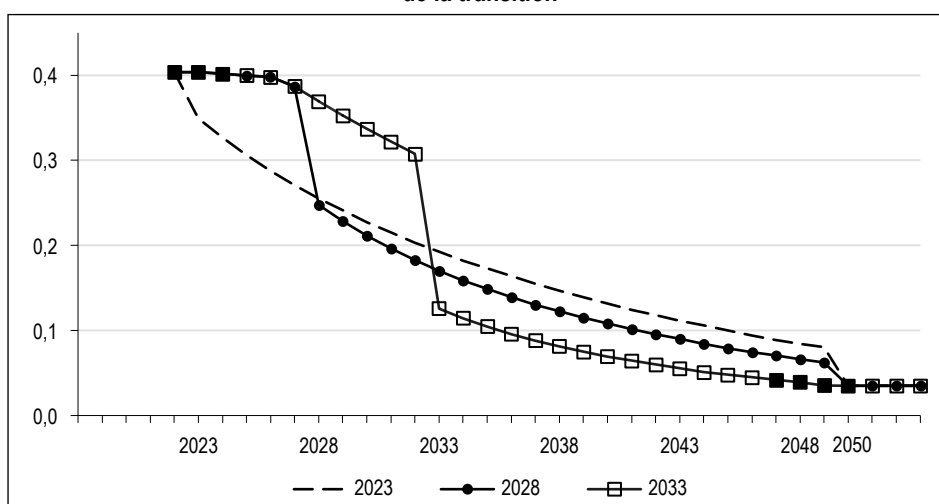


Figure XI – Flux d'émission pour le budget carbone 1,6 °C avec différentes dates de démarrage de la transition



baissent respectivement de 0,9 et 1,6 point de plus avec une bascule en 2033 plutôt qu'en 2023, par rapport à un scénario sans contrainte carbone (tableau 5). En outre, retarder la transition ne la

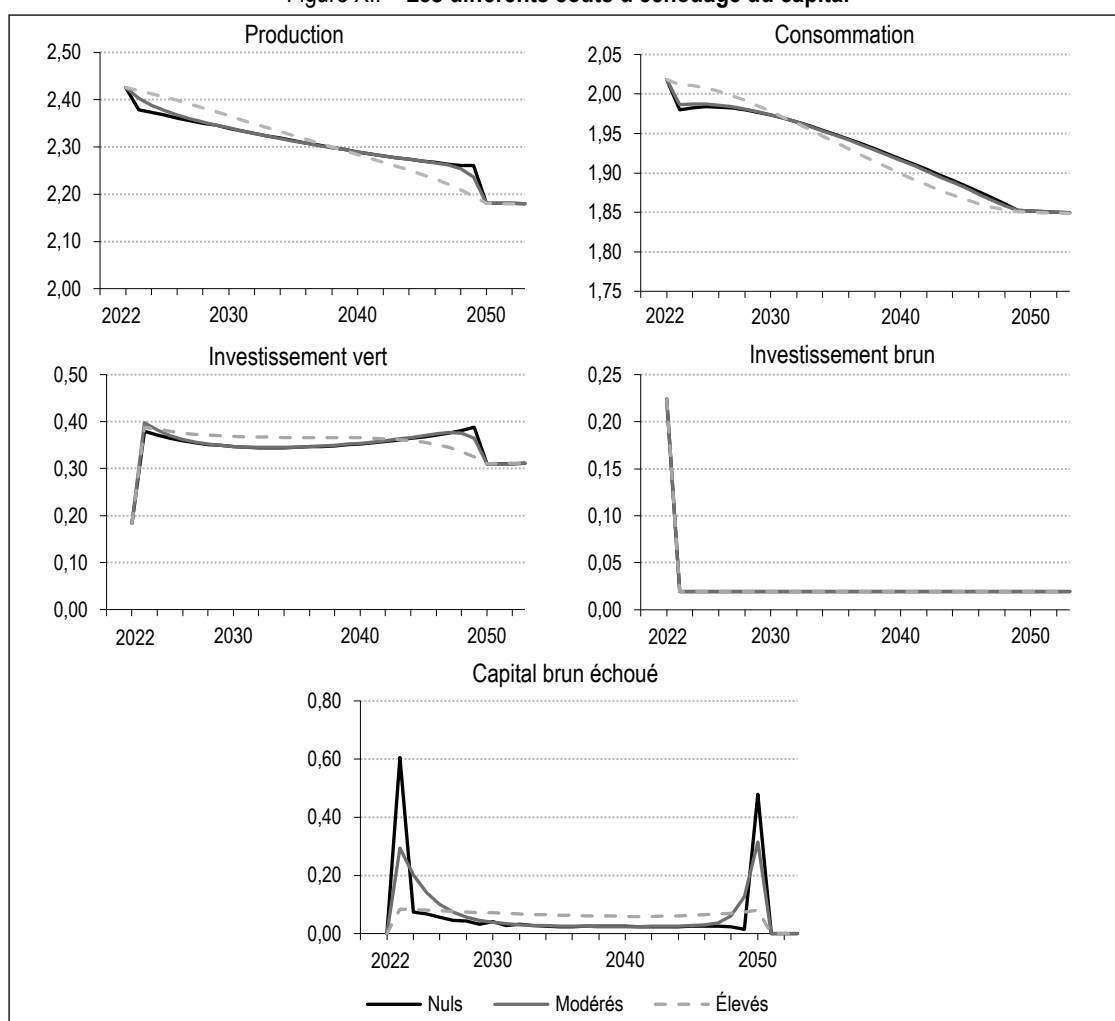
rend en aucun cas plus crédible : au contraire, tout retard implique une chute d'autant plus brutale de la consommation lorsque la politique d'émissions est finalement ajustée à l'objectif.

Tableau 5 – Une transition retardée entraîne plus d'échouage et pénalise le bien-être

	Budget carbone		
	2023	2028	2033
Cumul des émissions en 2050 (GtCO ₂ éq)	3,93	3,93	3,93
Écart utilité intertemporelle p/r scénario sans contrainte (%)	-6,94	-8,18	-8,53
Capital brun	1 254	1 286	1 317
Capital vert	5 679	5 556	5 501
Investissement brun	19	34	34
Investissement vert	334	325	321
Investissement total	354	359	355
Échouage brun	36	49	46
Consommation			
Niveau	1 893	1 877	1 874
Écart p/r scénario sans contrainte	-126	-141	-144
Écart p/r scénario sans contrainte, en %	-6,22	-7,00	-7,15
PIB			
Niveau	2 227	2 217	2 210
Écart p/r scénario sans contrainte	-179	-189	-197
Écart p/r scénario sans contrainte, en %	-7,45	-7,87	-8,17

Note : voir tableau 3.

Figure XII – Les différents coûts d'échouage du capital



Note : en 2023, les coûts d'échouage représentent 0,1 % de l'utilité initiale quand ils sont modérés, et 1,0 % quand ils sont élevés.

2.5. Coûts d'ajustement et lissage temporel de l'échouage

Les trajectoires optimales respectant les différentes contraintes climatiques font souvent apparaître des échouages très importants une année donnée : l'année d'entrée en vigueur d'une contrainte ponctuelle sur les émissions (comme ZEN ou *Fit for 55*) ou l'année de mise en place d'une politique respectant un budget carbone donné. De tels échouages, qui peuvent s'élever à 600 milliards d'euros la première année pour le respect du budget carbone à 1,6 °C, voire le double si cette politique n'est mise en place que 5 ans plus tard, semblent peu réalistes (figure X). Il est probable que pour réduire les conflits inter-générationnels qui en découlent, l'effort soit lissé dans le temps. Nous introduisons donc un coût à échouer du capital dans la fonction d'utilité, croissant et convexe (en pratique quadratique) en la quantité de capital échoué : échouer une unité supplémentaire de capital brun est donc plus coûteux que l'unité précédente.

L'introduction de ces coûts provoque un lissage de l'échouage, plus ou moins étalé dans le temps selon l'importance de ces coûts. Dans le cas d'un scénario avec contrainte de budget carbone à 1,6 °C, pour des coûts d'échouage modérés, l'échouage est réduit de moitié en 2023 et d'un tiers en 2050 et il est étalé sur les années juste après 2023 et avant 2050 (figure XII). Pour des coûts d'échouage élevés, l'échouage est divisé par 6-7 en 2023 et 2050 et est largement réparti sur toute la période, avec un déclin très progressif jusqu'en 2050. À cause de la baisse limitée du capital brun en début de période, les émissions baissent plus lentement qu'avec des coûts modérés ou nuls, l'économie doit donc être plus proche de la neutralité en fin de période pour compenser le surcroît d'émissions du début de période. Ces coûts d'échouage du capital sont réalistes : en 2023, ils représentent 0,1 % de l'utilité initiale quand ils sont modérés, et 1,0 % quand ils sont élevés. Ils permettent de mettre en évidence des chroniques d'échouage du capital brun plus crédibles, par leurs montants comme par leur profil temporel.

* *
*

Nous construisons un modèle de choix optimal d'investissement en capital brun, dont l'utilisation émet des gaz à effet de serre (GES), ou vert, qui n'en émet pas, sous des contraintes climatiques qui peuvent prendre la forme de plafonds ponctuels d'émissions de GES (ZEN

ou *Fit for 55*) ou le respect d'un budget carbone. Nous décrivons les transitions optimales entre un état initial et la neutralité carbone qui respectent ces différents types de contraintes. L'analyse de bien-être est nécessairement partielle, puisque les dommages, qui sont différents suivant les scénarios, ne sont pas modélisés. Il est ceci dit possible de tirer des conclusions plus définitives en comparant des simulations aboutissant au même cumul d'émissions de GES.

Avec les trajectoires optimales, et en retenant les équivalences mentionnées entre émissions et réchauffement, le scénario ZEN est compatible avec un réchauffement à 1,8 °C, le scénario *Fit for 55* à 1,75 °C, et celui *Fit for 55 + 90* à 1,65 °C. Nous montrons par ailleurs qu'un échouage anticipé ne peut pas se produire avec des cibles ponctuelles d'émissions. Pour limiter le réchauffement à un niveau donné, introduire explicitement cette contrainte sous la forme d'un budget carbone restant minimise le coût économique associé : l'échouage est alors élevé la première année avec des budgets limités. Il est possible de s'en approcher avec des plafonds d'émissions régulièrement espacés dans le temps, qui s'appliquent dès la première année, et limitant les émissions au niveau de la chronique d'émissions de cette trajectoire optimale. Ensuite, à cumul d'émissions donné, une transition plus tardive est plus coûteuse, conduit à plus d'échouage, et est moins crédible. En outre, des coûts à l'échouage permettent de répartir l'échouage dans le temps. Enfin, l'investissement total durant la transition et à l'état final est systématiquement inférieur à celui de l'état initial.

Ce dernier résultat semble s'opposer à ce que trouvent la plupart des études sur ce sujet : en effet I4CE (2022) et Pisani-Ferry & Mahfouz (2023) décrivent des besoins supplémentaires d'investissements pour la transition, souvent massifs, de l'ordre de 2 % du PIB chaque année d'ici 2030. Deux pistes peuvent être avancées pour tenter de réconcilier ces résultats avec ceux de notre modélisation. En premier lieu, il convient d'observer que les projections de surcroît d'investissement recouvrent au moins en partie un surcoût de l'investissement (autrement dit, une hausse de son prix pour une même capacité productive, plutôt qu'une hausse de volume). Avec la transition, un même service rendu coûte plus cher avec du capital vert qu'avec du brun. En second lieu, s'il est clair que le remplacement accéléré d'équipements bruns par des équipements propres (par exemple le remplacement de chaudières au fioul ou au gaz encore fonctionnelles par des pompes à chaleur)

implique une hausse du volume d'investissement net de ces équipements par rapport à un scénario sans transition, il faut néanmoins tenir compte de la possibilité d'effets d'équilibre général pouvant réduire d'autres investissements. Ces mécanismes d'équilibre général, intégrés par construction dans notre modélisation, ne le sont pas dans les estimations établies selon une méthode *bottom-up*, y compris les effets d'offre résultant de la composante de surcoût. Or, la contrainte climatique étant fondamentalement une contrainte additionnelle à la frontière de production, il est optimal d'avoir un stock de capital total plus faible après la transition. Ainsi, nos résultats de repli de l'investissement total en volume dans le chemin de transition optimal ne sont pas nécessairement incompatibles avec les projections de surcroît d'investissement en valeur pour ceux des biens d'investissement les plus directement concernés par la transition, mais des travaux complémentaires seraient utiles pour réconcilier ces deux jeux de résultats, notamment en séparant la composante de prix de celle de volume dans les projections usuelles, et en examinant les conséquences en équilibre général de la hausse du coût de l'investissement.

Nos résultats quantitatifs peuvent être sensibles au calibrage des paramètres du modèle, offrant plusieurs enseignements (voir Annexe en ligne S4).

- Une dépréciation rapide du capital nécessite plus d'investissements pour maintenir la production (les investissements verts et bruns augmentent avec δ), réduisant le besoin d'échouage du capital brun car il se déprécie naturellement rapidement. Il est donc crucial de verdir le capital à longue durée de vie.
- La transition est facilitée par une forte élasticité de substitution entre capitaux bruns et verts.
- La diminution récente du puits de carbone complique la transition, à travers deux mécanismes : un stock de capital brun plus faible est nécessaire pour atteindre zéro émissions nettes, et le cumul des émissions nettes d'ici 2050 augmente.
- Un taux d'actualisation plus élevé valorise moins les générations futures. Dans le scénario budget carbone, cela entraîne une consommation initialement plus élevée mais une baisse en fin de période et en moyenne sur 2023-2050. Dans les scénarios ZEN et *Fit for 55*, l'investissement brun et l'échouage augmentent.

Nos résultats décrivent les trajectoires optimales, déterminées par un planificateur social omniscient, omnipotent et bienveillant. Elles peuvent être difficiles à mettre en place en pratique. L'identification de ces principaux écueils et des stratégies pour les contourner nécessite des recherches plus approfondies. □

Lien vers l'Annexe en ligne :

www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/8302689/ES544_Abbas-et-al_Annexe-en-ligne.pdf

BIBLIOGRAPHIE

- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L. & Hemous, D. (2012).** The Environment and Directed Technical Change. *American Economic Review*, 102(1), 131–166. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131>
- GIEC (2022).** Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, pp. 93–174. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.004>
- GIEC (2023).** Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 3–32. Cambridge University Press.
- I4CE (2022).** *Panorama des financements climat*. Édition 2022. https://www.i4ce.org/wp-content/uploads/2022/10/Panorama-des-financements-climat-edition-2022_au-16-12-22.pdf
- IRENA (2017).** Renewable Energy Statistics 2017. In: *The International Renewable Energy Agency*. <https://www.irena.org/publications/2017/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2017>
- Jo, A. (2022).** Substitution between Clean and Dirty Energy with Directed Technical Change. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4211251>

- Lamboll, R. D., Nicholls, Z. R. J., Smith, C. J., Kikstra, J. S., Byers, E. & Rogelj, J. (2023).** Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets. *Nature Climate Change*, 13(12), 1360–1367.
<https://doi.org/10.1038/s41558-023-01848-5>
- Mercenier, J. & Michel, P. (1994).** Discrete-Time Finite Horizon Approximation of Infinite Horizon Optimization Problems with Steady-State Invariance. *Econometrica*, 62(3), 635–656.
<http://www.jstor.org/stable/2951661>
- NGFS (2022).** *Réseau pour le verdissement du système financier*. Banque de France, Rapport annuel 2021.
<https://www.ngfs.net/en/annual-report-2021>
- Nordhaus, W. D. (2007).** A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Literature*, 45(3), 686–702. <https://doi.org/10.1257/jel.45.3.686>
- OECD (2019).** *Analyse coûts-avantages et environnement : Avancées théoriques et utilisation par les pouvoirs publics*. OECD Publishing.
https://www.oecd-ilibrary.org/sites/9789264300453-fr/index.html?itemId=/content/publication/9789264300453-fr&_csp_=87dc1a9f0d9bb10b3672428e8e67ec50&itemIGO=oecd&itemContentType=book
- Papageorgiou, C., Saam, M. & Schulte, P. (2017).** Substitution between Clean and Dirty Energy Inputs: A Macroeconomic Perspective. *The Review of Economics and Statistics*, 99(2), 281–290.
https://doi.org/10.1162/REST_a_00592
- Pisani-Ferry, J. & Mahfouz, S. (2023).** *Les incidences économiques de l'action pour le climat*. France Stratégie. Rapport.
<https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/2023-incidences-economiques-rapport-pisani-5juin.pdf>
- Quinet, A. (2019).** *La valeur de l'action pour le climat*. France Stratégie. Rapport.
<https://www.strategie.gouv.fr/publications/de-laction-climat>
- Quinet, É. (2013).** *L'évaluation socioéconomique des investissements publics*. Rapport final. Commissariat général à la stratégie et à la prospective.
https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/archives/CGSP_Evaluation_socioeconomique_17092013.pdf
- Ramsey, F. P. (1928).** A Mathematical Theory of Saving. *The Economic Journal*, 38, 543–559.
<https://doi.org/10.2307/2224098>
- Rozenberg, J., Vogt-Schilb, A. & Hallegatte, S. (2020).** Instrument choice and stranded assets in the transition to clean capital. *Journal of Environmental Economics and Management*, 100, 102183.
<https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.10.005>
- SDES (2023).** *Chiffres clés du climat*.
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2023/>
- Stern, N. (2006).** *Stern Review on the Economics of Climate Change*. HM Treasury, Rapport.
http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100407010852/http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm
- Stokey, N. L., Lucas, R. E. & Prescott, E. C. (1989).** *Recursive Methods in Economic Dynamics*.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:122642167>
-

À la chasse aux « zombies bruns » pour réduire les émissions de carbone de l'industrie

Hunting “Brown Zombies” to Reduce Industry’s Carbon Emissions

Gert Bijmens* et Carine Swartenbroekx**

Résumé – Cet article fournit une première estimation du potentiel d’atténuation des émissions de gaz à effet de serre que pourrait représenter une réallocation intrasectorielle de l’activité économique de l’industrie manufacturière européenne, des entreprises à forte intensité d’émissions, ou « zombies bruns », vers des entreprises à plus faible intensité d’émissions. En appliquant des techniques tirées de la littérature sur la productivité, nous estimons à 38 % la réduction potentielle des émissions directes de gaz à effet de serre fondée sur une réallocation limitée de la production entre entreprises, sans faire appel à de nouvelles technologies. Suivant nos résultats, lorsqu’ils conçoivent des plans de réduction des émissions, outre s’intéresser au progrès et à l’innovation au sein des entreprises existantes, les décideurs politiques devraient également davantage encourager la réallocation de l’activité économique des entreprises « zombies bruns » vers des entreprises moins intenses en émissions de gaz à effet de serre.

Abstract – This paper provides a first estimate of the potential greenhouse gas mitigation from the intra-sector reallocation of economic activity by the European manufacturing industry away from carbon-inefficient – or “brown zombie” – firms to more carbon-efficient firms. Using techniques from the literature on productivity, we find a potential reduction of 38% of direct greenhouse gas emissions based on a limited reallocation of production, without the need for new technologies. According to our results, when designing emission reduction plans, in addition to focusing on improvements and innovation within existing firms, policymakers should also do more to encourage the reallocation of economic activity from “brown zombies” to more carbon-efficient enterprises.

JEL : D22, L23, L52, L60, O14, Q58

Mots-clés : politique climatique, réduction des émissions de carbone, industries à forte intensité carbone, réallocation, zombies bruns

Keywords: climate policy, carbon emission reduction, carbon-intensive industries, reallocation, brown zombies

*Département des Études, Banque nationale de Belgique, et division d’économie, KU Leuven ; **Département des Études, Banque nationale de Belgique.
Correspondance : gert.bijmens@nbb.be

Nous remercions Dominique Goux et deux rapporteurs anonymes pour leurs commentaires et suggestions. Nous remercions également les participants au séminaire de la Banque nationale de Belgique, la Banque européenne d’investissement et l’University of Liverpool Management School. Cet article ne doit pas être considéré comme représentant les points de vue de la Banque nationale de Belgique (BNB). Les opinions exprimées sont celles des auteurs et ne représentent pas nécessairement celles de la BNB.

Reçu en avril 2023, accepté en juillet 2024. Traduit de « Hunting “Brown Zombies” to Reduce Industry’s Carbon Emissions ».
Les jugements et opinions exprimés par les auteurs n’engagent qu’eux-mêmes, et non les institutions auxquelles ils appartiennent, ni a fortiori l’Insee.

Citation: Bijmens, G. & Swartenbroekx, C. (2024). Hunting “Brown Zombies” to Reduce Industry’s Carbon Emissions. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 544, 27–44. doi : 10.24187/ecostat.2024.544.2122

Le paquet de mesures de l'Union européenne (UE) *Fit for 55*, qui fait partie du « Pacte vert pour l'Europe »¹, contient l'objectif ambitieux de réduire de 55 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990. S'il n'est pas prévu que cette réduction aille de pair avec une diminution substantielle de la production industrielle, cela implique que l'« efficacité carbone » de l'industrie européenne doive considérablement s'améliorer. L'industrie devra en effet générer la même production (voire une production plus élevée) avec des émissions de GES plus faibles.

Le débat concernant la façon de concrétiser cette ambition se concentre principalement sur l'innovation verte. La Commission européenne (CE) souhaite que la nouvelle stratégie industrielle de l'UE oriente les entreprises manufacturières européennes vers un avenir neutre en carbone, tout en les rendant plus compétitives à l'échelle mondiale. Elle souhaite « [aider] l'industrie à réduire son empreinte carbone en proposant des solutions technologiques propres et abordables et en développant de nouveaux modèles d'entreprise »². L'accent est clairement mis sur le développement de technologies et de processus innovants ainsi que sur leur adoption dans toute l'Europe³. Nous ne remettons pas en question l'importance de l'innovation verte, mais cette stratégie part implicitement du principe que la technologie nécessaire pour permettre à l'industrie manufacturière européenne d'entamer sa profonde décarbonation n'est pas encore disponible.

L'instrument politique de l'UE qui régleme les émissions industrielles est le système d'échange de quotas d'émission de l'UE, le SEQUE-UE⁴. Ce système oblige les grandes installations industrielles à payer pour au moins une partie de leurs émissions de CO₂. Non seulement il fournit une incitation financière pour l'adoption de sources d'énergie renouvelable, mais il encourage aussi le secteur manufacturier à forte intensité d'émissions de GES à réduire son empreinte carbone. Un système complexe est utilisé pour répartir des droits d'émission gratuits entre les installations industrielles, qui se fondent sur un référentiel établi par les installations les plus performantes fabriquant un produit similaire. Ce système reconnaît donc qu'il existe une certaine fourchette de performances carbone dans des secteurs étroitement définis. Plus précisément, Vieira *et al.* (2021) ont étudié l'évolution des émissions couvertes par le SEQUE-UE et constaté qu'elle pouvait aller de l'absence de réduction à une réduction de plus de 80 % des émissions entre 2005 et

2017 pour des entreprises manufacturières exerçant la même activité. Ils concluent donc que l'absence de technologies alternatives ne peut être la seule raison des faibles performances obtenues en matière d'atténuation des émissions de GES. Plus récemment, Capelle *et al.* (2023) ont analysé les émissions autodéclarées pour un échantillon international de 4 000 grandes entreprises cotées en bourse et constaté une hétérogénéité significative des performances environnementales au sein d'une même industrie et d'un même pays.

Dans cet article, nous faisons une autre proposition pour améliorer l'efficacité carbone agrégée du secteur manufacturier, venant s'ajouter à l'innovation et à d'autres améliorations au sein des entreprises existantes. Elle implique la réallocation ou la réorientation des ressources entre les entreprises et les industries, depuis les entreprises à faible efficacité carbone vers celles à plus forte efficacité carbone. L'importance de la réallocation des gains de productivité agrégée est bien établie depuis les travaux précurseurs de Foster *et al.* (2001). Selon eux, ce mécanisme de réallocation de l'activité économique vers les entreprises les plus productives représente environ 50 % de la croissance de la productivité dans le secteur manufacturier américain et 90 % dans celui du commerce de détail. D'autres auteurs ont obtenu des résultats comparables pour l'Europe⁵. Lorsque les ressources sont réorientées depuis les entreprises à faible productivité vers celles à forte productivité, la productivité agrégée augmente sans modifier la productivité des entreprises considérées individuellement.

Nous appliquons un raisonnement similaire aux gains d'efficacité carbone, que nous considérons comme une « productivité carbone » ou une mesure de la façon dont les entreprises utilisent efficacement, c'est-à-dire limitent, leurs émissions pour générer un niveau de production

1. Le pacte vert pour l'Europe est un ensemble d'initiatives politiques lancées par la Commission européenne (CE) dans le but de faire de l'Europe le premier continent climatiquement neutre au monde.

2. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/industry-and-green-deal_fr

3. Le récent rapport Pisani-Ferry & Mahfouz (2023) pour la France est un peu plus nuancé et affirme qu'une révolution est nécessaire non seulement dans les méthodes de production, mais aussi dans les modes de consommation. Cet ajustement des modes de consommation implique également une réallocation de la production économique entre les secteurs de production. Néanmoins, les projections du coût de la transition industrielle se fondent sur l'écologisation des sites de production existants à fortes émissions de carbone.

4. De plus amples informations sur le SEQUE-UE sont disponibles dans Bijmens & Swartenbroekx (2022).

5. Par exemple, Gamberoni *et al.* (2016) pour la zone euro, Ben Hassine (2019) pour la France.

donné⁶. Pour réduire leurs émissions de GES, les entreprises existantes peuvent innover, changer leurs techniques de production ou investir dans la réduction. Il s'agit d'améliorations dites « intra-entreprise ». Elles peuvent également réallouer leurs ressources. La réallocation fait référence aux ressources qui sont redistribuées, au sein des secteurs à forte intensité carbone ou entre eux, vers des entreprises relativement plus efficaces en carbone, par le biais de la réduction des effectifs des entreprises existantes présentant la plus forte intensité carbone et de la croissance des entreprises plus propres. Le concept d'entreprises « zombies », à savoir des entreprises à faible productivité qui ne seraient normalement pas en mesure de maintenir leur activité sur un marché concurrentiel, est bien connu dans la littérature sur la productivité⁷. En raison de la hausse de leur taux de survie au cours de la dernière décennie, ces entreprises immobilisent des capitaux et freinent donc la croissance des entreprises plus productives. En d'autres termes, les entreprises zombies limitent la réallocation qui pourrait améliorer la productivité. Nous introduisons quant à nous le concept de « zombies bruns », en l'occurrence d'entreprises ayant la « productivité carbone » la plus faible de leur secteur.

Notre analyse révèle que l'industrie manufacturière n'a réduit que de façon marginale l'intensité de ses émissions de GES au cours de la période 2013-2019. Même au sein de secteurs très circonscrits, il existe des différences substantielles d'intensité des émissions, définie comme le rapport entre les émissions de GES et la valeur ajoutée de l'entreprise. Bien que l'intensité des émissions ait légèrement diminué entre 2013 et 2019, principalement en raison de la réallocation des ressources, les réductions les plus notables ne découlent pas des améliorations intra-entreprises, ni de l'entrée ou de la sortie d'entreprises. Pour atteindre les objectifs fixés au niveau de l'UE, les réductions d'émissions de GES à venir devront nettement dépasser les réductions réalisées jusqu'à présent. Au-delà des avancées technologiques, il pourrait être possible de fortement atténuer les émissions de GES en transférant la production vers les unités les plus efficaces en carbone de chaque secteur, c'est-à-dire en l'éloignant des zombies bruns.

Dans un premier temps, nous introduisons des méthodes de décomposition tirées de la littérature sur la productivité pour analyser l'évolution passée de l'intensité des émissions de carbone. Ensuite, nous sommes parmi les premiers à estimer le potentiel de réduction des émissions de GES issu de la réallocation

intrasectorielle de l'activité économique depuis les entreprises fortement émettrices vers d'autres plus faiblement émettrices⁸. Nous estimons qu'une réallocation limitée au sein de chaque secteur, aux dépens des entreprises présentant la plus forte intensité d'émissions, pourrait engendrer une réduction de 38 % des émissions de GES couvertes par le SEQUE-UE. Suivant nos résultats, lorsqu'ils conçoivent des plans de réduction des émissions de GES, outre se concentrer sur le verdissement des entreprises industrielles existantes, les décideurs politiques devraient également davantage tenir compte du fait que certaines entreprises zombies bruns pourraient réduire leurs effectifs et céder leur part de marché à des entreprises plus efficaces en carbone.

Cet article s'articule comme suit : la première section présente les données utilisées. La section 2 décompose l'évolution passée de l'intensité des émissions en contributions provenant de l'évolution des émissions intra-entreprises, de la réallocation de l'activité inter-entreprises, et de l'entrée et de la sortie d'entreprises du marché. La section 3 quantifie le potentiel de réduction future des émissions résultant de la réallocation de l'activité. Enfin, nous concluons et soulignons la pertinence d'envisager une réallocation de l'activité industrielle pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de l'UE.

1. Données

1.1. Émissions de GES et intensité des émissions au niveau de l'entreprise

Notre analyse repose sur l'appariement des données du système d'échange de quotas d'émission (SEQUE-UE) sur les émissions de GES au niveau des installations SEQUE-UE avec les données financières au niveau de l'entreprise provenant de la base de données ORBIS du Bureau van Dijk. Cela nous permet d'évaluer l'intensité des émissions au niveau de l'entreprise et de les rapporter à sa production. Dans

6. Le concept de productivité carbone, proposé pour la première fois par Kaya & Yokobori (1997), est utilisé pour décrire l'efficacité carbone agrégée, définie comme étant le PIB produit par unité d'émission de carbone (ou vice versa).

7. Voir par exemple Adalet McGowan et al. (2018). Les entreprises zombies sont des entreprises non viables qui peuvent continuer à exercer leur activité en raison des retombées de la crise financière, grâce à une plus grande tolérance des banques, à une relance monétaire prolongée et au maintien de politiques de soutien aux PME induites par la crise.

8. Capelle et al. (2023) utilisent des informations sur 4 000 entreprises cotées en bourse à travers le monde et estiment que si elles réalisaient leur production en ayant une intensité d'émission de GES à hauteur du 25^e centile de leur pays et de leur secteur, le total des émissions diminuerait de 33 %. À noter que, dans la mesure où le SEQUE-UE concerne l'ensemble de l'UE, cet article ne compare pas les intensités d'émission au sein d'un pays, mais au sein de l'UE.

ce qui suit, nous décrivons chaque source de données en détail et fournissons quelques statistiques descriptives.

Nous partons du Journal des transactions de l'Union européenne (EUTL – *EU Transaction Log*), le système central de reporting et de suivi de toutes les transactions du SEQUE-UE gérées par la Commission européenne. Le système couvre quelque 10 000 installations fixes dans les secteurs de l'énergie et de l'industrie, ainsi que des compagnies aériennes œuvrant dans l'UE. Toutes les installations industrielles dépassant un certain seuil de capacité de puissance thermique sont réglementées par le SEQUE-UE. Chaque installation doit déclarer annuellement la quantité vérifiée de CO₂ émis⁹. Pour chaque tonne émise, l'entreprise propriétaire de l'installation doit céder un droit d'émissions (un quota d'émissions) à la Commission européenne. Les entreprises réglementées par le SEQUE-UE doivent acquérir ces quotas soit sur le marché du carbone, soit par le biais d'enchères du SEQUE-UE. De nombreuses entreprises manufacturières réglementées par le SEQUE-UE reçoivent gratuitement un grand nombre de quotas.

Le périmètre des émissions réglementées par le SEQUE-UE est l'installation elle-même. Le SEQUE-UE exige que le propriétaire d'une installation restitue des quotas d'émission pour les émissions directes de cette installation (scope 1). Les émissions des fournisseurs de l'installation (émissions provenant soit des achats d'énergie (scope 2), soit d'autres produits achetés à l'extérieur (scope 3)) ne sont donc couvertes par le SEQUE-UE que si l'installation fournisseuse l'est. Si une installation ou une entreprise possède sa propre unité de production d'énergie, elle doit également restituer des quotas pour les émissions de cette unité. En résumé, le propriétaire d'une installation réglementée par le SEQUE-UE n'a besoin de quotas d'émission que pour les émissions provenant directement de cette installation.

Le Journal des transactions de l'Union européenne (EUTL) inclut les émissions annuelles effectives et celles gratuitement attribuées au niveau de l'installation. Nous excluons les émissions du secteur de l'aviation et n'utilisons que les informations relatives aux installations fixes. L'EUTL fournit également un numéro d'enregistrement national et un nom d'entreprise reliant l'installation à son entreprise mère. Il indique enfin le secteur d'activité de chaque installation. La liste des secteurs d'activité figure en annexe. Chaque secteur d'activité est relié soit à un produit (par exemple « traitement des métaux

ferreux » ou « production d'ammoniaque »), soit à la « combustion ». Une installation de combustion désigne généralement une installation qui utilise la chaleur pour produire de l'électricité et, par conséquent, ce sont les entreprises du secteur de la production d'énergie qui exploitent la plupart d'entre elles. Une installation de combustion peut également appartenir à une entreprise manufacturière dont l'activité n'est pas spécifiquement incluse dans le SEQUE-UE (par exemple la transformation des produits alimentaires) ou à une entreprise ou organisation de services (par exemple des hôpitaux ou universités).

Les émissions du SEQUE-UE provenant des installations exploitées par un producteur d'énergie ont considérablement baissé : elles ont diminué de moitié entre 2005 et 2020 (figure I). Les producteurs d'énergie ont réduit leur intensité d'émissions de GES grâce à des mesures comme le passage du charbon au gaz ou aux énergies renouvelables (Marcu *et al.*, 2021). Toutefois, les émissions provenant d'installations extérieures au secteur de l'énergie sont restées stables au cours de la dernière décennie.

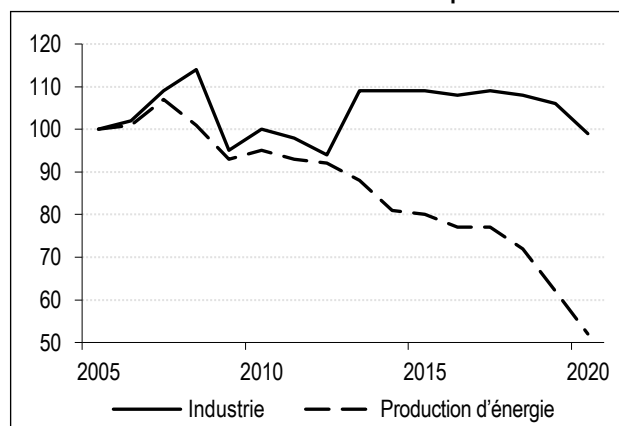
Ces évolutions des émissions totales ne sont qu'une partie de l'histoire. Elles ne peuvent pas être évaluées indépendamment de la production associée. Dans l'industrie, les variations des émissions sont étroitement liées à celles de la production. Toutefois, le déclin de l'activité n'est pas l'objectif du pacte vert pour l'Europe. La trajectoire souhaitée pour que l'industrie européenne atteigne la neutralité carbone passe par une baisse de l'intensité en émissions de la production (la quantité de CO₂ émise par unité produite).

Nous utilisons la valeur ajoutée comme mesure de la production des entreprises. Pour relier les émissions à la valeur ajoutée, nous utilisons les informations relatives à l'entreprise exploitante ou au propriétaire de l'installation recueillies à partir de la base de données ORBIS du Bureau van Dijk. ORBIS est la plus grande base de données d'entreprises disponible au niveau international et accessible pour la recherche économique et financière¹⁰. Il s'agit d'une base de données commerciale fournie par le Bureau van Dijk. ORBIS regroupe des informations issues de sources administratives,

9. L'unité d'émission utilisée dans le cadre du SEQUE-UE est le CO₂-eq, ou équivalent CO₂, car le système couvre également les GES autres que le CO₂.

10. Voir, par exemple, Gal (2013) qui utilise ORBIS pour les calculs de productivité, Koch & Themann (2022) qui étudient l'impact du SEQUE-UE sur la productivité des entreprises et Pak *et al.* (2019) qui analyse la part du travail dans les pays de l'OCDE.

Figure I – Évolution des émissions de GES couvertes par le SEQUE-UE depuis 2005



Note : la production d'énergie inclut les installations dont l'entreprise mère a un code NACE compris entre 35 et 39 (production et distribution d'électricité, de gaz, de vapeur et d'air conditionné ; production et distribution d'eau, assainissement, gestion des déchets et dépollution). L'industrie inclut toutes les autres installations fixes.

Source : EUTL.

notamment les bilans détaillés, les comptes de résultat et les comptes de pertes et profits des entreprises. Les données financières sont harmonisées entre les pays et fournies dans un format international standard. Nous utilisons les données financières non consolidées provenant des informations déposées dans les registres locaux afin de garantir que seuls les résultats financiers provenant des activités de l'entreprise et d'elle seule sont incluses dans notre analyse, les comptes consolidés pouvant inclure les activités d'autres entreprises d'un même groupe. Nous utilisons les variables ORBIS relatives à la valeur ajoutée (en euros¹¹) et au secteur d'activité (code NACE à deux chiffres). Lorsque la valeur ajoutée n'est pas déclarée, nous l'estimons par la différence entre les revenus d'exploitation et les dépenses de consommations intermédiaires. La valeur ajoutée est déflatée à l'aide d'un déflateur spécifique à la valeur ajoutée au niveau du secteur à deux chiffres × pays. Ces déflateurs proviennent de la Base de données pour l'analyse structurelle de l'OCDE¹². Si aucun déflateur au niveau des secteurs NACE à deux chiffres n'est disponible, nous utilisons le déflateur du niveau supérieur d'agrégation sectorielle. Sachant que les variations annuelles de la valeur ajoutée peuvent être volatiles, le taux de croissance de la valeur ajoutée est winsorisé au 1^{er} et au 99^e centiles.

Nous relierons chaque installation de l'EUTL avec son entreprise mère dans ORBIS. Lorsqu'il n'y a pas de correspondance exacte de l'identifiant d'entreprise dans l'EUTL avec un identifiant dans ORBIS, nous utilisons la recherche approximative d'ORBIS à partir du nom de l'entreprise mère de l'installation. En cas de résultats multiples, nous sélectionnons manuellement la

correspondance la plus réaliste. Nous ignorons les installations ne pouvant pas être reliées à l'état financier d'une entreprise dans ORBIS. Certaines installations sont exploitées par une entreprise qui n'est pas immatriculée dans le pays dans lequel l'installation est située. Ces observations ne sont pas non plus prises en compte.

Cet article analyse les évolutions de l'intensité des émissions de GES (mesurées en tonnes de CO₂-eq émises par million d'euros de valeur ajoutée) pour les entreprises industrielles, à l'exclusion des secteurs de la production d'énergie, de la gestion de l'eau et du traitement des déchets¹³, entre 2013 et 2019¹⁴. Pour les entreprises pérennes, il faut donc que la valeur ajoutée soit connue en 2013 et en 2019. En outre, nous excluons les « petites » entreprises dont la valeur ajoutée est inférieure à 100 000 euros en 2013 ou 2019. Au final, notre analyse couvre environ 75 % des installations fixes du SEQUE-UE appartenant à une entreprise industrielle, à l'exclusion du secteur de la production d'énergie. Elles représentent environ

11. Pour les pays non membres de la zone euro, ORBIS convertit la valeur ajoutée en euros selon le taux de change moyen de l'année concernée.

12. Les données peuvent être obtenues à l'adresse suivante : <https://www.oecd.org/fr/data/datasets/structural-analysis-database.html>

13. Code NACE à deux chiffres égal ou inférieur à 33. Cela signifie que le secteur de la production d'électricité, gaz, vapeur, air conditionné (NACE 35) est exclu. Les installations de combustion, qui produisent éventuellement de l'électricité sur site, appartenant à une entreprise dont le code NACE à deux chiffres est inférieur à 33 sont incluses. Les codes NACE à deux chiffres inférieurs à 10 incluent principalement les entreprises actives dans le secteur pétrolier et gazier en amont qui exploitent généralement des installations classées dans l'activité « combustion ».

14. Cette période a été choisie, car 2013 marque le début de la phase 3 du SEQUE-UE. L'année 2019 est privilégiée comme référence, car les émissions de 2020 et de 2021 ont été affectées par la crise de la Covid-19 (voir Marcu et al., 2022) et l'année 2021 marque le début d'une nouvelle phase du SEQUE-UE.

70 % des émissions des installations fixes (voir l'Annexe en ligne, tableau S1, pour la couverture par pays, lien vers l'Annexe en ligne à la fin de cet article). Ce taux assez significativement inférieur à 100 % s'explique principalement par le fait que la valeur ajoutée d'entreprises de plusieurs pays (comme les Pays-Bas ou la Grèce) n'est pas disponible dans ORBIS, et leurs données sont donc exclues de l'analyse (et non du fait d'une faible couverture uniforme dans tous les pays).

Enfin, nous regroupons les installations appartenant à la même entreprise mère au sein d'un pays. Les émissions d'une entreprise sont calculées comme étant la somme des émissions de ses installations. L'activité attribuée à l'entreprise est celle de la ou des installation(s) émettrice(s) couverte(s) par le SEQE-UE. Si une même entreprise exploite plusieurs installations dont les activités sont différentes, nous considérons que

l'activité de l'entreprise est celle correspondant au plus gros volume d'émissions. Environ 70 % des entreprises de notre échantillon n'exploitent qu'une seule installation. Bien que le pétrole et le gaz ne soient pas inclus dans le SEQE-UE (ces installations sont classées dans l'activité « combustion »), nous affectons les entreprises exploitantes dont le code NACE à deux chiffres est 06 au pétrole et au gaz.

1.2. Statistiques descriptives

Au total, notre analyse porte sur environ 2 800 entreprises en 2013 et 2 500 entreprises en 2019. Le nombre d'installations et le volume d'émissions couvertes par notre analyse ne diffèrent pas significativement d'une activité à l'autre (voir l'Annexe en ligne, tableau S2, pour la couverture par activité). Le tableau 1 présente les statistiques descriptives des entreprises de notre échantillon.

Tableau 1 – Statistiques descriptives de l'échantillon utilisé

	2013	2019
Entreprises (nombre)	2 807	2 479
Entreprises à installation unique	1 984	1 719
Pérennes	2 343	2 343
Sortantes	464	
Entrantes		136
Installations (nombre)	4 910	4 441
Installations par entreprise (nombre)		
Moyenne	1,75	1,79
Médiane	1,00	1,00
P20	1,00	1,00
P80	2,00	2,00
Émissions par entreprise (en tCO ₂ -eq)		
Moyenne	163 139	183 124
Médiane	17 469	26 871
P20	4 766	7 424
P80	86 806	112 642
Valeur ajoutée par entreprise (en millions d'euros)		
Moyenne	97	117
Médiane	20	25
P20	5	6
P80	82	94
Intensité des émissions par entreprise (en tCO ₂ -eq par million d'euros de valeur ajoutée)		
Moyenne pondérée	1 680	1 627
Moyenne	4 779	4 662
Médiane	1 207	1 415
P20	280	330
P80	4 702	4 640

Note : valeur ajoutée en euros aux prix de 2015. P20 et P80 font référence aux 20^e et 80^e centiles de la distribution de la variable. La moyenne pondérée utilise la part de la valeur ajoutée totale comme poids (voir équation 1, section 2).
Source : EUTL et ORBIS, calcul des auteurs.

Entre 2013 et 2019, l'intensité du total des émissions des industries réglementées par le SEQE-UE (émissions totales divisées par la valeur ajoutée totale, soit la moyenne des intensités d'émission pondérée par la part de la valeur ajoutée de chaque entreprise) a légèrement diminué, passant de 1 680 à 1 627 tCO₂-eq par million d'euros de valeur ajoutée. Le volume moyen des émissions pour un million d'euros de valeur ajoutée a également diminué. En outre, l'intensité des émissions est assez hétérogène entre entreprises : en 2013, 20 % des entreprises émettent moins de 280 tCO₂-eq par million d'euros de valeur ajoutée et 20 % en émettent plus de 4 700 (resp. 330 et 4 640 en 2019). Il existe de très grandes différences entre les secteurs intenses en émissions dans les émissions de carbone par unité de valeur ajoutée. Par

exemple, la production de ciment et la production de chaux nécessitent environ dix fois plus de carbone pour générer la même valeur ajoutée que la production de verre ou celle de papier. Le tableau 2 montre que l'intensité des émissions varie de façon importante non seulement entre les activités, mais aussi au sein d'une même activité.

2. Décomposition des variations de l'intensité des émissions de carbone

2.1. Méthodologie

Pour mieux comprendre les processus sous-jacents à l'évolution de l'intensité des émissions de GES, nous utilisons des techniques classiques tirées de la littérature sur la productivité, qui décomposent l'évolution de la productivité agrégée en contributions des

Tableau 2 – Statistiques récapitulatives sur l'hétérogénéité de l'intensité des émissions

Secteur d'activité	Observations (nombre d'entreprises)	Intensité des émissions (en tCO ₂ -eq par million d'euros de valeur ajoutée)			
		Moyenne	Médiane	P20	P80
Combustion	1 680	1 719	525	85	1 960
Raffinage	109	18 063	6 699	1 455	14 445
Coke	11	55 023	14 296	9 581	38 306
Minerais métalliques	25	4 338	2 431	770	6 772
Fer ou acier	224	6 520	2 115	1 005	6 111
Métaux ferreux	241	1 567	746	196	2 215
Aluminium primaire	25	2 989	1 979	597	5 116
Aluminium secondaire	33	1 060	848	403	1 500
Métaux non ferreux	104	4 146	612	159	2 323
Clinker de ciment	167	23 479	21 447	14 052	34 334
Chaux	140	23 625	22 561	6 650	35 553
Verre	359	2 626	1 968	770	3 723
Céramiques	775	4 113	2 059	733	5 470
Laine minérale	81	1 822	1 377	578	3 087
Gypse ou plaques de plâtre	51	1 314	854	378	1 495
Pâte	234	1 748	1 086	481	2 847
Papier ou carton	492	2 514	1 610	430	3 456
Noir de carbone	15	18 908	5 761	1 888	12 953
Acide nitrique	17	4 164	1 935	662	6 190
Acide adipique	2	2 019	2 019	1 309	2 729
Ammoniaque	20	14 190	12 376	3 537	21 142
Produits chimiques en vrac	199	8 281	826	194	3 959
Hydrogène	26	6 173	1 151	293	10 355
Carbonate de soude	12	8 081	7 474	1 912	13 194
Autres	18	3 734	1 458	427	6 668
Pétrole et gaz	226	5 264	1 475	307	6 866

Note : les dénominations complètes des activités figurent dans l'annexe. L'activité pétrole et gaz ne fait pas partie des activités figurant dans le SEQE-UE. Les entreprises dont le code NACE à deux chiffres est 06 sont classées dans l'activité pétrole et gaz.

Source : EUTL et ORBIS, calcul des auteurs.

entreprises pérennes, des entreprises entrantes et des entreprises sortantes. Ces techniques de décomposition mettent en lumière l'importance relative des processus sous-jacents de progrès internes aux entreprises, de réallocation de l'activité entre entreprises et d'entrées et sorties d'entreprises.

Nous appliquons ces techniques pour décomposer l'évolution des émissions agrégées de GES, ou « productivité carbone ». L'évolution de l'intensité des émissions, mesurée en CO₂-eq émis par unité de valeur ajoutée, est décomposée en contributions des entreprises pérennes, des entreprises entrantes et des entreprises sortantes couvertes par le SEQE-UE.

L'intensité totale des émissions (EI_t) à la date t est définie comme le total des émissions divisé par la valeur ajoutée totale des entreprises industrielles incluses dans notre échantillon. Il est égal à la somme pondérée du volume des émissions ($ei_{i,t}$) de chaque entreprise i à la date t :

$$EI_t = \sum_i \theta_{i,t} ei_{i,t} \quad (1)$$

où $\theta_{i,t}$ représente la part de la valeur ajoutée de l'entreprise i à la date t dans la valeur ajoutée totale des entreprises de l'échantillon et $ei_{i,t} = \frac{\text{emissions}_{i,t}}{\text{value added}_{i,t}}$ est le volume des émissions de l'entreprise i à la date t divisé par la valeur ajoutée de i à la date t .

Une première méthode de décomposition (de la productivité) a été proposée par Baily *et al.* (1992). Ensuite, pour résoudre certains problèmes posés par cette méthode, Griliches & Regev (1995) et Foster *et al.* (2001) ont proposé d'autres méthodes, décomposant la productivité par rapport à un niveau de productivité de référence. Plus récemment, Melitz & Polanec (2015) ont introduit une méthode supplémentaire. Toutes ces méthodes ont en commun de décomposer l'évolution de la productivité en trois composantes. La première représente l'« effet intra-entreprises », c'est-à-dire l'évolution de la productivité au sein des entreprises pérennes. La deuxième représente l'« effet inter-entreprises » des entreprises pérennes, qui mesure les variations de la productivité dues aux évolutions des parts de marché des entreprises pérennes, autrement dit dues à la réallocation de l'activité entre entreprises pérennes. La troisième composante est « l'effet des entrées nettes », qui rend compte de la (nouvelle) contribution des entreprises entrant sur le marché et de la (fin de la) contribution de celles sortant du marché. Bien que d'autres méthodes existent, nous nous concentrons sur ces trois dernières

méthodes, qui sont couramment utilisées¹⁵, dans lesquelles nous remplaçons la productivité par l'intensité carbone.

2.1.1. Méthode de Griliches & Regev (1995)

La méthode de Griliches et Regev (GR) utilise l'intensité des émissions agrégée moyenne ($\bar{EI}$) entre les deux périodes t et $t-1$ comme référence.

$$\Delta EI_t = \underbrace{\sum_{i \in C} \bar{\theta}_i \Delta ei_{i,t}}_{\text{effet intra}} + \underbrace{\sum_{i \in C} \Delta \theta_{i,t} (\bar{ei}_i - \bar{EI})}_{\text{effet inter}} + \underbrace{\sum_{i \in N} \theta_{i,t} (ei_{i,t} - \bar{EI}) - \sum_{i \in X} \theta_{i,t-1} (ei_{i,t-1} - \bar{EI})}_{\text{effet entrées nettes}} \quad (2)$$

$\Delta EI_t (= EI_t - EI_{t-1})$ correspond à la variation de l'intensité des émissions agrégée entre les périodes t et $t-1$. Les entreprises couvertes par le SEQE-UE sont indexées par i et peuvent être partitionnées en trois groupes : les pérennes (C), les entrantes (N) et les sortantes (X). $\theta_{i,t}$ est la part de la valeur ajoutée de l'entreprise i dans la valeur ajoutée totale et $ei_{i,t}$ l'intensité des émissions attribuée à l'entreprise i au cours de la période t . Les barres sur les variables indiquent que la moyenne a été prise sur les deux périodes. L'intensité des émissions est mesurée par rapport à la valeur ajoutée, c'est-à-dire en tonnes de CO₂-eq émises par unité de valeur ajoutée.

La contribution de l'effet « intra » est négative si les entreprises pérennes réduisent leur intensité carbone. L'effet « inter » est négatif si l'intensité des émissions des entreprises gagnant des parts de marché est inférieure au niveau de référence. Les entreprises entrantes (resp. sortantes) contribuent négativement si elles émettent moins (resp. plus) que le niveau de référence. La décomposition GR présente un inconvénient : les effets « intra » et « inter » sont interdépendants, sachant que l'effet « intra » dépend de la part de marché moyenne et que l'effet « inter » dépend de la variation de la part de marché. La décomposition n'isole donc pas dans un seul de ses termes la réallocation des parts de marché aux entreprises devenant plus intenses en émissions.

2.1.2. Méthode de Foster, Haltiwanger & Krizan (2001)

La méthode de Foster, Haltiwanger & Krizan (FHK) résout ce problème en introduisant un terme de covariance ou effet de covariance entre la part de marché et l'intensité des émissions. Le niveau de référence est l'intensité totale des émissions au cours de la période $t-1$ (EI_{t-1}).

15. Voir Ben Hassine (2019) pour une analyse plus détaillée des trois méthodes.

$$\Delta EI_t = \underbrace{\sum_{i \in C} \theta_{i,t-1} \Delta e_{i,t}}_{\text{effet intra}} + \underbrace{\sum_{i \in C} \Delta \theta_{i,t} (e_{i,t-1} - EI_{t-1})}_{\text{effet inter}} + \underbrace{\sum_{i \in C} \Delta \theta_{i,t} \Delta e_{i,t}}_{\text{effet croisé}} + \underbrace{\sum_{i \in N} \theta_{i,t} (e_{i,t} - EI_{t-1}) - \sum_{i \in X} \theta_{i,t-1} (e_{i,t-1} - EI_{t-1})}_{\text{effet entrées nettes}} \quad (3)$$

La covariance entre l'intensité des émissions et la « taille » de l'entreprise, ou effet croisé, est négative lorsque l'intensité des émissions et la part de marché des entreprises évoluent dans des sens opposés. Cela implique que, pour qu'une entreprise contribue à une réduction de l'effet croisé, elle doit à la fois améliorer son efficacité carbone et acquérir des parts de marché, même si son intensité d'émission est supérieure à la moyenne. Essentiellement, ce terme met en évidence un processus de réallocation, sans nécessairement favoriser les entreprises les moins émettrices. Par rapport à la méthode GR, la méthode FHK présente l'inconvénient d'être plus sensible aux erreurs de mesure¹⁶. En outre, la méthode FHK surestime potentiellement la contribution des entreprises entrantes, car elles ne sont pas prises en compte dans le calcul de l'intensité des émissions de référence (EI_{t-1}).

2.1.3. Méthode de Melitz & Polanec (2015)

Melitz & Polanec (2015) considèrent que les méthodes de décomposition ci-dessus introduisent certains biais dans la mesure des contributions des entreprises entrantes et sortantes. Pour y remédier, ils proposent une composition dynamique fondée sur les travaux d'Olley & Pakes (1996).

$$\Delta EI_t = \underbrace{\Delta \bar{e}_t}_{\text{effet intra}} + \underbrace{\Delta cov(\theta_{i,t}, e_{i,t})}_{\text{effet inter}} + \underbrace{\sum_{i \in N} \theta_{i,t} \left[\sum_{i \in N} \frac{\theta_{i,t}}{\sum_{i \in N} \theta_{i,t}} e_{i,t} - \sum_{i \in C} \frac{\theta_{i,t}}{\sum_{i \in C} \theta_{i,t}} e_{i,t} \right]}_{\text{effet entrées nettes}} - \underbrace{\sum_{i \in X} \theta_{i,t-1} \left[\sum_{i \in X} \frac{\theta_{i,t-1}}{\sum_{i \in X} \theta_{i,t-1}} e_{i,t-1} - \sum_{i \in C} \frac{\theta_{i,t-1}}{\sum_{i \in C} \theta_{i,t-1}} e_{i,t-1} \right]}_{\text{effet entrées nettes}} \quad (4)$$

où $\Delta \bar{e}_t = \frac{1}{n} \sum_{i \in C} e_{i,t} - \frac{1}{n} \sum_{i \in C} e_{i,t-1}$ et $cov(\theta_{i,t}, e_{i,t}) = \sum_{i \in C} (\theta_{i,t} - \bar{\theta}_t)(e_{i,t} - \bar{e}_t)$. Une différence notable avec les méthodes précédentes est que l'effet « intra » mesure ici l'évolution de la moyenne non pondérée de l'intensité des émissions des entreprises pérennes. Le terme de covariance est également différent de celui de la décomposition FHK (et donc non comparable à ce dernier), qui saisit la covariance des *variations* de la part de marché et de l'intensité des émissions par *entreprise*. En revanche, l'effet croisé de la décomposition de Melitz & Polanec (MP) saisit la corrélation entre les parts de marché et l'intensité des émissions au cours d'une période donnée.

2.2. Résultats

Le tableau 3 présente l'évolution de l'intensité des émissions entre 2013 et 2019. Cette dernière a diminué d'environ 3 % au cours de la période, passant de 1 680 (en 2013) à 1 627 (en 2019) tonnes de CO₂-eq par million d'euros de valeur ajoutée¹⁷. Le tableau 3 décompose ensuite l'évolution de l'intensité des émissions selon les trois méthodes décrites ci-dessus. La contribution des entreprises pérennes est décomposée en évolution au sein de l'entreprise (effet « intra ») et réallocation entre entreprises (somme de l'effet « inter » et du terme croisé de covariance) auxquelles on ajoute les entrées nettes (effet « entrées » moins effet « sorties »). En l'absence de critère clair prouvant qu'une méthode est meilleure que l'autre, la fourchette donnée par les trois méthodes pourrait être

16. Ceci est dû au terme de covariance de la méthode FHK. Une erreur de mesure aléatoire dans la production engendre une covariance négative entre l'évolution de l'intensité des émissions et celle des parts de production et, par conséquent, un effet « intra » élevé qui est erroné. En revanche, l'effet « intra » mesuré avec la méthode GR est moins sensible à l'erreur aléatoire dans la production, car il établit la moyenne de la part dans le temps, ce qui atténue l'incidence de l'erreur de mesure.

17. Intensité des émissions en tonnes de CO₂-eq par million d'euros de valeur ajoutée. Pour des raisons de simplicité, nous omettons l'unité dans le texte.

Tableau 3 – Décomposition de la variation de l'intensité des émissions entre 2013 et 2019

	2013	Intra	Réallocation			Entrées nettes			2019
			inter	covariance	inter + covariance	entrées	sorties	entrées – sorties	
GR	1 680	-1	-69		-69	-21	-38	17	1 627
	%	-0,1	-4,1		-4,1	-1,3	-2,3	+1,0	-3,2
FHK	1 680	56	-14	-114	-128	-22	-41	19	1 627
	%	+3,3	-0,8	-6,8	-7,6	-1,3	-2,4	+1,1	-3,2
MP	1 680	-2		-76	-76	-21	-46	25	1 627
	%	-0,1		-4,5	-4,5	-1,3	-2,7	+1,5	-3,2

Note : intensité des émissions (2013 et 2019) en tCO₂-eq par million d'euros de valeur ajoutée. GR, FHK et MP font référence aux méthodes de décomposition utilisées.

Source : EUTL et RBIS, calcul des auteurs.

considérée comme définissant l'intervalle plausible dans lequel se trouve chaque composante de l'évolution globale de l'intensité des émissions. Un nombre négatif indique une réduction de l'intensité des émissions.

Les effets « intra » correspondent à l'évolution de l'intensité des émissions au sein de l'entreprise, à parts de marché constantes. Ils correspondent donc à une réduction de l'intensité des émissions au sein de l'entreprise (soit des émissions de carbone plus faibles pour générer la même production), grâce à l'amélioration des processus de production au fil du temps. Ces améliorations peuvent résulter d'innovations, de l'adoption de nouvelles technologies ou de mesures rendant les technologies et/ou les processus existants plus efficaces en carbone. Estimé avec les méthodes GR et MP, l'effet « intra » est proche de zéro. Cela signifie que la variation de l'intensité des émissions pondérée par la valeur ajoutée (GR, équation 2) et la variation non pondérée (MP, équation 4) sont toutes deux limitées. Avec la méthode FHK, l'effet « intra » est positif, ce qui découle du fait que cette méthode inclut un terme de covariance. Le terme de covariance peut saisir le fait qu'une entreprise est susceptible d'augmenter sa part de marché et de réduire son intensité d'émission en même temps. Le fait que l'effet « intra » soit proche de zéro, voire reflète une légère augmentation de l'intensité globale des émissions, implique que les améliorations apportées au sein des entreprises pour réduire leur intensité carbone ont été, au mieux, très modestes.

Le terme de réallocation découle de l'évolution de l'intensité des émissions dans les parts de marché des entreprises couvertes par le SEQUE-UE. L'effet de réallocation est négatif avec les trois méthodes. Cela signifie que la capacité de production est réallouée depuis les entreprises aux plus fortes intensités d'émission vers celles aux plus faibles intensités d'émission. Avec la méthode FHK, le terme de covariance est effectivement négatif. Cela signifie que les entreprises en croissance ont également réduit l'intensité de leurs émissions (par exemple, la croissance engendre une diminution de l'intensité des émissions par le biais d'effets d'échelle). Avec la méthode MP, le terme de covariance négatif doit être interprété différemment. La corrélation négative entre l'intensité des émissions et la taille de l'entreprise est plus élevée (en valeur absolue) en 2019 qu'en 2013. Quelle que soit la méthode, le terme de réallocation est celui qui est prépondérant.

De plus, la décomposition nous permet de mesurer la contribution à la réduction des

émissions due aux entrées nettes d'entreprises, c'est-à-dire correspondant à la contribution des entrées moins celle des sorties. Une entreprise entrante va réduire l'intensité moyenne des émissions si l'intensité de ses émissions est inférieure à la moyenne. Une entreprise sortante réduira l'intensité moyenne des émissions si l'intensité de ses émissions est supérieure à la moyenne. La sortie des entreprises peu performantes (i.e. fortement émettrices) permet de réallouer la production à des utilisations plus efficaces en carbone. Bien que les trois méthodes rendent compte différemment de la manière dont une entreprise entrant ou sortant du marché se positionne relativement à la moyenne, elles aboutissent à des résultats similaires. La contribution des entrées nettes est positive mais faible. Cela signifie que le processus par lequel les nouvelles entreprises remplacent les anciennes du marché n'a pas contribué à réduire l'intensité des émissions.

2.3. Robustesse

Comme nous l'expliquions dans la section 1, nous apparions les données sur les émissions des installations couvertes par le SEQUE-UE avec les données financières des entreprises. Toutes les installations (émettrices de carbone) des entreprises manufacturières européennes ne sont pas soumises à l'obligation d'acheter des quotas : en fonction de l'activité de l'installation, il existe un seuil de taille pour l'inclusion dans le système. En outre, si l'activité de l'installation n'émet pas de carbone, elle n'est pas réglementée par le SEQUE-UE. Si une entreprise incluse dans le SEQUE-UE exploite également des installations qui ne font pas partie du SEQUE-UE, nous risquons de sous-estimer le total de ses émissions et d'inclure la valeur ajoutée générée par des installations non couvertes. Dans ce cas, nous sous-estimons l'intensité réelle des émissions des activités à forte intensité carbone de l'entreprise, et la décomposition pourrait être biaisée. Dans la mesure où nous avons précédemment constaté que la croissance allait de pair avec une réduction de l'intensité des émissions et qu'une installation émettrice de carbone non couverte par le SEQUE-UE était en moyenne plus petite qu'une installation couverte, cette question mérite de faire l'objet d'une étude plus approfondie. Le tableau 4 présente la même décomposition que le tableau 3, mais uniquement pour les entreprises exploitant une seule installation couverte par le SEQUE-UE¹⁸. Sachant que

18. Les entreprises à installation unique sont des entreprises n'exploitant qu'une seule installation au cours de la période.

Tableau 4 – Décomposition de la variation de l'intensité des émissions entre 2013 et 2019 pour les entreprises n'ayant qu'une seule installation

	2013	Intra	Réallocation			Entrées nettes			2019
			inter	covariance	inter + covariance	entrées	sorties	entrées – sorties	
GR	1 369	-5	-15		-15	-38	-87	49	1 399
	%	-0,4	-1,1		-1,1	-2,8	-6,4	+3,6	+2,1
FHK	1 369	41	32	-91	-59	-37	-85	48	1 399
	%	+3,0	+2,3	-6,6	-4,3	-2,7	-6,2	+3,5	+2,1
MP	1 369	461		-492	-492	-40	-101	61	1 399
	%	+33,7		-35,9	-35,9	-2,9	-7,4	+4,5	+2,1

Note : intensité des émissions (2013 et 2019) en tCO₂-eq par million d'euros de valeur ajoutée. GR, FHK et MP font référence aux méthodes de décomposition utilisées. Les entreprises n'ayant qu'une seule installation couverte par le SEQUE-UE représentent environ 70 % des entreprises et environ 30 % des émissions de notre échantillon.

Source : EUTL et ORBIS, calcul des auteurs.

la possibilité pour une entreprise d'exploiter une installation non couverte augmente avec le nombre des installations couvertes, ces résultats sont moins susceptibles de sous-estimer l'intensité des émissions.

Premier constat, l'évolution de l'intensité des émissions reste faible, mais de signe opposé à précédemment. Contrairement aux résultats incluant toutes les entreprises, les entreprises exploitant une seule installation n'ont pas réduit l'intensité de leurs émissions. Cela peut s'expliquer par le fait que ces entreprises bénéficient d'un moins grand nombre d'opportunités de croissance et que la croissance est un moteur important de l'amélioration de l'efficacité carbone. Cela peut également s'expliquer par le fait qu'il n'y a pas de retombées technologiques possibles entre plusieurs installations d'une même entreprise. Pour cette raison, il pourrait être plus coûteux, et donc moins faisable, pour une entreprise à installation unique d'améliorer les technologies ou les processus de production dans le but de réduire les émissions de carbone. Une autre interprétation possible est l'existence d'un mécanisme de causalité inverse : il est possible que ces entreprises ne possèdent pas plus d'une installation et soient plus petites que la moyenne des entreprises couvertes par le SEQUE-UE précisément parce qu'elles n'ont pas réussi à réduire l'intensité de leurs émissions¹⁹. Cela serait un effet désirable du SEQUE-UE.

Deuxième constat, les méthodes GR et FHK présentent des tendances très similaires par rapport à la décomposition portant sur toutes les entreprises (tableau 3). Seule la réallocation contribue de manière significative à la réduction de l'intensité des émissions. La méthode MP montre des résultats plus extrêmes pour les composantes « intra » et « réallocation », toutes deux importantes et se compensant l'une

l'autre. C'est probablement dû au fait que la méthode MP est plus sensible aux valeurs aberrantes, car la composante « intra » est calculée sur la base d'une moyenne non pondérée. Or la valeur ajoutée des entreprises de plus petite taille est relativement plus variable entre les deux périodes. Et l'exclusion des entreprises ayant plusieurs installations fait augmenter le nombre relatif de petites entreprises dans l'échantillon.

Une autre raison pour laquelle nos résultats ne saisissent pas pleinement l'évolution sous-jacente de l'intensité des émissions pourrait venir de l'utilisation de déflateurs. Nous avons utilisé le délateur de la valeur ajoutée le plus couramment utilisé au niveau du code NACE à deux chiffres et qui soit disponible pour tous les pays européens, mais une moyenne pour un secteur défini de façon relativement large ne correspondra jamais complètement à la situation individuelle au niveau de l'entreprise. Dès lors, nous calculons également les émissions rapportées à l'emploi et non plus à la valeur ajoutée. L'avantage de l'utilisation de l'emploi comme indicateur de la production est qu'elle dispense de recourir aux déflateurs. Son inconvénient est qu'elle ne tient pas compte de l'évolution de la productivité du travail. Le tableau 5 montre que l'intensité des émissions calculée à partir de l'emploi a augmenté de plus de 10 % entre 2013 et 2019. Ce résultat est probablement biaisé à la hausse, car nous ne prenons pas en considération l'augmentation potentielle de la productivité du travail²⁰. En termes quantitatifs, les résultats ressemblent fortement à ceux rapportant les émissions à la valeur ajoutée.

19. Ou pour d'autres raisons liées à l'intensité des émissions.

20. Au sein des 28 pays de l'UE, la productivité réelle du travail a augmenté d'environ 6 % entre 2013 et 2019, selon Eurostat (nama_10_LP_ulc).

Tableau 5 – Décomposition de la variation de l'intensité des émissions entre 2013 et 2019, l'intensité des émissions étant calculée en fonction de l'emploi

	2013	Intra	Réallocation			Entrées nettes			2019
			inter	covariance	inter + covariance	entrées	sorties	entrées – sorties	
GR	205	21	-5		-5	-4	-13	9	230
	%	+10,2	-2,4		-2,4	-2,0	-6,3	+4,4	+11,7
FHK	205	22	-4	-1	-5	-4	-11	7	230
	%	+10,7	-2,0	-0,5	-2,4	-2,0	-5,4	+3,4	+11,7
MP	205	35		-19	-19	-4	-13	9	230
	%	+17,1		-9,3	-9,3	-2,0	-6,3	+4,4	+11,7

Note : l'intensité des émissions (2013 et 2019) est calculée comme le volume des émissions (en tCO₂-eq) par salarié. Sont exclues les entreprises ne déclarant aucun salarié ou employant moins de cinq salariés en 2013 ou en 2019.
Source : EUTL et ORBIS, calcul des auteurs.

Les effets « intra » et « entrées nettes » sont positifs et l'effet « réallocation » est négatif. Les méthodes de décomposition présentent une différence notable : avec la méthode MP, la composante « intra » (qui n'est pas pondérée) est sensiblement plus grande que celle des méthodes GR et FHK (qui est pondérée par la part de l'emploi). Par conséquent, l'intensité des émissions des entreprises de plus petite taille a davantage augmenté que celle des entreprises de plus grande taille. Par ailleurs, les termes de covariance de la méthode MP montrent que la taille est devenue de plus en plus corrélée à une moindre intensité d'émission. Cela corrobore la conclusion du tableau 4, selon laquelle les entreprises à installation unique ont obtenu de moins bons résultats en matière de réduction de l'intensité des émissions que celles ayant plusieurs installations.

3. Le potentiel inexploité de la réallocation de l'activité pour réduire les émissions de carbone

Dans la section précédente, nous avons estimé la contribution des améliorations au sein des entreprises pérennes (effet « intra »), de la réallocation (effet « inter » et de covariance) et des entrées nettes (différence entre l'effet « entrée » et l'effet « sortie ») à la réduction de l'intensité des émissions. Dans la présente section, nous nous concentrons spécifiquement sur le potentiel de la réallocation à stimuler les efforts de réduction futurs²¹. Et des efforts seront certainement nécessaires. En effet, la réduction de l'intensité des émissions de 3,2 % entre 2013 et 2019 (tableau 3) correspond à un rythme de réduction annuelle d'environ 0,5 %. Ce chiffre est largement inférieur au facteur de réduction linéaire (FRL)²² de 1,74 % par an fixé lors de la phase 3 du SEQUE-UE (2013-2020), encore plus éloigné du FRL de 2,2 % par an fixé pour

la phase 4 (2021-2030), et loin des dernières décisions de la Commission européenne portant le FRL à 4,3 % par an à partir de 2024. Par ailleurs, Pisani-Ferry & Mahfouz (2023) estiment que l'industrie française devra réduire ses émissions de 4,3 % par an pour atteindre ses objectifs à l'horizon 2030. Selon ces chiffres, la réduction de l'intensité des émissions industrielles devra se faire à un rythme beaucoup plus rapide si l'on veut atteindre les objectifs *sans* faire baisser la production industrielle de manière significative²³.

On a vu que la composante « intra » n'a pas contribué de manière significative à la réduction de l'intensité des émissions entre 2013 et 2019, contrairement aux attentes²⁴. Cela pourrait certainement changer à l'avenir, car de nombreux gouvernements font pression pour le développement et l'adoption de nouvelles technologies de décarbonation. La faiblesse de la composante intra s'explique par le fait que, dans de nombreux cas (par exemple l'hydrogène ou le captage du carbone), la technologie de décarbonation nécessaire n'est pas encore disponible à l'échelle industrielle et nécessiterait un large éventail de mesures de soutien (gouvernementales) pour continuer

21. Le potentiel de réallocation supplémentaire pourrait être limité, car il est possible que des mesures de rentabilité aient déjà été mises en œuvre. Les futures réductions des émissions pourraient nécessiter d'autres approches que la réallocation.

22. Le facteur de réduction linéaire (FRL) fait référence à la réduction annuelle du plafond sur les émissions totales au titre du SEQUE-UE.

23. Les objectifs de réduction du SEQUE-UE peuvent également être atteints par une production d'électricité plus décarbonée. Premièrement, la chute drastique des émissions de carbone provenant de la production d'électricité suggère que les mesures les plus faciles ont déjà été mises en œuvre. Deuxièmement, en France, sachant que l'intensité carbone de la production d'électricité est déjà faible, l'ampleur de la possible réduction de cette empreinte est limitée.

24. Cette conclusion rejoint celle de Probst et al. (2021), qui constatent que la croissance annuelle moyenne des technologies d'atténuation du changement climatique a considérablement ralenti entre 2013 et 2017, probablement en raison des prix des combustibles fossiles, du bas niveau des prix du carbone et de la maturité accrue de certaines technologies.

à se développer. Toutefois, des technologies capables de réduire sensiblement les émissions existent déjà et sont déjà utilisées, ce qui est rarement évoqué. La conception sous-jacente du SEQUE-UE suppose implicitement une grande hétérogénéité de l'efficacité carbone entre installations industrielles d'un même secteur, aux contours étroitement définis. En effet, en ce qui concerne l'allocation gratuite de quotas d'émissions, les installations industrielles couvertes par le SEQUE-UE sont subdivisées en 54 catégories²⁵ pour chacune desquelles un référentiel d'émission est défini. Ce référentiel se fonde sur les émissions moyennes des 10 % d'installations les plus performantes fabriquant le produit concerné dans l'UE. Il reconnaît donc qu'une grande partie des installations fabriquant un produit similaire n'utilisent pas la technologie la plus efficace en carbone existante. L'adoption généralisée de la technologie de référence dans chacune de ces 54 catégories conduirait donc déjà à une réduction significative des émissions.

De fait, nous observons une hétérogénéité significative de l'intensité des émissions non seulement au sein des industries à forte intensité carbone (tableau 1), mais aussi au sein des activités étroitement définies en vertu du SEQUE-UE (tableau 2)²⁶. Ce résultat n'est pas surprenant. Il ne diffère pas du fait stylisé que la dispersion de la productivité sectorielle est élevée (et croissante) dans les pays européens, peut-être en raison d'un lent déploiement de la technologie (Berlingieri *et al.*, 2020 ; CompNet, 2023). De plus, Capelle *et al.* (2023) constatent que l'hétérogénéité sectorielle de l'intensité des émissions au sein d'un pays donné est largement supérieure à l'hétérogénéité de la productivité totale des facteurs.

Malgré cette hétérogénéité significative, la réallocation de l'activité n'a réduit les émissions que de 4 % à 8 % (c'est-à-dire de 1 % à 1,5 % par an en moyenne) entre 2013 et 2019 (tableau 3). Sachant que la réallocation joue habituellement un rôle très important dans l'augmentation de la productivité (voir, par exemple, Ben Hassine, 2019, et CompNet, 2023), il n'y a aucune raison de penser que nous puissions parvenir à une amélioration de l'intensité des émissions de 4 % à 5 % par an sans qu'elle y contribue significativement. Cela pourrait résulter d'une réallocation à la fois au sein des industries et au sein des différents sous-segments de chaque industrie (à forte intensité carbone). Le premier cas de figure correspond à l'évolution des modes de consommation nécessaire pour atteindre la neutralité carbone (Pisani-Ferry & Mahfouz, 2023), où la consommation finale remplace les produits à forte intensité carbone par des

produits à plus faible intensité. Le deuxième correspond à un transfert de la production vers les fabricants d'un produit similaire présentant une plus faible intensité carbone.

La réallocation au sein d'un sous-segment d'une industrie à forte intensité carbone (voir les activités listées en annexe) engendre également un potentiel de réduction significatif fondé sur les technologies de production actuelles. Pour estimer ce potentiel, nous menons une expérience de pensée simple. Nous divisons notre échantillon d'entreprises en deux groupes : un premier comprenant les 80 % d'entreprises présentant la plus faible intensité carbone (i.e. la plus forte efficacité carbone) au sein d'une activité, et un second comprenant les 20 % d'entreprises présentant la plus forte intensité carbone (i.e. la plus faible efficacité carbone) au sein d'une activité. Nous appelons ce deuxième groupe les « zombies bruns ».

Notre expérience de pensée suppose maintenant que ces zombies bruns sont expulsés du marché et que leur production (mesurée dans cet exercice par la valeur ajoutée) est reprise par les entreprises restantes ayant la même activité. Ces zombies bruns représentent moins de 10 % de la valeur ajoutée de notre échantillon, mais plus de 40 % des émissions (voir tableau 6, ligne total). Le scénario de réallocation suppose que la production totale de chaque activité dans le cadre du SEQUE-UE reste constante et que la production des 20 % d'entreprises présentant la plus forte intensité d'émission (les zombies bruns) est désormais générée avec une intensité d'émission égale à celle des 80 % autres entreprises ayant la même activité. Le potentiel de réduction des émissions d'un tel exercice de réallocation est significatif : la production réallouée des entreprises les moins performantes serait désormais effectuée avec des émissions nettement inférieures. Nous estimons que les émissions globales chuteraient de près de 40 %, alors que la production totale devant être réallouée resterait modeste (voir tableau 6 pour le détail des résultats). Le risque de mise au rebut anticipée d'actifs reste donc limité²⁷. De plus,

25. 52 produits et 2 référentiels construits sur une approche dite « de repli » concernant la chaleur et les combustibles.

26. Les installations sont liées à une activité dans le Journal des transactions de l'Union européenne et non pas à l'une des 54 catégories utilisées pour le calcul des quotas gratuits. Il n'est donc pas possible de calculer l'hétérogénéité de l'intensité des émissions pour ces 54 catégories.

27. Outre la mise au rebut anticipée (aussi dénommée « échouage ») d'actifs physiques et de capitaux, il est également possible que la transition climatique conduise à la disparition de certains emplois. Alors que dans l'ensemble les effets négatifs de la réallocation du travail vers les activités vertes seraient maîtrisables (Vandeplas *et al.*, 2022), ils devraient néanmoins être hétérogènes selon les zones géographiques et les types de travailleurs (Bijnens *et al.*, 2022).

Capelle *et al.* (2023) ont montré que les zombies bruns (ou « retardataires climatiques », comme les auteurs les dénomment) exploitent des stocks de capital physique plus anciens, ce qui atténue davantage les effets de l'éventuelle mise au rebut prématurée d'actifs.

Le potentiel de réduction des émissions de carbone découlant de cet exercice de réallocation est-il réaliste ? Notre estimation dépend fortement, bien sûr, de l'écart entre l'intensité des émissions des 20 % d'entreprises les moins efficaces en carbone et des 80 % d'entreprises les plus efficaces en carbone au sein d'une même activité. Une part de ce potentiel de réduction pourrait découler du fait que certaines activités réglementées par le SEQUE-UE (voir tableau A1 en annexe) sont définies de manière large et incluent des entreprises fabriquant des produits très différents. Malgré une hétérogénéité indéniable des produits au sein d'une même activité, nous pensons que l'intensité des émissions pour la fabrication de produits similaires présente elle aussi une hétérogénéité importante²⁸. La conception du SEQUE-UE repose sur 52 technologies de référence pour les produits qu'il réglemente. Nos données nous permettent seulement de distinguer 26 activités dans notre échantillon, ce qui implique qu'en moyenne deux produits différents²⁹ sont fabriqués au sein d'une activité. D'une part, les résultats de notre expérience de pensée représentent donc une borne supérieure pour le potentiel de réduction des émissions découlant de la réallocation. D'autre part, la réallocation demeure limitée à 7 % de la production. Si toutes les entreprises étaient obligées d'exercer leur activité en utilisant la technologie de référence du SEQUE-UE, sur la base des 10 % d'entreprises les plus performantes en matière d'intensité d'émission, 90 % des entreprises seraient affectées. Nous montrons enfin dans l'encadré que des entreprises couvertes par le SEQUE-UE peuvent effectivement produire des produits similaires avec des intensités d'émission très différentes.

Qu'est-ce qui pourrait expliquer les écarts observés dans l'intensité des émissions, hormis la fabrication de produits différents ? Outre le recours à des technologies différentes, cela peut s'expliquer par le fait que certaines entreprises sont meilleures que d'autres (c'est-à-dire, dans notre contexte, qu'elles émettent moins de carbone) dans l'utilisation de technologies et de processus de production similaires. En outre, certaines entreprises ont peut-être déjà commencé à électrifier³⁰ (au moins en partie) leur processus de production. Ceci est susceptible de déplacer les émissions des entreprises

concernées couvertes par le SEQUE-UE vers les producteurs d'électricité (qui, s'ils sont situés dans l'UE, sont également couverts par le SEQUE-UE)³¹. Ce phénomène est souhaitable, car la production d'électricité est devenue moins intensive en carbone et la trajectoire du secteur de la production d'électricité vers la neutralité carbone est bien connue. En outre, plusieurs études³² soulignent qu'une taxe carbone ou des coûts d'émission ont une incidence significative sur les prix de gros de l'électricité. Ce mécanisme garantit que les entreprises paient également pour les émissions indirectes provenant de la production d'électricité. Un effet indésirable est ce que l'on appelle la « fuite de carbone » : il s'agit du cas où une entreprise transfère une production à forte intensité d'émissions vers d'autres pays où les contraintes en matière d'émissions sont moins strictes. Cela peut aller jusqu'à faire augmenter l'intensité totale des émissions de cette entreprise, alors que celle que nous mesurons diminue. Les études passées, toutefois, n'ont pas identifié de fuite de carbone significative (Verde, 2020).

Notre définition des zombies bruns, fondée sur l'intensité des émissions, reste arbitraire. Elle correspond à un scénario dans lequel la réallocation est déclenchée par une réglementation imposant un seuil maximal d'intensité des émissions par activité. Nous pouvons également définir les zombies bruns d'une manière plus proche de celle utilisée dans la littérature sur la productivité, fondée sur la situation financière

28. En outre, plusieurs auteurs sont parvenus à des conclusions similaires. Comme susmentionné, Vieira *et al.* (2021) ont constaté des différences significatives dans les résultats en matière de réduction des émissions de carbone entre les entreprises manufacturières exerçant les mêmes activités. Capelle *et al.* (2023) ont constaté une hétérogénéité significative de la performance environnementale au sein d'une même industrie et d'un même pays. En outre, il est bien documenté dans la littérature sur la productivité qu'il existe des écarts de productivité importants et persistants entre les producteurs, même au sein d'industries étroitement définies (par exemple Bartelsman & Doms, 2000 ; Syverson, 2004 ; plus récemment pour l'Europe Berlingieri *et al.*, 2020 ; et CompNet, 2023). Si les écarts de productivité entre entreprises similaires sont importants et persistants, il nous semble raisonnable de supposer que les écarts d'intensité des émissions entre entreprises similaires sont également importants et persistants.

29. La Commission européenne stipule que les référentiels se fondent sur le principe « un produit = un référentiel ». Cela signifie que la méthodologie ne varie pas en fonction de la technologie ou du combustible utilisé(e), de la taille d'une installation ou de sa situation géographique.

30. L'électrification désigne le remplacement des technologies ou processus utilisant des combustibles fossiles par des équivalents alimentés à l'électricité. L'électrification est une composante importante de la plupart des trajectoires vers la neutralité carbone, sinon de toutes. Par exemple, le scénario de neutralité de l'Agence internationale de l'énergie vise, à court terme, à augmenter la part de l'électricité dans la demande finale mondiale en énergie de l'industrie, d'environ 22 % (en 2022) à 30 % (en 2030).

31. À noter que l'externalisation des activités émettrices ne réduit pas seulement les émissions, mais aussi la valeur ajoutée. Dans la mesure où nous utilisons la valeur ajoutée comme dénominateur de l'intensité carbone, cela couvre partiellement l'effet de l'externalisation sur l'intensité des émissions.

32. Par exemple Fabra & Reguant (2014) pour l'Espagne, Hintermann (2016) pour l'Allemagne.

ENCADRÉ – Des produits similaires peuvent être fabriqués par des entreprises dont l'intensité d'émissions diffère

Nous donnons quelques exemples d'entreprises réglementées par le SEQUE-UE qui fabriquent des produits similaires, mais dont l'intensité d'émissions diffère. Nous nous intéressons à trois activités homogènes produisant des matières premières et dont la possibilité de différenciation par la qualité est limitée : la fabrication de laine minérale, la production ou le traitement de gypse ou de plaques de plâtre, et enfin la production de carbonate de soude et de bicarbonate de soude^(a).

Le tableau A présente l'intensité des émissions de deux entreprises exerçant chacune de ces activités, ainsi que leur valeur ajoutée et leur nombre de salariés. Sur la base des produits promus sur leur site Internet, ces entreprises offrent des gammes de produits similaires^(b). Pour éviter que les résultats ne soient influencés par la volatilité de la valeur ajoutée au cours d'une année donnée, nous prenons une moyenne sur la période 2013-2019. En guise de test de robustesse, nous calculons également l'intensité des émissions en fonction du nombre de salariés plutôt que de la valeur ajoutée déflatée. Les entreprises sont de taille comparable, mais présentent des intensités d'émission différentes, qu'on les calcule en fonction de la valeur ajoutée déflatée ou du nombre de salariés.

L'exercice de réallocation décrit précédemment (voir les détails dans le tableau 6) réduirait les émissions dans les activités de laine minérale (resp. de plaques de plâtre et de carbonate de soude) de 5 % (resp. 8 % et 15 %) pour la même production.

Tableau A – Comparaison de l'intensité des émissions de deux entreprises par ailleurs comparables exerçant la même activité

Entreprise	Pays	Intensité des émissions (valeur ajoutée)	Intensité des émissions (emploi)	Émissions	Valeur ajoutée (déflatée)	Valeur ajoutée (nominale)	Employés
Laine minérale 1	Hongrie	3 698	153	27 155	7	7	178
Laine minérale 2	France	1 874	117	13 556	7	7	116
Plaques de plâtre 1	Autriche	915	102	21 826	24	24	213
Plaques de plâtre 2	Pologne	2 163	136	31 206	14	15	230
Carbonate de soude 1	Allemagne	3 795	520	159 563	42	42	307
Carbonate de soude 2	Bulgarie	6 094	1 461	693 036	114	110	474

^(a) La production de carbonate de soude est la première étape du processus de production du bicarbonate de soude, les deux éléments étant donc toujours produits ensemble.

^(b) Les noms de ces entreprises peuvent être fournis sur demande.

Note : valeur ajoutée en millions d'euros (déflatée selon les prix de 2015), émissions en tCO₂-eq, intensité des émissions (valeur ajoutée) en tCO₂-eq par million d'euros de valeur ajoutée, intensité des émissions (emploi) en tCO₂-eq par salarié. Tous les chiffres sont des moyennes sur la période 2013-2019.

Source : EUTL et ORBIS, calcul des auteurs.

d'une entreprise³³. Nous avons donc effectué une expérience de pensée similaire avec des zombies bruns définis cette fois comme étant les entreprises dont les flux de trésorerie³⁴ auraient été négatifs en 2019 si toutes les émissions avaient dû être payées à hauteur de 100 euros la tonne de CO₂³⁵. Cela correspond à un scénario dans lequel la réallocation est déclenchée uniquement par des politiques liées au marché, sachant qu'une trajectoire optimale vers la neutralité carbone combine probablement des politiques liées et non liées au marché (Acemoglu *et al.*, 2016 ; Anderson *et al.*, 2021).

Dans cette nouvelle expérience de pensée, réaliser la production des zombies bruns avec la même intensité d'émissions que les entreprises non zombies engendrerait une réduction des émissions de 55 % (voir l'Annexe en ligne, tableau S3, pour les résultats détaillés). Ce chiffre

très élevé tient principalement à l'absence de quotas gratuits dans cet exercice. En 2019, 70 % à 80 % des émissions des entreprises de notre échantillon étaient couvertes par des quotas d'émission gratuits. Dans cette expérience de pensée, les zombies bruns représentent environ 20 % de la valeur ajoutée et 70 % des émissions. Cette réallocation induite par le marché offre un potentiel de réduction des émissions supérieur, mais implique la réallocation d'une plus grande part de la valeur ajoutée.

33. Adelat McGowan *et al.* (2018) utilisent le ratio de couverture des intérêts pour définir les entreprises zombies. D'autres définitions existent, par exemple les entreprises dont la valeur ajoutée est négative ou dont le résultat net est négatif.

34. Nous utilisons le résultat avant intérêts, impôts et amortissements (EBITDA) pour définir les flux de trésorerie.

35. À noter que cette définition s'entend toutes choses égales par ailleurs, car elle ne tient pas compte des éventuelles réponses endogènes de l'entreprise, comme la répercussion de la hausse des coûts d'émission sur les prix, ou des efforts d'atténuation des émissions, etc.

Tableau 6 – Exercice de réallocation des émissions des « zombies bruns »

	Les 80 % des entreprises présentant la moins forte intensité d'émissions				Les 20 % des entreprises présentant la plus forte intensité d'émissions – « zombies bruns »				Réduction des émissions ⁽¹⁾	
	Nombre d'entreprises	Valeur ajoutée	Émissions	Intensité	Nombre d'entreprises	Valeur ajoutée	Émissions	Intensité	Volume	% du total
Combustion	621	165 062	17 760 229	108	159	4 449	27 136 280	6 099	26 657 580	59
Raffinage	40	24 166	56 603 202	2 342	10	1 148	23 755 133	20 693	21 066 212	26
Coke	4	57	1 377 279	24 163	1	1	49 870	49 870	25 707	2
Minerais métalliques	10	899	2 420 491	2 692	2	749	5 775 289	7 711	3 758 662	46
Fer ou acier	83	5 211	8 299 130	1 593	21	5 076	74 718 476	14 720	66 634 348	80
Métaux ferreux	89	7 381	3 112 029	422	22	1 009	7 291 526	7 226	6 866 105	66
Aluminium primaire	9	1 686	3 865 509	2 293	2	123	1 047 211	8 514	765 208	16
Aluminium secondaire	13	712	730 186	1 026	3	56	159 716	2 852	102 286	11
Métaux non ferreux	43	3 981	1 945 098	489	10	304	2 407 031	7 918	2 258 498	52
Clinker de ciment	64	4 957	69 913 969	14 104	16	367	15 243 223	41 535	10 067 022	12
Chaux	52	1 441	14 975 566	10 392	13	46	2 059 478	44 771	1 581 424	9
Verre	137	6 894	10 357 700	1 502	35	853	3 985 795	4 673	2 704 229	19
Céramiques	278	5 356	7 888 791	1 473	71	291	2 058 235	7 073	1 629 624	16
Laine minérale	30	1 143	1 616 682	1 414	7	37	138 774	3 751	86 440	5
Gypse ou plaques de plâtre	20	1 100	1 020 474	928	4	76	169 498	2 230	98 993	8
Pâte	88	7 335	4 254 649	580	22	342	1 307 165	3 822	1 108 789	20
Papier ou carton	192	8 184	9 069 570	1 108	49	966	4 300 574	4 452	3 230 046	24
Noir de carbone	7	1 085	1 503 299	1 386	1	2	94 671	47 336	91 900	6
Acide nitrique	7	542	1 627 898	3 004	1	1	22 488	22 488	19 484	1
Acide adipique	1	35	95 214	2 720	0					
Ammoniaque	8	749	10 146 416	13 547	1	16	694 956	43 435	478 210	4
Produits chimiques en vrac	83	7 383	10 192 048	1 380	21	2 320	15 245 741	6 571	12 043 039	47
Hydrogène	11	1 507	2 405 103	1 596	2	58	1 846 508	31 836	1 753 943	41
Carbonate de soude	4	200	1 378 128	6 891	1	95	1 008 094	10 612	353 483	15
Autres	8	335	769 002	2 296	2	32	301 929	9 435	228 472	21
Pétrole et gaz	81	13 230	11 714 743	885	20	665	8 103 617	12 186	7 514 781	38
Total	1 983	270 631	255 042 405	942	496 20 %	19 082 6,6 % ⁽²⁾	198 921 278 43,8 % ⁽²⁾	10 425	171 124 485	38 %

⁽¹⁾ Réduction estimée des émissions (en tCO₂-eq et en % des émissions totales) si les 20 % des entreprises présentant la plus forte intensité d'émission génèrent la même production, mais avec l'intensité moyenne d'émissions des 80 % des entreprises présentant la moins forte intensité.

⁽²⁾ Part de la valeur ajoutée (ou des émissions) des 20 % des entreprises présentant la plus forte intensité d'émissions dans la valeur ajoutée (ou dans les émissions) de toutes les entreprises.

Note : chiffres de 2019. Valeur ajoutée en millions d'euros, émissions en tCO₂-eq, intensité des émissions en tCO₂-eq par million d'euros de valeur ajoutée.

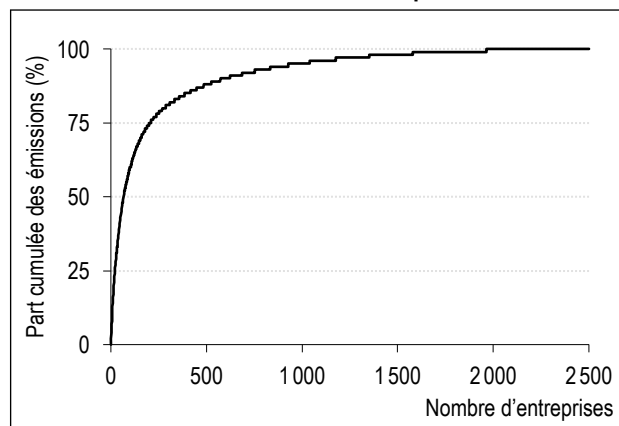
Lecture : une réallocation de l'activité des 20 % des entreprises présentant la plus forte intensité d'émissions (« zombies bruns ») vers les 80 % des entreprises présentant la moins forte intensité pourrait réduire les émissions de 38 %. Cette réallocation concerne 6,6 % de la production.

Source : EUTL et ORBIS, calcul des auteurs.

Nous avons présenté deux stratégies possibles de réallocation reflétant des mesures politiques à l'échelle de l'UE applicables à toutes les entreprises industrielles. Une autre stratégie serait de donner la priorité aux initiatives de décarbonation des principales entreprises émettrices de carbone. Ce qui frappe dans nos données est

la concentration importante des émissions dans un sous-ensemble relativement restreint d'entreprises (figure II). Plus précisément, seulement 100 entreprises (i.e. 4 %) représentent environ 60 % des émissions totales. Ces entreprises sont en outre concentrées dans une poignée de secteurs industriels, les deux tiers d'entre elles

Figure II – Part cumulée des émissions des entreprises de l'échantillon de 2019



Note : émissions cumulées des 2 479 entreprises de l'échantillon de 2019 décrit à la section 1. L'axe horizontal classe les entreprises du volume d'émissions le plus élevé jusqu'au moins élevé et l'axe vertical représente la part de leurs émissions cumulées dans les émissions totales.
Source : EUTL, calcul des auteurs.

œuvrant dans le raffinage, le fer et l'acier, et le ciment. Le potentiel de réduction des émissions en ciblant ces 100 entreprises est important. Bien qu'elles soient responsables de 60 % des émissions, elles ne contribuent qu'à 14 % de la production totale de notre échantillon. La réalisation de niveaux d'émission équivalents à ceux des 2 379 autres entreprises pourrait engendrer une réduction de 38 % des émissions. Des informations plus détaillées sont fournies au tableau S4 de l'Annexe en ligne.

* *
*

Sur la base de données relatives aux émissions de CO₂ des entreprises du SEQE-UE, nous constatons que, contrairement au secteur de l'électricité, l'industrie manufacturière n'a pas réduit ses émissions de manière significative au cours de la dernière décennie. La pensée dominante part du principe que, si la trajectoire des émissions futures du secteur de la production d'électricité est claire, celle du secteur manufacturier est incertaine pour ce qui est des technologies à adopter et de leur potentiel réel de réduction des émissions de carbone. Cette pensée risque d'engendrer une approche « attentiste ». Toutefois, au cours de la prochaine décennie, si l'on veut atteindre l'ambitieux objectif *Fit for 55* de l'UE, il faudra non seulement que le secteur de l'électricité continue à se décarboner, mais aussi que l'industrie manufacturière réduise considérablement et rapidement son empreinte carbone.

Bien que l'innovation et l'amélioration de l'efficacité carbone au sein des entreprises existantes soient cruciales pour la neutralité carbone à

long terme, nous proposons que les objectifs de réduction des émissions à moyen terme puissent également être atteints en réallouant l'activité économique. Cette approche consiste à réorienter la production depuis les entreprises les moins efficaces en matière d'émissions (zombies bruns) vers les plus efficaces. Une réallocation, comparée au processus souvent long de développement et d'adoption de nouvelles technologies, pourrait être un outil alternatif de réduction des émissions à court terme. Toutefois, le débat actuel sur la décarbonation industrielle tend à donner la priorité à la recherche et à l'adoption de nouvelles technologies, de sorte qu'il ignore peut-être les avantages significatifs et plus immédiats d'une pleine exploitation des technologies efficaces existantes fondée sur une réallocation de la production industrielle.

Notre analyse montre qu'il existe une hétérogénéité importante des intensités d'émission au sein des industries manufacturières, un sous-groupe d'entreprises contribuant de manière disproportionnée aux émissions totales du secteur. Nous estimons qu'une réallocation de la production entre entreprises pourrait réduire les émissions de carbone de manière significative, jusqu'à 38 % dans certains cas, sans faire appel à de nouvelles technologies. Cette conclusion suppose que l'hétérogénéité observée au sein d'activités étroitement définies est largement attribuable à des différences dans les technologies ou les processus de production plutôt qu'à des distinctions entre les produits. Cette hypothèse, bien qu'elle puisse ne pas s'appliquer entièrement à toutes les activités industrielles examinées, permet d'estimer une borne supérieure à la réduction des émissions due à une éventuelle réallocation des ressources.

Suivant nos résultats, lorsqu'ils conçoivent des plans de réduction des émissions, outre le verdissement des entreprises industrielles existantes, les décideurs politiques devraient envisager

aussi davantage la possibilité que certaines d'entre elles réduisent leur production ou sortent du marché au profit de concurrents dont l'efficacité carbone est supérieure. □

Lien vers l'annexe en ligne :

www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/8302695/ES544_Bijnens-Swartenbroekx_Annexe-en-ligne.pdf

BIBLIOGRAPHIE

Acemoglu, D., Akcigit, U., Hanley, D. & Kerr, W. (2016). Transition to Clean Technology. *Journal of Political Economy*, 124(1), 52–104. <https://doi.org/10.1086/684511>

Adalet McGowan, M., Andrews, D. & Millot, V. (2018). The walking dead? Zombie firms and productivity performance in OECD countries. *Economic Policy*, 33(96), 685–736. <https://doi.org/10.1093/epolic/eiy012>

Anderson, B., Cammeraat, E., Dechezleprêtre, A., Dressler, L., Gonne, N., Lalanne, G., Guilhoto, J. M. & Theodoropoulos, K. (2021). Policies for a climate-neutral industry: Lessons from the Netherlands. *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers* N° 108. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/a3a1f953-en>

Baily, M. N., Hulten, C., Campbell, D., Bresnahan, T. & Caves, R. E. (1992). Productivity Dynamics in Manufacturing Plants. *Brookings Papers on Economic Activity: Microeconomics*, 1992, 187–267. <https://doi.org/10.2307/2534764>

Bartelsman, E. J. & Doms, M. (2000). Understanding Productivity: Lessons from Longitudinal Microdata. *Journal of Economic Literature*, 38(3), 569–594. <https://doi.org/10.1257/jel.38.3.569>

Ben Hassine, H. (2019). Productivity Growth and Resource Reallocation in France: The Process of Creative Destruction. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 507-508, 115–133. <https://doi.org/10.24187/ecostat.2019.507d.1979>

Berlingieri, G., Calligaris, S., Criscuolo, C. & Verlhac, R. (2020). Laggard firms, technology diffusion and its structural and policy determinants. *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers* N° 86. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/23074957>

Bijnens, G., Konings, J. & Vanormelingen, S. (2022). The impact of electricity prices on European manufacturing jobs. *Applied Economics*, 54(1), 38–56. <https://doi.org/10.1080/00036846.2021.1951647>

Bijnens, G. & Swartenbroekx, C. (2022). Carbon emissions and the untapped potential of activity reallocation: lessons from the EU ETS. *National Bank of Belgium Economic Review*, 1–28. <https://www.nbb.be/en/articles/carbon-emissions-and-untapped-potential-activity-reallocation-lessons-eu-ets>

Capelle, M. D., Kirti, M. D., Pierri, M. N. & Bauer, M. G. V. (2023). Mitigating Climate Change at the Firm Level: Mind the Laggards. *IMF Working Paper* N° 2023/242. Washington, DC: International Monetary Fund. <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2023/11/22/Mitigating-Climate-Change-at-the-Firm-Level-Mind-the-Laggards-541713>

CompNet (2023). *Firm Productivity Report, The Competitiveness Research Network*. https://www.comp-net.org/fileadmin/_compnet/user_upload/CompNet_Productivity_Report_July_2023.pdf

Fabra, N. & Reguant, M. (2014). Pass-Through of Emissions Costs in Electricity Markets. *American Economic Review*, 104(9), 2872–2899. <https://doi.org/10.1257/aer.104.9.2872>

Foster, L., Haltiwanger, J. C. & Krizan, C. J. (2001). Aggregate Productivity Growth: Lessons from Microeconomic Evidence. In: *New Developments in Productivity Analysis*, pp. 303–372. University of Chicago Press. <http://www.nber.org/chapters/c10129>

Gal, P. N. (2013). Measuring total factor productivity at the firm level using OECD-ORBIS. OECD Economics Department *Working Papers* N° 1049. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/18151973>

- Gamberoni, E., Giordano, C. & Lopez-Garcia, P. (2016).** Capital and Labour (Mis)Allocation in the Euro Area: Some Stylized Facts and Determinants. *Bank of Italy Occasional Paper* N° 349. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2910362>
- Griliches, Z. & Regev, H. (1995).** Firm Productivity in Israeli Industry 1979–1988. *Journal of Econometrics*, 65(1), 175–203. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(94\)01601-U](https://doi.org/10.1016/0304-4076(94)01601-U)
- Hintermann, B. (2016).** Pass-through of CO2 emission costs to hourly electricity prices in Germany. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 3(4), 857–891. <https://doi.org/10.1086/688486>
- Kaya, Y. & Yokobori, K. (1997).** *Environment, Energy and Economy: Strategies for Sustainability*. Vol. 4. Tokyo: United Nations University Press.
- Koch, N. & Themann, M. (2022).** Catching up and falling behind: Cross-country evidence on the impact of the EU ETS on firm productivity. *Resource and Energy Economics*, 69, 101315. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2022.101315>
- Marcu, A., Alberola, E., Caneill, J. F., Olsen, J., Schleicher, S. & Vangenechten, D. (2021).** *2021 State of the EU ETS Report*. European Roundtable on Climate Change and Sustainable Transition. <https://ercst.org/2021-state-of-the-eu-ets-report/>
- Marcu, A., López Hernández, J. F., Alberola, E., Faure, A., Qin, B., O'Neill, M., Schleicher, S., Caneill, J. Y., Bonfiglio, E. & Vollmer, A. (2022).** *2022 State of the EU ETS Report*. European Roundtable on Climate Change and Sustainable Transition. <https://ercst.org/state-of-the-eu-ets-report-2022/>
- Melitz, M. J. & Polanec, S. (2015).** Dynamic Olley–Pakes productivity decomposition with entry and exit. *The Rand Journal of Economics*, 46(2), 362–375. <https://doi.org/10.1111/1756-2171.12088>
- Olley, G. S. & Pakes, A. (1996).** The Dynamics of Productivity in the Telecommunications Equipment Industry. *Econometrica*, 64(6), 1263. <https://doi.org/10.2307/2171831>
- Pak, M., Pionnier, P.-A. & Schwellnus, C. (2019).** Labour Share Developments in OECD Countries Over the Past Two Decades. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 510-511-512, 17–34. <https://doi.org/10.24187/ecostat.2019.510t.1992>
- Pisani-Ferry, J. & Mahfouz, S. (2023).** *The Economic Implications of Climate Action*. A Report to the French Prime Minister, France Stratégie. <https://www.strategie.gouv.fr/english-articles/economic-implications-climate-action>
- Probst, B., Touboul, S., Glachant, M. & Dechezleprêtre, A. (2021).** Global trends in the invention and diffusion of climate change mitigation technologies. *Nature Energy*, 6(11), 1077–1086. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00931-5>
- Syverson, C. (2004).** Market Structure and Productivity: A Concrete Example. *Journal of Political Economy*, 112(6), 1181–1222. <https://doi.org/10.1086/424743>
- Vandeplas, A., Vanyolos, I., Vigani, M. & Vogel, L. (2022).** The possible implications of the green transition for the EU labour market. European Commission, *Discussion Paper* N° 176. <https://doi.org/10.2765/583043>
- Verde, S. F. (2020).** The impact of the EU emissions trading system on competitiveness and carbon leakage: The econometric evidence. *Journal of Economic Surveys*, 34(2), 320–343. <https://doi.org/10.1111/joes.12356>
- Vieira, L. C., Longo, M. & Mura, M. (2021).** Are the European manufacturing and energy sectors on track for achieving net-zero emissions in 2050? An empirical analysis. *Energy Policy*, 156, 112464. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112464>

Tableau A1 – Activités réglementées dans le cadre du SEQUE-UE

Description de l'activité	Dénomination abrégée
Activités d'exploitant d'aéronef	Aéronef
Combustion de combustibles	Combustion
Raffinage d'huile minérale	Raffinage
Production de coke	Coke
Calcination ou frittage de minerais métalliques	Minerais métalliques
Production de fonte brute ou d'acier	Fer ou acier
Production ou traitement de métaux ferreux	Métaux ferreux
Production d'aluminium primaire	Aluminium primaire
Production d'aluminium secondaire	Aluminium secondaire
Production ou traitement de métaux non ferreux	Métaux non ferreux
Production de clinker de ciment	Clinker de ciment
Production de chaux ou calcination de dolomite/magnésite	Chaux
Fabrication de verre	Verre
Fabrication de céramiques	Céramiques
Fabrication de laine minérale	Laine minérale
Production ou traitement de gypse ou de plaques de plâtre	Gypse ou plaques de plâtre
Production de pâte	Pâte
Production de papier ou de carton	Papier ou carton
Production de noir de carbone	Noir de carbone
Production d'acide nitrique	Acide nitrique
Production d'acide adipique	Acide adipique
Production de glyoxal et d'acide glyoxylique	Glyoxal
Production d'ammoniaque	Ammoniaque
Production de produits chimiques en vrac	Produits chimiques en vrac
Production d'hydrogène et de gaz de synthèse	Hydrogène
Production de carbonate de soude et de bicarbonate de soude	Carbonate de soude
Captage de gaz à effet de serre au titre de la directive 2009/31/CE	Captage de GES
Transport de gaz à effet de serre au titre de la directive 2009/31/CE	Transport de GES
Stockage de gaz à effet de serre au titre de la directive 2009/31/CE	Stockage de GES
Autre activité faisant l'objet d'un consentement explicite conformément à l'article 24 de la directive 2003/87/CE	Autres

Source : EUTL.

COMMENTAIRE

Le défi du siècle et la science économique

The Challenge of the Century and Economics

Aude Pommeret*

Résumé – Les travaux des économistes du climat, sur le coût social du carbone notamment, se multiplient et les recherches académiques récentes sont reprises et déclinées par les administrations. En France, par exemple, la commission Quinet sur la valeur du carbone, la commission Criqui sur les coûts sectoriels des réductions d'émissions ou la commission Pisani-Ferry et Mahfouz sur l'évaluation du coût de la transition, ont été mises en place en vue d'une utilisation pour la politique publique. Mais l'intérêt pour le défi du siècle semble s'arrêter à la science économique dont les préconisations restent finalement peu appliquées. Les articles proposés dans ce numéro s'ils contribuent à la recherche académique, aident aussi à la prise en compte des coûts climatiques dans les politiques publiques et proposent des solutions pour que la transition énergétique se passe au mieux.

Abstract – *The work of climate economists, on the social cost of carbon in particular, is expanding and recent academic research is being taken on board and used by government bodies. In France, for example, the Quinet Commission on the value of carbon, the Criqui Commission on the sectoral costs of cutting emissions and the Pisani-Ferry and Mahfouz Commission on the assessment of the cost of the transition were set up for use in public policy. However, interest in the challenge of the century seems to stop at economics, the recommendations from which are ultimately rarely applied. While contributing to academic research, the articles contained in this issue also contribute to ensuring that climate costs are taken into account in public policies and propose solutions to help the energy transition is achieved in the best way possible.*

JEL : H23, H43, Q54

Mots-clés : changement climatique, coûts d'abattement, prix du carbone, politique environnementale

Keywords: climate change, abatement costs, price of carbon, environmental policy

* IREGE-USMB et France Stratégie. Correspondance : aude.pommeret@univ-smb.fr

Les jugements et opinions exprimés par les auteurs n'engagent qu'eux-mêmes, et non les institutions auxquelles ils appartiennent, ni a fortiori l'Insee.

Citation: Pommeret, A. (2024). The Challenge of the Century and Economics. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 544, 45–54.
doi: 10.24187/ecostat.2024.544.2123

Si l'économie de l'environnement n'est pas une thématique reconnue à l'aune de son importance (Timbeau, 2024), force est de constater qu'il s'agit non seulement d'une sous-discipline, considérée comme une application parmi d'autres entrant dans le cadre de l'économie publique, mais aussi d'une thématique présentant une nature interdisciplinaire, ce qui ne simplifie pas la tâche des économistes qui s'y intéressent. Par exemple, pour modéliser convenablement la dynamique du réchauffement climatique, ou prendre en compte la criticité des matériaux qui entrent dans la construction des panneaux solaires, des éoliennes ou des batteries nécessaires à la transition énergétique, ou encore évaluer le coût de la rénovation thermique des bâtiments, il leur faut travailler en étroite collaboration avec des climatologues, des géologues ou des thermodynamiciens... Si une telle collaboration est déjà en soi un challenge, aboutir à des publications interdisciplinaires reconnues par la profession académique en est un autre.

Pour autant, les économistes se sont intéressés depuis plusieurs décennies aux ressources naturelles, développant des concepts qui peuvent aujourd'hui être mobilisés par les économistes du climat. Par ailleurs, ces derniers multiplient actuellement leurs travaux, notamment pour mesurer le coût social de la « plus grande et plus vaste défaillance du marché jamais observée » (Stern, 2006) et un large consensus se dégage parmi les économistes en faveur de la tarification du carbone, par le biais d'une taxe sur les émissions de dioxyde de carbone (CO₂)¹ ou d'un système de quotas d'émission, comme étant la meilleure – voire la seule – politique climatique. Ainsi, l'Association européenne des économistes de l'environnement et des ressources a-t-elle publié en 2021 une déclaration sur la tarification du carbone².

Mais en fait, il semble que la tarification du carbone ne soit populaire que parmi les économistes. En France, dans un contexte de réduction du déficit public, il n'y a pas de soutien fort à la transition énergétique, et les gilets jaunes ont sonné le glas de la contribution climat-énergie (nom donné à la taxe sur les émissions de carbone instaurée en 2014 en France), bloquée à 44,6 € la tonne de CO₂ depuis lors. Les problèmes actuels de dette publique empêchant le financement des subventions pour soutenir la transition énergétique et les normes, qu'il s'agisse des zones à faibles émissions ou des normes agricoles, ayant prouvé leur impopularité, on peut peut-être espérer un retour sur le devant de la scène du prix du carbone, mais par

la petite porte. Le prix du carbone a davantage eu, ces dernières années, le vent en poupe au niveau européen, avec des initiatives telles que le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières ou l'EU-ETS³. Cependant, la transition écologique ou énergétique n'a pas été un sujet phare lors de l'élection européenne de 2024 et on ne peut qu'espérer le maintien des politiques qui ont été envisagées.

Le problème est donc peut-être moins du côté du manque de travaux des économistes que de celui de leur utilisation pour la politique publique. L'intérêt pour le défi du siècle semble s'arrêter à la science économique dont les préconisations restent derrière une barrière et ne se retrouvent pas appliquées. Les articles proposés dans ce numéro cherchent bien à lever cette barrière. Ils contribuent à la recherche académique, mais ils aident aussi à la prise en compte des coûts climatiques dans les politiques publiques et proposent des solutions pour que la transition énergétique se passe au mieux.

Des avancées dans la recherche sur les coûts climatiques

Donner une valeur au carbone peut concrètement renvoyer à plusieurs logiques. La première consiste à adopter une approche coûts-bénéfices qui vise à déterminer le coût social du carbone, c'est-à-dire celui qui permet d'adopter la trajectoire socialement optimale d'émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau mondial, en égalisant à tout instant le coût marginal d'abattement, c'est-à-dire le coût de réduire les émissions de GES d'une tonne, et la somme actualisée des dommages marginaux futurs d'une tonne de GES émise aujourd'hui. Cette approche n'est pas aisée à décliner sous forme de politique publique, d'une part rien n'assurant que la trajectoire de réduction d'émissions impliquée par le coût social du carbone soit compatible avec les objectifs internationaux, européens et nationaux que se fixent les pays.

1. Le changement climatique provient des émissions de gaz à effet de serre (GES), dont le CO₂. On peut cependant convertir tous les GES, en fonction de leur effet sur la température globale pour un horizon temporel donné, en équivalent CO₂ (CO₂e), que l'on désigne souvent par abus de langage simplement CO₂. Dans ce commentaire, on utilisera en général indifféremment GES ou CO₂.

2. Voir <https://www.eaere.org/statement/>

3. Le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) vise à taxer les émissions liées aux produits importés à un niveau équivalent à celui qui est appliqué aux produits nationaux soumis à une tarification carbone, avec pour objectif premier de lutter contre les fuites de carbone. L'EU-ETS2 est un nouveau système d'échange de quotas d'émission au niveau européen, qui a été créé pour couvrir les émissions provenant des bâtiments, du transport routier et d'autres secteurs ; il sera opérationnel en 2027. L'EU-ETS dans sa forme actuelle couvre les émissions des secteurs de la production d'électricité et de chaleur, de la fabrication industrielle et de l'aviation, qui représentent environ 40 % des émissions totales de GES dans l'UE.

D'autre part, cette approche pose des problèmes méthodologiques de complexité de calcul. En particulier, les valeurs obtenues par la recherche académique ne sont pas encore stabilisées, même si cette recherche est extrêmement active.

Le coût social du carbone est un bon exemple de sujet sur lequel la recherche en économie du climat est particulièrement foisonnante... et interdisciplinaire. En effet, les travaux ont tout d'abord cherché à améliorer la modélisation de la dynamique du système climatique terrestre (Otto *et al.*, 2013 ; Dietz *et al.*, 2021b ; Ricke *et al.*, 2018 ; Hänsel *et al.*, 2020). Jusqu'ici, les principaux modèles économiques avaient largement surestimé le délai entre les émissions de carbone et le réchauffement, et ignoré la saturation des réservoirs naturels absorbant le carbone (réservoirs dits puits de carbone) qui se produit lorsque la concentration atmosphérique de CO₂ augmente. En raison de cette saturation, l'effet marginal des émissions cumulées sur le réchauffement est constant. En supposant que les dommages soient une fonction convexe du réchauffement, cela implique que le prix optimal du carbone augmente plus rapidement que la production globale.

Par ailleurs, la prise en compte des incertitudes qui affectent la fonction de dommages a été significativement améliorée. En premier lieu, des points de bascule (*tipping points*) et les incertitudes associées aux dommages ont été intégrés à la modélisation (Nordhaus, 2019 ; Lemoine & Traeger, 2016b ; Cai *et al.*, 2015 ; Dietz *et al.*, 2021a) et l'incertitude elle-même a fait l'objet d'une modélisation plus fine, grâce à la prise en compte de l'ambiguïté et de l'apprentissage de nouvelles informations (Rudik, 2020 ; Lemoine & Traeger, 2014 et 2016a ; Berger *et al.*, 2017 ; Lemoine & Rudik, 2017). Enfin, des fonctions d'utilité plus complexes et la prise en compte de la distribution des dommages ont permis d'une part de distinguer les préférences en matière de risque et de temps (Cai & Lontzek, 2019 ; Crost & Traeger, 2014 ; Daniel *et al.*, 2019), avec notamment une fonction d'utilité à la Epstein-Zin, et d'autre part d'intégrer l'aversion pour l'inégalité (Ricke *et al.*, 2018 ; Moore & Diaz, 2015 ; Dietz & Stern, 2015 ; Moyer *et al.*, 2014).

Des progrès ont aussi été réalisés dans la prise en compte des conséquences du changement climatique sur l'économie. Dans certaines modélisations, il est désormais supposé que le taux de croissance de l'économie (via la productivité des investissements ou la dépréciation du capital) – et non plus seulement le niveau de

la production – est affecté par les dommages climatiques (Ricke *et al.*, 2018 ; Dietz & Stern, 2015, Moyer *et al.*, 2014).

Le calibrage des dommages climatiques agrégés a été amélioré grâce à l'utilisation de données économiques et scientifiques récentes (Ricke *et al.*, 2018 ; Rudik, 2020 ; Moore & Diaz, 2015). Enfin, des avancées ont été réalisées en matière de prise en compte des dommages climatiques causés aux biens non marchands, tels que les systèmes naturels ou le patrimoine culturel, qui sont imparfaitement substituables aux biens échangés sur le marché (Stern & Persson, 2008 ; Bastien-Olvera & Moore, 2021 ; Weitzman, 2010 ; Drupp & Hänsel, 2021).

Ces avancées ont conduit à des estimations plus élevées du coût social du carbone avec fréquemment des valeurs supérieures à 100 \$ la tonne de CO₂. Tol (2023) et Moore *et al.* (2024) réalisent des méta-analyses sur plusieurs milliers d'estimations du coût social du carbone. Tol (2023) montre qu'au cours des dix dernières années, les estimations du coût social du carbone sont passées de 9 \$/tCO₂ à 40 \$/tCO₂ pour un taux d'actualisation élevé et de 122 \$/tCO₂ à 525 \$/tCO₂ pour un taux d'actualisation faible. Moore *et al.* (2024) obtiennent une moyenne tronquée (i.e. en excluant les 0,1 % supérieurs et inférieurs de la distribution) de 132 \$/tCO₂ avec une queue de distribution épaisse à droite. Mais surtout, la fourchette des estimations est large et l'est restée au fil des ans, voire s'est élargie.

Pour pallier l'appréhension encore imparfaite des dommages climatiques, une seconde démarche, alternative à l'approche coûts-bénéfices, consiste à partir d'un objectif d'émissions ou de concentration de GES, puis à déterminer la trajectoire de valeurs du carbone pour atteindre cet objectif au moindre coût. Cette démarche, dite coût-efficacité, permet de s'affranchir d'un exercice de valorisation et d'actualisation des dommages, dans la mesure où la courbe de dommage marginal est remplacée par une cible d'émissions. Sa pertinence repose d'une part sur la légitimité de cette cible et d'autre part sur une bonne appréciation des coûts marginaux d'abattement liés notamment au portefeuille de technologies disponibles et prévisibles. L'approche coût-efficacité a fait l'objet de travaux académiques en Europe surtout, initiés par Michel Moreaux⁴.

4. Voir par exemple Chakravorty *et al.* (2005) ou van der Ploeg (2021).

Des évaluations conduites par les administrations

Les travaux académiques récents sont repris et déclinés par les administrations en vue d'une utilisation pour la politique publique, par exemple par l'EPA (*Environmental Protection Agency*) aux États-Unis (sur la base de l'approche coûts-bénéfices), le *Green Book* au Royaume-Uni ou France Stratégie en France. En France, il existe une valeur tutélaire du carbone⁵, élaborée en 2008 puis mise à jour en 2019 sous le nom de « valeur de l'action pour le climat »⁶ (VAC, commissions Quinet) et fondée sur une approche coût-efficacité, une mesure des coûts d'abattement (commission Criqui) par grands secteurs émetteurs de carbone et une évaluation du coût de la transition (commission Pisani-Ferry et Mahfouz).

La valeur de l'action pour le climat

La VAC de la commission Quinet 2019⁷, qui relève de l'approche coût-efficacité, consiste à fixer une trajectoire de prix fictif du carbone déclenchant des changements technologiques ou de comportements compatibles avec le respect d'une trajectoire d'émissions de gaz fixée au niveau politique visant zéro émission nette en 2050. La pertinence de cette approche repose sur une bonne appréciation des coûts marginaux d'abattement, c'est-à-dire des coûts de réduction des émissions de CO₂ liés notamment au portefeuille de technologies disponibles et prévisibles. Les impacts négatifs du CO₂ sont implicitement pris en compte par la cible visée mais les dommages climatiques ne sont pas explicitement intégrés.

La commission Quinet de 2019 s'est appuyée sur une démarche globale intégrant, au-delà des développements théoriques et empiriques disponibles, des travaux originaux de modélisation et une analyse prospective des technologies de décarbonation disponibles à partir de la définition d'une trajectoire d'émissions. La commission a pris en compte une trajectoire lissée de réduction des émissions, avec un point intermédiaire en 2030 (-43 % d'émissions brutes par rapport aux émissions de 1990, voir figure I) cohérente avec le Plan pour le climat de juillet 2017 et aboutissant à zéro émission nette (ZEN) en 2050. Les émissions considérées concernent l'ensemble des gaz à effet de serre (traduits en équivalent CO₂) et correspondent à l'ensemble des émissions ayant lieu sur le territoire français nettes des puits de carbone disponibles sur le territoire national. L'objectif porte sur l'ensemble des secteurs, sans intégrer ex ante d'objectifs sectoriels, puisqu'une tonne de carbone (émise ou évitée) est la même, quel que soit le secteur d'origine.

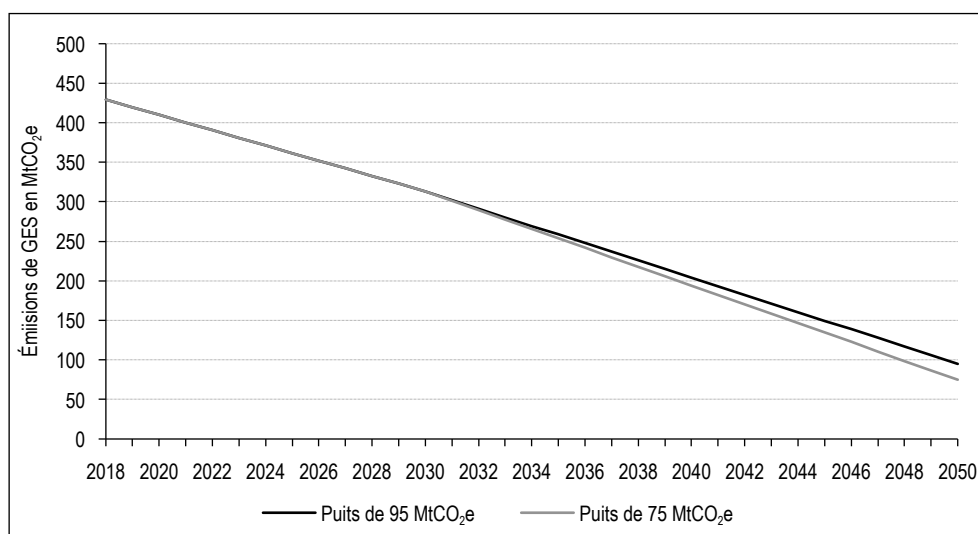
Des exercices de simulation et de prospective ont été réalisés à l'aide de modèles macroéconomiques d'une part et technico-économiques d'autre part qui permettent de déterminer la trajectoire temporelle de la valeur du carbone

5. La valorisation des actions de lutte contre le changement climatique a été historiquement élaborée, sous l'appellation de valeur tutélaire, pour l'évaluation socioéconomique des investissements publics. Mais cette évaluation a ensuite été élargie à l'ensemble des actions possibles, pour fixer les bonnes priorités, encourager les actions utiles et les séquencer dans le temps.

6. L'actualisation 2024 est en cours.

7. Voir aussi Quinet (2019b).

Figure I – Trajectoire cible de flux d'émissions de GES



Source : Quinet (2019a).

permettant de suivre un chemin de réduction des émissions cohérent avec l'objectif ZEN français. Les modèles macroéconomiques intègrent une hausse du prix relatif des options carbonées et montrent comment les différents secteurs s'adaptent à cette hausse de prix relatifs, investissent et se décarbonent. Les modèles technico-économiques utilisent quant à eux une description fine des technologies pour évaluer le coût de déploiement des technologies nécessaires à la décarbonation mais sont moins riches en mécanismes économiques. Les simulations initiales ont été complétées par des exercices de prospective technologique ou technico-économique⁸, permettant d'apprécier les coûts des différentes technologies de décarbonation – et donc les prix du carbone qui déclenchent l'abandon des solutions carbonées au profit des solutions décarbonées. Enfin, la trajectoire obtenue a fait l'objet d'échanges avec des parties prenantes constituées de chercheurs, d'économistes, de représentants des organisations syndicales et patronales, de certaines fédérations professionnelles et de représentants des administrations concernées, afin de juger de sa pertinence et des conditions de sa mise en œuvre. L'arbitrage entre une VAC présentant un saut initial mais une pente modérée et une VAC lissée au départ mais avec une pente initialement forte a en particulier fait l'objet de débats. La pente de la trajectoire est un paramètre aussi important que la valeur moyenne, car toute hypothèse de croissance de la VAC implique un taux d'échange entre une

tonne de GES économisée aujourd'hui et une tonne de GES économisée dans un an qui mesure les efforts que l'on souhaite consentir pour un effort précoce.

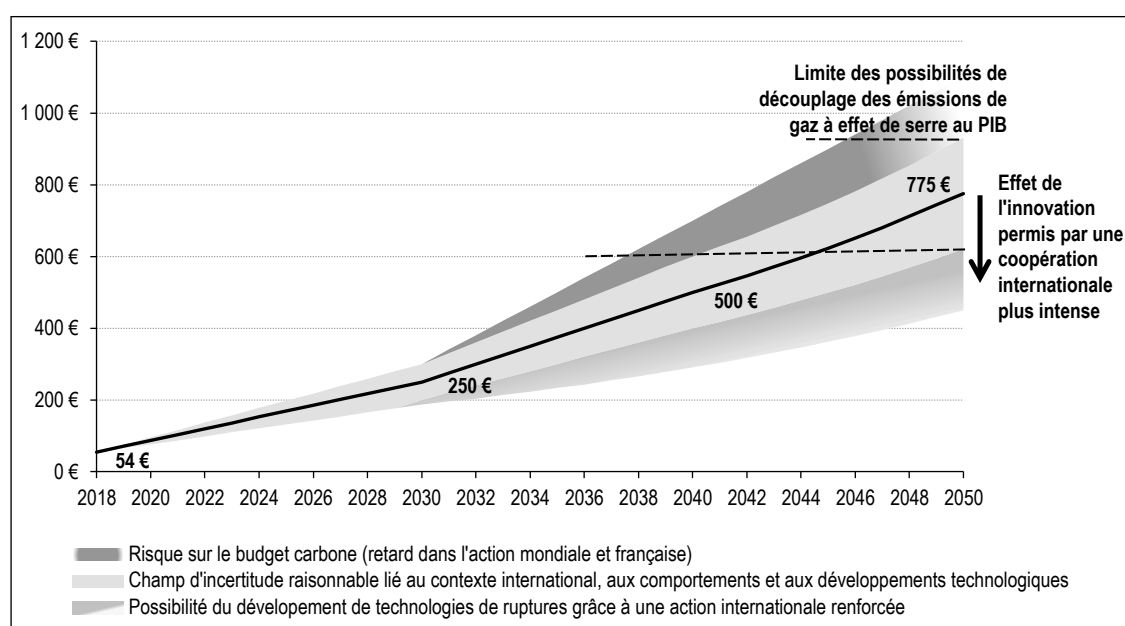
Sur la base des travaux de modélisation réalisés, la commission a proposé, en partant de 54 € en 2018⁹, de retenir une valeur cible de l'action pour le climat de 250 €₂₀₁₈ en 2030 (voir figure II) : compte tenu de l'évolution des objectifs et des techniques, ainsi que du retard pris par rapport à la trajectoire souhaitable de nos émissions, la trajectoire définie par la commission Quinet (2019a) conduit donc à réviser nettement à la hausse la valeur tutélaire cible, puisque la cible fixée en 2009 pour 2030 était de 100 €. Au-delà des années 2030, la valeur proposée s'aligne progressivement sur une règle de croissance au taux d'actualisation socioéconomique¹⁰. Elle est à l'horizon 2050 en ligne avec les coûts prévisibles des technologies permettant la récupération du CO₂ dans l'air – soit une fourchette prudente de 600 à 900 €₂₀₁₈/tonne de CO₂e. Sur la figure II, les faisceaux grisés rendent compte des incertitudes, croissantes au fur et à mesure que l'horizon considéré s'allonge au-delà de

8. Tels que ceux conduits au niveau mondial par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) ou au niveau français dans le cadre de la préparation de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC).

9. Valeur effective de la tarification spécifique du carbone à cette date, compte tenu de l'inflation.

10. C'est la règle de Hotelling, c'est-à-dire la règle de bonne gestion d'une ressource épuisable dans un cadre théorique (le budget carbone correspondant alors au stock de ressource épuisable) dont la valeur a vocation à croître au rythme du taux d'actualisation socioéconomique.

Figure II – La valeur de l'action pour le climat



2030. Davantage de coopération internationale, permettant d'accélérer la production et la diffusion d'innovations, et rendant possibles des technologies de rupture à moindre coût, permettrait d'atteindre les mêmes objectifs avec une VAC plus faible. Au contraire, la plus faible disponibilité des matériaux critiques nécessaires aux investissements ou infrastructures à construire pour la transition énergétique (panneaux solaires, éoliennes, batteries), ou une dégradation du puits de carbone forestier renchériraient les coûts des technologies et impliqueraient une VAC plus élevée.

La VAC est actuellement sujette à une nouvelle révision afin de prendre en compte les modifications d'objectif et de contexte qui ont eu lieu depuis 2019. Il s'agit essentiellement d'une définition plus précise et plus ambitieuse des objectifs, au niveau européen notamment (-55 % d'émissions à l'horizon 2030 par rapport à 1990), des changements technologiques, et de la prise en compte de l'évolution défavorable du puits de carbone forestier (le puits de carbone forestier en France s'est réduit de moitié au cours des dix dernières années à cause de la mortalité exceptionnelle des écosystèmes forestiers et de l'augmentation des prélèvements). Par ailleurs, les travaux de la commission Cricqui sur les coûts d'abattement sectoriels et qui utilisent la VAC ont permis de prendre la mesure des difficultés pratiques que pose une VAC qui ne croît pas au taux d'actualisation socioéconomique sur toute la période¹¹, ce qui ne garantit pas la neutralité intertemporelle des efforts.

Les coûts d'abattement sectoriels

Comme le recommandait le rapport 2019 de la commission Quinet sur la Valeur de l'Action pour le Climat, une commission sur les coûts d'abattement des émissions de GES a été mise en place en septembre 2019, afin d'identifier les principales options stratégiques, secteur par secteur, et d'en mesurer les coûts socioéconomiques. Cette commission, présidée par Patrick Cricqui, a élaboré une méthodologie de calcul des coûts d'abattement et réalisé des estimations pour cinq secteurs stratégiques. Ces derniers ont été choisis en raison de leur importance dans les émissions de GES françaises, ou de leur importance dans la décarbonation du système énergétique : transports, système électrique, production d'hydrogène, logement et industrie (voir figure III). Ces travaux qui adoptent une perspective socioéconomique pour la France contribuent à une meilleure identification des déterminants des coûts d'abattement dans ces différents secteurs et permettent, dans une

perspective de planification, de hiérarchiser les actions à différents horizons de temps sur la trajectoire de neutralité carbone.

Les travaux de la commission Cricqui ont conduit à identifier certaines questions spécifiques à l'évaluation des coûts d'abattement. Tout d'abord, son articulation avec la VAC est cruciale. En effet, c'est la comparaison (moins triviale qu'il y paraît, voir le chapitre « Méthodologie » du rapport de la commission) des coûts d'abattement avec la VAC qui permet de conclure à la pertinence ou non de l'adoption d'une technologie. Ensuite, l'évaluation des coûts d'abattement est complexe et entourée d'incertitudes, d'une part car il est nécessaire de prendre en compte l'évolution des coûts et performances des différentes options ou technologies sans omettre la dimension endogène du progrès technique, notamment à travers les « effets d'apprentissage ». D'autre part, l'abattement est réalisé grâce à la réalisation d'investissements caractérisés par des phénomènes d'inertie, d'effets dynamiques et d'interdépendances. Il est de ce fait souvent nécessaire d'entreprendre des actions coûteuses afin de débloquer l'accès à des potentiels moins coûteux. Ainsi en va-t-il par exemple des investissements en infrastructures de transport (par exemple les pistes cyclables), nécessaires au déclenchement des transferts modaux (de la voiture au vélo), ce qui conduira alors à raisonner en termes d'investissement non-marginal : le classement de ces actions isolées par ordre de mérite, à la « MAC curve McKinsey », qui répond en apparence au souci d'efficacité, perd donc sa pertinence. Parfois, il n'est même pas possible de construire le calcul sur la base de la comparaison de deux technologies isolées : si l'on considère la décarbonation complète du système électrique avec une pénétration très importante des énergies renouvelables dont la génération d'électricité est variable dans le temps (elle dépend notamment de la météo), il faut bien prendre en compte les « coûts système » liés à la nécessité d'assurer en permanence l'adéquation entre offre et demande d'électricité. Enfin, l'approche socioéconomique implique de prendre en compte les coûts et avantages externes, dont la quantification est difficile puisqu'ils échappent à la valorisation sur un marché. Les tentatives d'évaluation réalisées jusqu'à présent suggèrent que si ces coûts peuvent très élevés, ils sont marqués de fortes incertitudes.

11. Voir le chapitre « Méthodologie » du rapport de la commission Cricqui.

La figure III représente les coûts d'abattement résultant du déploiement de certaines technologies, phares pour les secteurs étudiés. Ils sont calculés pour une date précise potentiellement différente par technologie et selon une méthodologie assez complexe qui permet de les comparer directement à la VAC de Quinet (2019a) de cette date. Cette comparaison permet donc de déduire, conditionnellement à la trajectoire de VAC de Quinet (2019a), si chacune de ces technologies est souhaitable d'un point de vue socioéconomique. La commission Cricui obtient qu'à l'horizon 2030, les coûts d'abattement sont de l'ordre de 150 €/tCO₂ à 250 €/tCO₂ pour les principales options dans les secteurs de consommation finale de l'énergie ou pour la décarbonation de l'hydrogène utilisé comme matière première. Comme la trajectoire de VAC de Quinet (2019a) atteint 250 €/tCO₂ en 2030, ce graphique montre que la mise en œuvre des options étudiées, bien qu'elle soit coûteuse, est donc souhaitable du point de vue de la collectivité.

Les coûts macroéconomiques de la transition énergétique

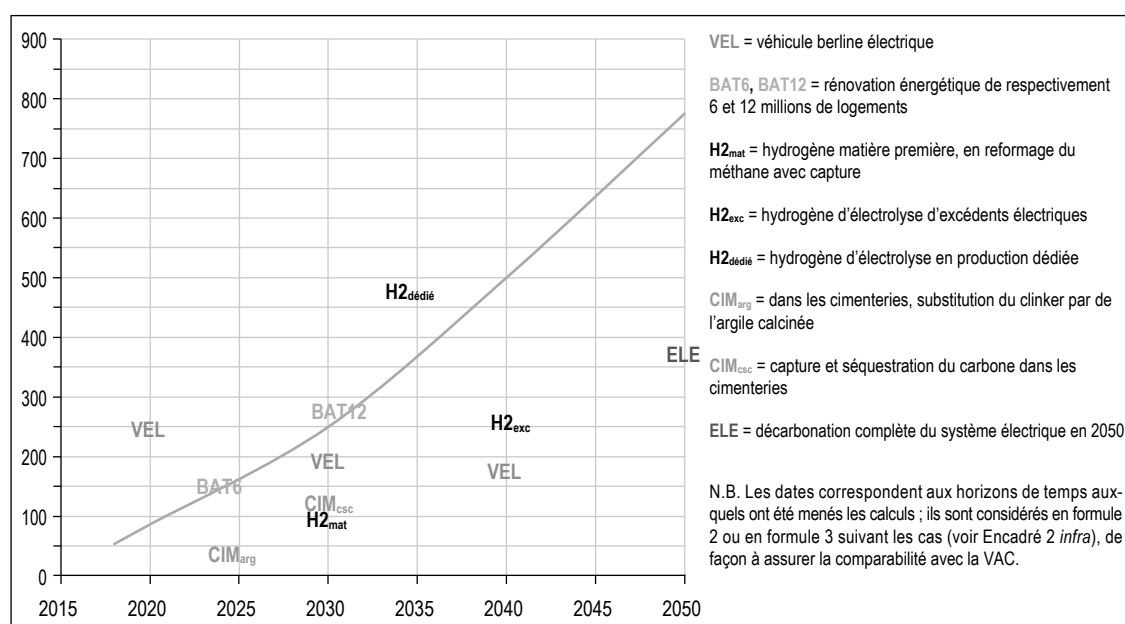
Une fois dressée la feuille de route des investissements nécessaires à la transition, se pose les questions du coût de ces investissements, de leur vitesse de réalisation, et de la prise en charge de leur coût. En France, le rapport Pisani-Ferry et Mahfouz met en évidence que la transition climatique est une grande transformation, analogue

par son ampleur aux révolutions industrielles du passé, que le retard pris et le nouveau contexte géopolitique imposent de conduire à un rythme accéléré (Pisani-Ferry & Mahfouz, 2023).

Cette transition va reposer sur trois mécanismes principaux. Tout d'abord, la substitution de capital à des combustibles fossiles va impliquer pour la France une augmentation substantielle des investissements, nécessaires à l'atteinte des objectifs de la précédente Stratégie nationale bas-carbone (SNBC 2), d'environ 70 milliards d'euros 2021 par an (2,5 points de PIB) jusqu'en 2030. La moitié environ devrait être assumée par les dépenses publiques, le reste étant à la charge du secteur privé. L'essentiel des technologies appelées à être mises en œuvre d'ici 2030 est d'ores et déjà disponible. Ensuite, le progrès technique va être réorienté de façon accélérée à la fois vers les alternatives aux énergies fossiles et vers l'amélioration de l'efficacité énergétique. Un rôle non négligeable est accordé à la sobriété énergétique : d'après ce rapport, le vecteur principal à l'horizon 2030 sera très certainement la substitution de capital aux énergies fossiles, mais la sobriété pourrait contribuer à la baisse des émissions pour une part comprise entre 12 % et 17 %.

Rien n'assure, cependant, que la trajectoire d'émissions retenue garantisse de réaliser la transition au coût minimal. Et c'est bien ce que remettent en question les deux articles de ce numéro.

Figure III – VAC et coûts d'abattement (en €/tCO₂)



Source : commission Cricui.

De la recherche au service des politiques publiques

L'article de Riyad Abbas, Nicolas Carnot, Matthieu Lequien, Alain Quartier-la-Tente et Sébastien Roux étudie l'impact sur les coûts de la transition de la trajectoire de réduction d'émissions adoptée (Abbas *et al.*, 2024). Sans remettre en question l'approche coût-efficacité, il s'interroge sur l'interprétation, en termes de modélisation, à donner à l'objectif Zéro Émission Nette en 2050 de façon à respecter l'Accord de Paris, mais aussi à minimiser les coûts de la transition. Les évaluations des administrations françaises se fondent sur la Stratégie française sur l'énergie et le climat (SFEC), qui propose un chemin de décarbonation et revient donc à s'imposer des contraintes supplémentaires. L'article étudie les conséquences de ces contraintes sur la vitesse de mise au rebut du capital brun et l'investissement en capital vert. Dans le modèle simple proposé, ces deux formes de capital peuvent avoir des productivités différentes et sont imparfaitement substituables. L'investissement est irréversible dans le sens où transformer du capital brun en vert ou en consommation est impossible, mais du capital brun peut être mis au rebut, ou « échoué », selon le vocabulaire consacré. Leur modèle permet d'examiner la façon dont les investissements, brun et vert, et les stocks de capital évoluent dans le temps, en fonction du type et de la sévérité de la contrainte propre à chaque scénario de décarbonation. Le calibrage se fait au niveau français : en particulier, une estimation stylisée de la part du capital brun dans le capital productif est proposée, sur la base des comptes nationaux et des chroniques d'investissements climat d'I4CE (2022). Les différents scénarios étudiés, plus ou moins contraints, permettent d'aboutir aux conclusions suivantes. Sans surprise, c'est dans le scénario le moins contraint (une fois éliminé le scénario ZEN seul, qui n'a pas grand sens au regard de l'Accord de Paris), c'est-à-dire avec une gestion intertemporelle du budget carbone, que la mise au rebut du capital brun et l'investissement vert s'engagent rapidement, ce qui limite le coût de la transition.

Se pose alors la question d'un autre type de coût : celui de l'acceptation de la transition énergétique. S'il est trop élevé, il peut purement et simplement empêcher cette transition. Or, cet article montre que l'introduction de contraintes ponctuelles engendre des mises au rebut brutales, de nature à compliquer l'acceptation de la transition. On peut donc interpréter les résultats comme un plaidoyer pour une gestion

« en budget carbone » de la transition. La règle de Hotelling qui en résulte permet de surcroît de s'affranchir d'une éventuelle incohérence entre le taux de croissance entre la VAC et le taux d'actualisation (voir plus haut). Enfin rien n'empêche néanmoins de s'imposer une trajectoire annuelle compatible avec une gestion intertemporelle du budget carbone. Elle permettrait notamment de vérifier annuellement les progrès effectivement réalisés au regard de ceux qui étaient attendus, voire de comptabiliser une dette climatique, indicateur pratique et convaincant, en ces temps de restrictions budgétaires.

L'article de Gert Bijnens et Carine Swartenbroekx étudie aussi la problématique du chemin de transition en s'intéressant aussi à la mise au rebut du capital brun : les auteurs cherchent à mesurer l'ampleur de la réduction des émissions de CO₂ si la production était réaffectée des entreprises les plus polluantes d'un secteur aux entreprises les moins polluantes du même secteur (Bijnens & Swartenbroekx, 2024). En filigrane, on retrouve bien l'idée d'un prix du carbone, puisque leurs entreprises « zombies bruns » pourraient être définies comme des entreprises qui ne seraient plus concurrentielles si la valeur du carbone leur était imposée sous forme de taxe (ou de permis d'émission). Cette notion de « zombies bruns » peut donc être rapprochée des prix internes du carbone utilisés par certaines entreprises pour vérifier leur soutenabilité en anticipation de futures politiques climatiques contraignantes : si leur résultat net reste positif une fois ajouté à leurs coûts celui de leurs émissions de carbone valorisées à leur prix interne (c'est-à-dire défini par les entreprises elles-mêmes, mais le coût social du carbone ou la VAC sont de bonnes pistes) c'est que leur modèle économique résisterait à une politique environnementale dont le niveau de contrainte correspondrait à ce prix interne.

Les auteurs obtiennent qu'une réorientation limitée au sein d'un secteur vers les entreprises les moins émettrices et au détriment des entreprises les plus émettrices pourrait entraîner une réduction de 38 % des émissions européennes. Comme ceux de l'article précédent, les auteurs insistent sur l'attention à apporter à la mise au rebut du capital et recommandent de ne pas uniquement se focaliser sur l'investissement vert. Surtout, cet article est un véritable plaidoyer pour la mise en place d'un prix du carbone plutôt que de subventions à l'investissement vert : ce prix ferait spontanément disparaître les « zombies bruns » de l'économie, au profit des entreprises moins polluantes des mêmes secteurs.

* *
*

Tandis que la recherche en science économique se consacre largement à l'évaluation du coût climatique, et dans une moindre mesure, à celle des coûts d'abattement par exemple en intégrant les matériaux critiques et leur recyclage dans les infrastructures d'énergie renouvelable (voir Pommeret *et al.*, 2022), les administrations construisent des prix du carbone, évaluent les coûts d'abattement et mesurent les conséquences macroéconomiques de la transition. Et ensuite ? Les articles de ce numéro essaient d'aller plus loin, en soulevant la barrière entre préconisations et politiques effectives, et en s'approchant davantage de recommandations pratiques concernant le chemin de décarbonation de l'économie.

Les deux articles ne s'intéressent pas explicitement au prix du carbone – peu plébiscité par l'opinion publique – mais plutôt aux investissements verts et à la mise au rebut du capital brun et obtiennent des conclusions similaires : il faut mettre au rebut le capital brun au plus vite. Si l'efficacité économique de cette recommandation est indubitable, on voit mal comment elle pourrait être mieux acceptée, sous forme de réglementation par exemple, qu'un prix du carbone (qui pourrait lui-même conduire à l'échouage optimal).

Sans doute les disciplines avec lesquelles l'économie de l'environnement entretient des liens devraient-elles se déplacer des sciences dures vers des sciences sociales : sciences politiques, sociologie ou psychologie seraient sans doute mieux à même de soulever la barrière et d'éviter que l'intérêt pour le défi du siècle ne s'arrête à la science économique. □

BIBLIOGRAPHIE

Articles du dossier

Abbas, R., Carnot, N., Lequien, M., Quartier-la-Tente, A. & Roux, S. (2024). On the Way to Net Zero. But Which Way? *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 544, 3–26 (ce numéro).

Bijnens, G. & Swartenbroekx, C. (2024). Hunting “Brown Zombies” to Reduce Industry’s Carbon Emissions. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 544, 27–44 (ce numéro).

Autres références

Bastien-Olvera, B. A. & Moore, F. C. (2021). Use and non-use value of nature and the social cost of carbon. *Nature Sustainability*, 4(2), 101–108. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00615-0>

Berger, L., Emmerling, J. & Tavoni, M. (2017). Managing catastrophic climate risks under model uncertainty aversion. *Management Science*, 63(3), 749–765. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2015.2365>

Cai, Y. & Lontzek, T. S. (2019). The Social Cost of Carbon with Economic and Climate Risks. *Journal of Political Economy*, 127(6), 2684–2734. <https://doi.org/10.1086/701890>

Cai, Y., Judd, K. L., Lenton, T. M., Lontzek, T. S. & Narita, D. (2015). Environmental tipping points significantly affect the cost-benefit assessment of climate policies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(15), 4606–4611. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503890112>

Chakravorty, U., Magné, B. & Moreaux, M. (2005). A Hotelling model with a ceiling on the stock of pollution. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 30(12), 2875–2904. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2005.09.008>

Crost, B. & Traeger, C. P. (2014). Optimal CO₂ mitigation under damage risk valuation. *Nature Climate Change*, 4(7), 631–636. <https://doi.org/10.1038/nclimate2249>

Daniel, K. D., Litterman, R. B. & Wagner, G. (2019). Declining CO₂ price paths. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(42), 20886–20891. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817444116>

Dietz, S., Rising, J., Stoerk, T. & Wagner, G. (2021a). Economic impacts of tipping points in the climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(34). <https://doi.org/10.1073/pnas.2103081118>

Dietz, S. & Stern, N. (2015). Endogenous Growth, Convexity of Damage and Climate Risk: How Nordhaus’ Framework Supports Deep Cuts in Carbon Emissions. *The Economic Journal*, 125(583), 574–620. <https://doi.org/10.1111/eoj.12188>

Dietz, S., van der Ploeg, F., Rezai, A. & Venmans, F. (2021b). Are Economists Getting Climate Dynamics Right and Does It Matter? *Journal of The Association of Environmental and Resource Economists*, 8(5), 895–921. <https://doi.org/10.1086/713977>

- Drupp, M. A. & Hänsel, M. C. (2021).** Relative Prices and Climate Policy : How the Scarcity of Non-Market Goods Drives Policy Evaluation. *American Economic Journal: Economic Policy*, 13, 168–201. <https://doi.org/10.1257/pol.20180760>
- Hänsel, M. C., Drupp, M. A., Johansson, D. J. A., Nesje, F., Azar, C., Freeman, M. C., Groom, B. & Sterner, T. (2020).** Climate economics support for the UN climate targets. *Nature Climate Change*, 10(8), 781–789. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0833-x>
- I4CE (2022).** *Panorama des financements climat*. Édition 2022. https://www.i4ce.org/wp-content/uploads/2022/10/Panorama-des-financements-climat-edition-2022_au-16-12-22.pdf
- Lemoine, D. & Traeger, C. (2014).** Watch Your Step: Optimal Policy in a Tipping Climate. *American Economic Journal Economic Policy*, 6(1), 137–166. <https://doi.org/10.1257/pol.6.1.137>
- Lemoine, D. & Traeger, C. P. (2016a).** Ambiguous Tipping Points. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 132, 5–18. <http://doi.org/10.1016/j.jebo.2016.03.009>
- Lemoine, D. & Traeger, C. P. (2016b).** Economics of tipping the climate dominoes. *Nature Climate Change*, 6(5), 514–519. <https://doi.org/10.1038/nclimate2902>
- Lemoine, D. & Rudik, I. (2017).** Managing Climate Change Under Uncertainty: Recursive Integrated Assessment at an Inflection Point. *Annual Review of Resource Economics*, 9(1), 117–142. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100516-053516>
- Moore, F. C. & Diaz, D. B. (2015).** Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. *Nature Climate Change*, 5(2), 127–131. <https://doi.org/10.1038/nclimate2481>
- Moore, F., Drupp, M., Rising, J., Dietz, S., Rudik, I. & Wagner, G. (2024).** Synthesis of Evidence Yields High Social Cost of Carbon Due to Structural Model Variation and Uncertainties. NBER, *Working Paper* 32544. <https://doi.org/10.3386/w32544>
- Moyer, E. J., Woolley, M. D., Matteson, N. J., Glotter, M. J. & Weisbach, D. A. (2014).** Climate Impacts on Economic Growth as Drivers of Uncertainty in the Social Cost of Carbon. *The Journal of Legal Studies*, 43(2), 401–425. <https://doi.org/10.1086/678140>
- Nordhaus, W. (2019).** Economics of the disintegration of the Greenland ice sheet. *Proceedings of The National Academy of Sciences*, 116(25), 12261–12269. <https://doi.org/10.1073/pnas.1814990116>
- Otto, A., Todd, B. J., Bowerman, N., Frame, D. J. & Allen, M. R. (2013).** Climate system properties determining the social cost of carbon. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024032. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024032>
- Pisani-Ferry, J. & Mahfouz, S. (2023).** Les incidences macroéconomiques de l'action pour le climat. France Stratégie. Rapport, mai 2023. <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/2023-incidences-economiques-rapport-pisani-5juin.pdf>
- Pommeret, A., Ricci, F. & Schubert, K. (2021).** Critical Raw Materials for the Energy Transition. *European Economic Review*, 141, 103991. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2021.103991>
- Quinet, A. (2019a).** La valeur de l'action pour le climat - Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques. France Stratégie. Rapport. https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2019-rapport-la-valeur-de-laction-pour-le-climat_0.pdf
- Quinet, A. (2019b).** What Value Do We Attach to Climate Action? *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 510-511-512, 165–179. <https://doi.org/10.24187/ecostat.2019.510t.1995>
- Ricke, K., Drouet, L., Caldeira, K. & Tavoni, M. (2018).** Country-level social cost of carbon. *Nature Climate Change*, 8(10), 895–900. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0282-y>
- Rudik, I. (2020).** Optimal Climate Policy When Damages are Unknown. *American Economic Journal Economic Policy*, 12(2), 340–373. <https://doi.org/10.1257/pol.20160541>
- Stern, N. (2006).** *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sterner, T. & Persson, U. M. (2008).** An Even Sterner Review: Introducing Relative Prices into the Discounting Debate. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(1), 61–76. <https://doi.org/10.1093/reep/rem024>
- Timbeau, X. (2024).** The Lack of Interest in Economics for the Challenge of the Century. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 543, 65–74. <https://doi.org/10.24187/ecostat.2024.543.2119>
- Tol, R. S. J. (2023).** Social cost of carbon estimates have increased over time. *Nature Climate Change*, 13, 532–536. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01680-x>
- van der Ploeg, F. (2021).** Carbon Pricing Under Uncertainty. *International Tax and Public Finance*, 28(5), 1122–1142. <https://doi.org/10.1007/s10797-021-09686-x>
- Weitzman, M. L. (2010).** What Is The” Damages Function” For Global Warming—And What Difference Might It Make? *Climate Change Economics*, 1, 57–69. <https://doi.org/10.1142/s2010007810000042>

Difficultés de recrutement anticipées par les entreprises : quels facteurs explicatifs en France ?

Recruitment Difficulties Anticipated by Companies: What Are the Explanatory Factors in France?

Thomas Bézy*, Catherine Bruneau**, Cédric Crofils***,
Étienne Lavenant**** et Dimitris Mavridis*****

Résumé – Cet article analyse les difficultés anticipées par les entreprises en France lorsqu'elles envisagent de recruter. En croisant les données des enquêtes Besoins en main-d'œuvre de 2018 et 2019 avec les données d'entreprise FARE et DADS, nous étudions comment les difficultés de recrutement se déclinent selon le secteur, la localisation et la taille de l'établissement et selon les caractéristiques du bassin d'emploi. L'ensemble de ces caractéristiques explique environ 6 % de la variance totale observée des difficultés de recrutement anticipées et jusqu'à 14 % si l'on y ajoute les difficultés de recrutement éventuellement anticipées l'année précédente. L'essentiel des difficultés anticipées résulte ainsi de facteurs non observés dans les données utilisées dans cet article, en lien potentiellement avec les caractéristiques internes propres à chaque établissement, comme la qualité du management et les spécificités des processus de recrutement.

Abstract – This article examines the difficulties anticipated by companies in France when it comes to recruiting staff. We match data from the 2018 and 2019 Besoins en Main-d'Œuvre surveys on workforce needs with company data from the FARE annual structural statistics of companies from the ESANE scheme and the DADS (Déclaration annuelle de données sociales – Annual Declaration of Social Data) to examine how recruitment difficulties are distributed by sector, location and size of the establishment and employment area characteristics. Together, these factors explain around 6% of the total variation in recruitment challenges, increasing to 14% when incorporating recruitment difficulties reported in the previous year. Most of the recruitment difficulties anticipated thus result from factors not observed in the data used in this article, potentially linked to the internal characteristics of each establishment, such as the quality of management and specific recruitment processes.

JEL: C01, J23, J63

Mots-clés : difficultés de recrutement, données d'entreprises, Probit

Keywords: recruitment difficulties, company data, Probit

* École d'Économie de Paris ; ** Université Paris 1 Panthéon Sorbonne ; *** Université Paris Dauphine PSL (LEDa) et AMSE ; **** Banque de France ; ***** OCDE. Correspondance : thomas.bezy@psemail.eu

Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'élaboration du document de travail « Comment expliquer les difficultés de recrutement anticipées par les entreprises » de France Stratégie. Au moment de la rédaction de cet article, chaque auteur.e était affilié.e à France Stratégie. Nous remercions Vincent Aussilloux, Haithem Ben Hassine, Hélène Garner et Antoine Naboulet pour leur aide et leurs commentaires et Thomas Vroylandt et Frédéric Lainé pour la mise à disposition des données BMO par le biais du Centre d'Accès Sécurisé aux Données (CASD).

Reçu en décembre 2021, accepté en décembre 2023.

Les jugements et opinions exprimés par les auteurs n'engagent qu'eux-mêmes, et non les institutions auxquelles ils appartiennent, ni a fortiori l'Insee.

Citation: Bézy, T., Bruneau, C., Crofils, C., Lavenant, É. & Mavridis, D. (2024). Recruitment Difficulties Anticipated by Companies: What Are the Explanatory Factors in France? *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 544, 55–73. doi: 10.24187/ecostat.2024.544.2124

Les difficultés auxquelles les entreprises font face lorsqu'elles envisagent de recruter révèlent les frictions dans le fonctionnement du marché du travail. Ces difficultés réduisent l'efficacité de l'allocation du travail. Même si la plupart des offres d'emploi sont pourvues (seulement 5 % des offres ont été abandonnées à Pôle emploi pour faute de candidat qualifié sur la dernière décennie selon Gaumont, 2020), les difficultés de recrutement entraînent des coûts supplémentaires et allongent les délais (Lhommeau & Rémy, 2019). Selon l'Insee, en juillet 2022, 67 % des entreprises industrielles déclaraient avoir des difficultés de recrutement, un niveau inégalé depuis 1991 (Insee, 2022). Identifier les facteurs qui sont à l'origine de ces difficultés est donc essentiel pour pouvoir orienter les interventions publiques et tenter de fluidifier le marché du travail.

Cette étude a pour but de déterminer les principaux facteurs à l'origine des difficultés de recrutement en se concentrant sur les caractéristiques des établissements et de leur environnement économique et géographique. Les données exploitées, issues de l'enquête Besoins en Main-d'Œuvre (BMO) de Pôle emploi (France Travail depuis le 1/1/2024), décrivent les difficultés anticipées par les recruteurs pour l'année à venir. Étudier les anticipations plutôt que les difficultés effectivement rencontrées est intéressant à plusieurs titres. Tout d'abord, les frictions, même anticipées et non vécues, peuvent avoir des conséquences concrètes sur l'activité des entreprises concernées. En effet, un recruteur qui anticipe des difficultés pourrait réduire le nombre de ses recrutements ou bien les repousser dans le temps (Lhommeau & Rémy, 2020). Selon l'enquête complémentaire à l'enquête BMO de Pôle emploi, 27 % des établissements n'ayant pas recruté en 2018 attribuaient cette absence de recrutements à des difficultés anticipées trop importantes. Enfin, les difficultés anticipées traduisent le point de vue des recruteurs et permettent donc aussi, en les confrontant aux difficultés effectives, d'évaluer si leurs anticipations se réalisent.

La présente étude est innovante pour deux raisons. La première est de s'appuyer sur l'appariement de nombreuses sources de données. Nous utilisons d'abord l'enquête BMO de Pôle emploi. Nous mobilisons ensuite les données sociales DADS, qui décrivent les caractéristiques de la main-d'œuvre et les salaires des établissements, les données fiscales de FARE, ainsi que des données administratives agrégées. Cette étude est la première à mobiliser à la fois des données d'établissement ou d'entreprise, via les données

fiscales et sociales, des caractéristiques géographiques locales et des caractéristiques fines sur les métiers recherchés dans les recrutements. La seconde raison est que l'étude couvre un grand nombre de secteurs et en offre une perspective à l'échelle de l'établissement, plutôt qu'une approche centrée sur les secteurs ou les métiers (Niang & Vroylandt, 2020 ; Niang *et al.*, 2021 ; Arik *et al.*, 2021).

Le principal résultat de l'étude est que les caractéristiques observées des établissements n'expliquent qu'une part limitée des difficultés de recrutement anticipées (environ 3 % de la variance totale). Si l'on ajoute à l'analyse les caractéristiques des métiers ouverts au recrutement, le pouvoir explicatif reste faible (environ 6 % de la variance totale quel que soit le modèle, et 14 % si l'on prend également en compte l'existence de difficultés dans le passé).

La suite de cet article commence par une revue de la littérature sur les facteurs pouvant expliquer les difficultés de recrutement (section 1), puis nous présentons les données mobilisées, l'échantillon retenu et notre méthodologie (section 2). Nous présentons ensuite des statistiques descriptives (section 3), puis nos résultats, en les discutant en lien avec la littérature existante (section 4). Nous concluons en résumant les principaux enseignements de notre étude et proposant des pistes de réflexion pour les chercheurs et les décideurs politiques.

1. Facteurs explicatifs des difficultés de recrutement

1.1. Références théoriques et empiriques

Dans la littérature économique, les difficultés de recrutement peuvent être vues comme symptomatiques d'un appariement difficile entre les demandeurs d'emploi et les entreprises. Le cadre théorique expliquant les mécanismes d'appariement sur le marché du travail a été développé dans les travaux de Diamond (1982) et Mortensen & Pissarides (1994)¹. Les modèles introduisent des frictions qui expliquent ainsi la coexistence de postes vacants et de demandeurs d'emploi. Ce problème d'appariement peut être dû à un excès de demande de travail (excès de postes à pourvoir) ou un manque d'offre de travail (peu d'individus en recherche d'emploi). Les efforts de recherche des recruteurs ou des demandeurs d'emploi peuvent aussi avoir un impact sur l'efficacité de l'appariement. Lorsque ces efforts augmentent,

1. Voir Rogerson *et al.* (2005) pour une revue de la littérature sur le sujet.

le nombre d'appariements (ou le nombre d'embauches) réalisés pour un nombre donné de demandeurs d'emploi et d'emplois vacants s'accroît également (Lazear, 2014 ; Rémy, 2022). Cette étude vise à mieux comprendre les frictions dues à la demande de travail en intégrant des caractéristiques d'établissement, comme la taille ; mais aussi les rigidités dues à l'offre de travail en tenant compte de variables d'environnement, comme la densité locale de la population.

Fabling & Maré (2016) s'appuient sur des données de panel d'entreprises néo-zélandaises pour déterminer les facteurs explicatifs des difficultés de recrutement. Ils observent une persistance de l'effet propre à chaque entreprise. En effet, plus de 60 % des entreprises qui déclaraient des difficultés de recrutement en 2009 le faisaient déjà l'année précédente. Notre étude met également en évidence un phénomène de persistance. Fabling & Maré (2016) trouvent que les entreprises avec un chiffre d'affaires élevé mentionnent plus de difficultés de recrutement que celles au chiffre d'affaires faible, alors qu'elles proposent en moyenne un meilleur salaire. Les auteurs expliquent ce résultat en se référant aux travaux de Haskel & Martin (2001) qui associent les pénuries de compétences au progrès technique. Les grandes entreprises seraient celles qui auraient besoin de main-d'œuvre plus qualifiée, donc plus compliquée à recruter, pour s'adapter au progrès technique et rester compétitives. Les résultats obtenus dans la présente étude sont différents : les difficultés de recrutement anticipées sont plus faibles dans les entreprises avec un fort chiffre d'affaires et beaucoup de salariés, ce qui suggère plutôt un effet d'apprentissage au fil des recrutements et donc de moins grandes difficultés à recruter pour les grandes entreprises, qui peuvent se doter d'un service de ressources humaines de meilleure qualité.

Si Fabling & Maré (2016) ne trouvent pas d'effet particulier des marchés du travail locaux, Blanc *et al.* (2008) montrent que la densité de population a un impact sur les difficultés de recrutement. En utilisant des données françaises de la région Midi-Pyrénées, ils observent que les entreprises recrutant dans des espaces de faible densité sont susceptibles d'être plus exposées aux difficultés de recrutement. Cela s'explique par le manque de main-d'œuvre disponible dans les zones à faible densité et donc la faible offre de travail qui en résulte.

Davis *et al.* (2013) s'intéressent quant à eux à la dynamique du nombre de postes vacants et

du taux de remplissage de ces postes vacants à l'échelle de l'établissement aux États-Unis. Ils trouvent que le taux de remplissage des postes vacants augmente fortement avec le taux de rotation de la main-d'œuvre. Ils expliquent cela par le fait que les entreprises qui sont plus habituées aux processus de recrutement éprouvent moins de difficultés à embaucher. Les auteurs mettent également en avant le rôle des structures de ressources humaines dans les processus de recrutement, qui permettent de plus facilement faire circuler les offres d'emploi, sélectionner les candidats et négocier les salaires et divers avantages. Nous trouvons également que plus le taux de rotation est élevé, moins il y a de difficultés de recrutement, suggérant que les facteurs précédemment cités liés à l'organisation interne des entreprises sont fortement susceptibles d'influencer le niveau de difficultés de recrutement anticipées.

Carrillo-Tudela *et al.* (2020) montrent que le salaire d'embauche a un impact sur la proportion des offres publiées par les entreprises qui sont satisfaites. Mueller *et al.* (2018) montrent aussi que les offres d'emploi sont plus vite pourvues lorsque le salaire proposé est élevé. Nous complétons ces travaux et trouvons que les établissements qui proposent des salaires plus élevés déclarent faire face à moins de difficultés de recrutement.

Arik *et al.* (2021) cherchent à évaluer comment, dans le secteur manufacturier, les caractéristiques des entreprises, de leur environnement et des métiers dans lesquelles elles recrutent affectent les difficultés de recrutement auxquelles elles font face. Ils trouvent que les difficultés décroissent avec la taille de l'établissement et avec le chiffre d'affaires, ce qui suggère que les entreprises qui ont plus de moyens et qui ont des services spécialisés dans le recrutement font face à moins de difficultés. Ils trouvent également que plus le taux de chômage local et la densité locale de population sont élevés moins les difficultés anticipées sont grandes, pour les raisons d'offre de travail évoquées précédemment. Ces résultats sont très similaires à ceux de notre étude. L'objectif est de prolonger ce travail en prenant en compte d'autres caractéristiques des entreprises² et en élargissant l'analyse à d'autres secteurs d'activité.

2. Les variables que nous ajoutons sont le taux de rotation de la main-d'œuvre, l'écart de rémunération, le taux de recrutements saisonniers et l'appartenance à un groupe.

1.2. Analyses institutionnelles du marché du travail français

La thématique des difficultés de recrutement a fait régulièrement l'objet d'études de la part des administrations françaises telles que la DARES ou Pôle emploi. Ces études visent à déterminer dans quels métiers les difficultés de recrutement sont les plus grandes et quelles en sont les raisons. De fait, elles mettent l'accent sur les caractéristiques des métiers qui pourraient expliquer les difficultés de recrutement.

Les études de la DARES s'appuient sur les enquêtes OFER (Offre d'emploi et recrutement) portant sur le processus de recrutement des entreprises. Lhommeau & Rémy (2019) indiquent que 17 % de procédures de recrutement avaient été vécues comme difficiles par les recruteurs en 2016. Leur analyse est conduite *ex post*, c'est-à-dire après que les recrutements aient eu lieu. L'inadéquation entre le profil des candidats et les attentes de l'entreprise est le facteur le plus fréquemment énoncé par les entreprises pour expliquer les difficultés rencontrées. Lhommeau & Rémy (2019) montrent que les établissements situés en dehors d'une aire urbaine ont plus de difficultés à recruter que les autres et qu'il y a des différences significatives entre secteurs d'activité. Cela fait également partie des résultats de notre étude.

Lhommeau & Rémy (2020) mettent en évidence que l'équipement et la compétence des recruteurs jouent dans la présence de difficultés de recrutement. En particulier, les recruteurs sans service de ressources humaines et qui ont moins l'habitude de recruter déclarent plus de difficultés. Ces résultats vont dans le sens de la conclusion principale de notre étude : les difficultés de recrutement relèvent principalement de caractéristiques non observées des entreprises, comme la qualité de leur service de ressources humaines.

L'autre source principale de données sur les difficultés de recrutement en France provient de l'enquête annuelle sur les Besoins en main-d'œuvre (BMO) réalisée par Pôle emploi. Portant sur l'ensemble des établissements employeurs³, elle renseigne sur les projets de recrutement pour l'année suivante (*analyse ex ante*) et, le cas échéant, les difficultés qui sont anticipées. Cette enquête permet donc de suivre l'évolution des recrutements en France au fil des ans. Pôle emploi réalise également, en parallèle de l'enquête BMO, une enquête complémentaire, afin de mieux comprendre, entre autres, les difficultés de recrutement passées et les

difficultés de recrutement anticipées. Tout comme l'enquête OFER, cette enquête a permis de mettre en évidence l'inadéquation du profil des candidats aux postes ouverts au recrutement et un nombre insuffisant de candidats comme les facteurs majeurs conduisant aux difficultés de recrutement. Des facteurs liés à la pénibilité du travail, à l'image de l'entreprise ou du métier, à la nature ou la durée du contrat ou encore au nombre de recrutements simultanés à effectuer peuvent aussi entrer en ligne de compte (Blache & Gaumont, 2016 ; Gaumont *et al.*, 2020).

Les enquêtes de la Banque de France et l'Insee, plus fréquentes que celles de Pôle emploi et de la DARES, mesurent également les difficultés *ex ante*. Le point de conjoncture de la Banque de France de novembre 2022 révèle ainsi une croissance des difficultés de recrutement anticipées dans tous les secteurs entre mai et octobre 2021, ce qui peut être interprété comme un symptôme de la reprise économique post-Covid et d'une baisse du taux de chômage.

2. Données mobilisées

2.1. Les enquêtes Besoins en main-d'œuvre

Cette étude exploite les enquêtes sur les Besoins en main-d'œuvre (BMO) de 2018 et 2019 réalisées par Pôle emploi. Ces enquêtes ont été conduites entre octobre et décembre et portaient sur les besoins en main-d'œuvre de l'année suivante. Les enquêtes BMO couvrent le secteur privé, y compris le secteur agricole, et le secteur public relevant des collectivités territoriales et des établissements publics administratifs. Sont exclues du champ de l'enquête les administrations de l'État et certaines entreprises publiques telles que la Banque de France. L'enquête couvre les 13 régions métropolitaines et les 5 régions d'outre-mer. Les unités interrogées sont les établissements.

Dans ces enquêtes, un projet de recrutement correspond à la volonté de recruter une personne sur un poste spécifique au cours de l'année suivante. Les établissements sont invités à indiquer, pour chaque catégorie de métiers (familles professionnelles en 82 catégories), leur nombre total de projets de recrutement, s'ils jugent que ces recrutements seront difficiles ou pas, et à préciser enfin le nombre de recrutements saisonniers parmi l'ensemble des recrutements.

3. En dehors des administrations de l'État et des entreprises publiques.

L'étude porte ainsi sur les difficultés anticipées relatives à des recrutements prévus.

Sur les 2 410 306 établissements enquêtés (i.e. les établissements hors administrations de l'État et entreprises publiques), 436 608 ont répondu à l'enquête 2018 (difficultés exprimées fin 2018 pour des recrutements envisagés en 2019). Dans l'enquête 2019 (difficultés exprimées fin 2019 pour des recrutements envisagés en 2020), 2 408 179 établissements ont été interrogés et 440 052 ont répondu. Nous empilons les enquêtes de 2018 et 2019 et disposons ainsi de 876 660 réponses d'établissements. Nous excluons les établissements du secteur agricole et ceux des services financiers et d'assurance, car les sources avec lesquelles nous allons appairier ces données ne couvrent pas ces secteurs. Nous partons ainsi d'un échantillon de 760 544 observations au niveau de l'établissement. Parmi ces établissements, 26 % (soit 199 192 établissements) ont déclaré avoir des projets de recrutement pour l'année suivante. Notre analyse porte sur ces seuls établissements ayant déclaré avoir des projets de recrutement. Nous utilisons les pondérations calculées par Pôle emploi, qui rendent l'échantillon pondéré représentatif de la taille et des secteurs d'activité du tissu économique au niveau régional. Nous retenons comme variables d'intérêt le nombre de recrutements prévus – incluant les recrutements saisonniers, la présence de difficultés de recrutement, le secteur d'activité (en 8 modalités⁴) et la taille de l'établissement (en 8 modalités).

2.2. Données sur les caractéristiques des établissements et de leur environnement

Dans un premier temps, nous complétons les données BMO par des caractéristiques des établissements issues des données DADS de 2015⁵ (Déclaration annuelle de données sociales), en particulier le nombre de salariés par catégorie socioprofessionnelle (nous distinguons 5 catégories : artisans, commerçants, chefs d'entreprise ; cadres et professions intellectuelles supérieures ; professions intermédiaires ; employés ; ouvriers). Ces informations permettent de calculer, pour chaque établissement, le taux de rotation de sa main-d'œuvre et l'écart de rémunération entre l'établissement et les établissements de même taille de son département pour sa structure par catégorie socioprofessionnelle de recrutements. Nous complétons également par des informations issues de FARE 2017 et qui concernent l'entreprise à laquelle appartient l'établissement : le chiffre d'affaires, l'appartenance à un groupe et la date de création de l'entreprise.

Ensuite, les bases de données de l'Agence Nationale de la Cohésion des Territoires (ANCT) fournissent des informations sur la population et la densité de la population de la commune de l'établissement. Nous utilisons également la base des aires urbaines 2010 au 1^{er} janvier 2018 de l'Insee qui indique pour chaque commune sa catégorie dans le zonage en aires urbaines (grand pôle, couronne de grand pôle, etc.) en 2018. Grâce aux données de recensement de 2019, réalisé par l'Insee, nous calculons les taux de chômage par département et par catégorie socioprofessionnelle. Dans un premier temps, nous associons à chaque recrutement le taux de chômage départemental de sa catégorie socioprofessionnelle. Nous agrégeons ensuite ces taux au niveau de l'établissement, en pondérant par le nombre de recrutements anticipés⁶. Cette variable vise à rendre compte de façon synthétique du niveau de chômage auquel l'établissement est confronté lorsqu'il prévoit de recruter. Nous pondérons par la structure des recrutements envisagés par catégorie socioprofessionnelle, car cela nous paraît être la meilleure façon de rendre compte de l'offre de travail locale dans les segments de main-d'œuvre dans lesquels l'établissement recrute.

Environ 45 % des 199 192 établissements ayant un projet de recrutement peuvent être appariés avec les DADS 2015 et FARE 2017, soit un échantillon final de 89 139 observations. La principale raison de la perte de données est le décalage temporel entre ces bases et les enquêtes BMO 2018 et 2019. Par définition, seuls peuvent être appariés aux DADS 2015 et à FARE 2017 les établissements qui existaient déjà en 2015, donc qui ont au moins 3 ou 4 ans d'ancienneté⁷. Le tableau A1 en annexe montre que les établissements non appariés sont essentiellement les petits établissements sans salarié ou ayant moins de 5 salariés. Les données de population, densité et taux de chômage étant à l'échelle de la commune ou du département, nous ne perdons aucune observation lors de leur appariement à notre base.

4. Ces modalités correspondent à la présentation des secteurs d'activité au niveau A10 de la nomenclature NAF rév. 2, de laquelle nous enlevons les deux secteurs « Agriculture, sylviculture et pêche » et « Activités financières et d'assurance », comme expliqué précédemment.

5. Au moment de la réalisation de ce travail, les données DADS les plus récentes disponibles concernaient 2018, mais les données DADS agrégées par établissement les plus récentes concernaient 2015, c'est pourquoi on a retenu dans cette étude les données de 2015.

6. L'annexe A2 présente en détails la méthodologie retenue pour le calcul de cette variable.

7. Le tableau S1-2 de l'Annexe en ligne montre la répartition des établissements de notre échantillon final selon la date de création de leur entreprise. Nous n'observons pas la date de création de l'entreprise pour les établissements exclus de l'échantillon final.

Les établissements ayant un projet de recrutement de l'échantillon final sont donc principalement de tailles moyenne ou grande et appartiennent à une entreprise qui a déjà plusieurs années d'existence. À la suite des appariements, les administrations publiques sont sous-représentées, et à l'inverse, les établissements des secteurs de la construction, de l'industrie, du commerce, transport, hébergement et restauration sont sur-représentés. Dans notre échantillon final, la proportion de recrutements saisonniers parmi les recrutements est moindre que dans l'échantillon des établissements qui envisagent de recruter. La part des établissements anticipant des difficultés de recrutement pour au moins un projet y est au contraire plus élevée (66 % contre 52 %). Cette différence peut s'expliquer par la sur-représentation de secteurs, comme la construction, au sein lesquels les difficultés de recrutement sont élevées (voir tableau S1-4 de l'Annexe en ligne – lien de l'Annexe en ligne à la fin de l'article).

3. Statistiques descriptives

3.1. Caractéristiques des établissements anticipant des difficultés de recrutement

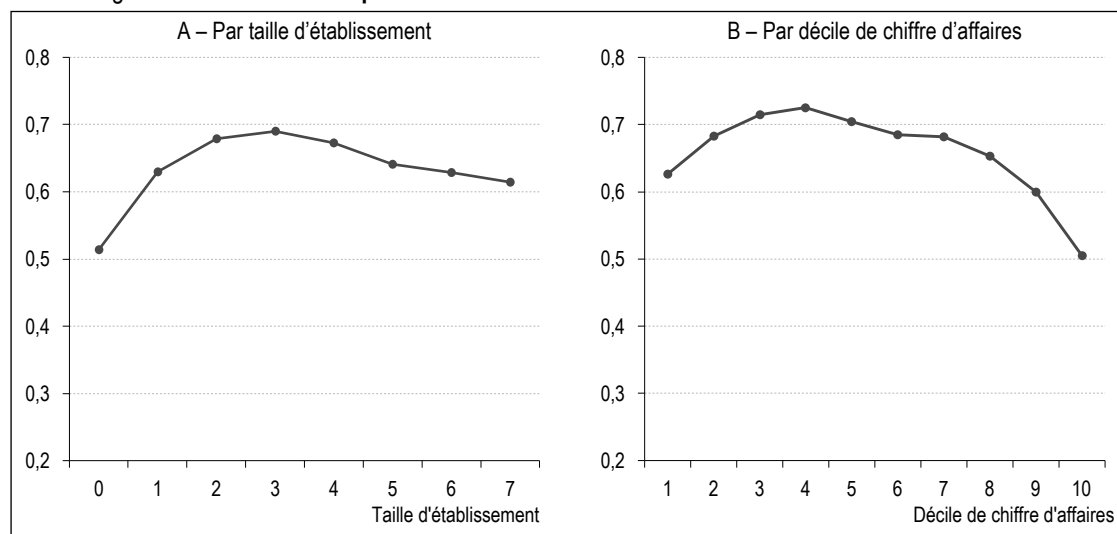
Nous commençons par décrire les établissements qui recrutent et expriment des difficultés de recrutement, en termes de taille, de secteur d'activité et d'ancienneté⁸. 66 % des établissements de notre échantillon anticipent des difficultés à recruter. Les tableaux S1-1 à S1-10

de l'Annexe en ligne présentent la proportion d'établissements ayant des difficultés de recrutement parmi ceux anticipant de recruter, selon les principales caractéristiques étudiées dans cet article : taille, chiffre d'affaires de l'entreprise, ancienneté de l'entreprise, taux de rotation de la main-d'œuvre, etc.

Les figures I-A et I-B donnent une représentation visuelle des résultats des tableaux S1-1 et S1-3 en Annexe en ligne. La figure I-A montre une relation en U inversé entre la taille des établissements et la part de projets de recrutement anticipés comme difficiles. On observe le même profil en U inversé entre décile de chiffre d'affaires et part de projets de recrutements anticipés comme difficiles (figure I-B). Pour les chiffres d'affaires les plus faibles, les difficultés augmentent avec le chiffre d'affaires, puis au-delà d'un certain montant, la relation s'inverse. Les moindres difficultés des chiffres d'affaires les plus élevés pourraient s'expliquer par le fait que les plus petits établissements maîtrisent mal les processus de recrutement, peut-être par manque d'expérience. Arrivés à une certaine taille, les établissements investissent dans des services de ressources humaines qui gagnent en expérience avec le temps, ce qui diminuerait le taux de difficultés anticipées (Davis *et al.*, 2013). En Annexe en ligne, cette figure est ventilée selon

8. La source de chacune de ces variables d'intérêt peut être trouvée en annexe A2-1.

Figure I – Difficultés anticipées de recrutement en fonction de la taille et du chiffre d'affaires



Note : sur la figure I-A, la taille d'établissement 0 correspond aux établissements sans salarié, la taille 1 aux établissements de 1 à 4 salariés, 2 à ceux de 5 à 9 salariés, 3 à ceux de 10 à 19 salariés, 4 à ceux de 20 à 49 salariés, 5 à ceux de 50 à 99 salariés, 6 à ceux de 100 à 199 salariés et 7 à ceux de 200 salariés ou plus. Sur la figure I-B, l'abscisse indique le décile de chiffre d'affaires de l'entreprise (voir tableau S1-3 de l'Annexe en ligne pour connaître les montants associés à chaque décile).

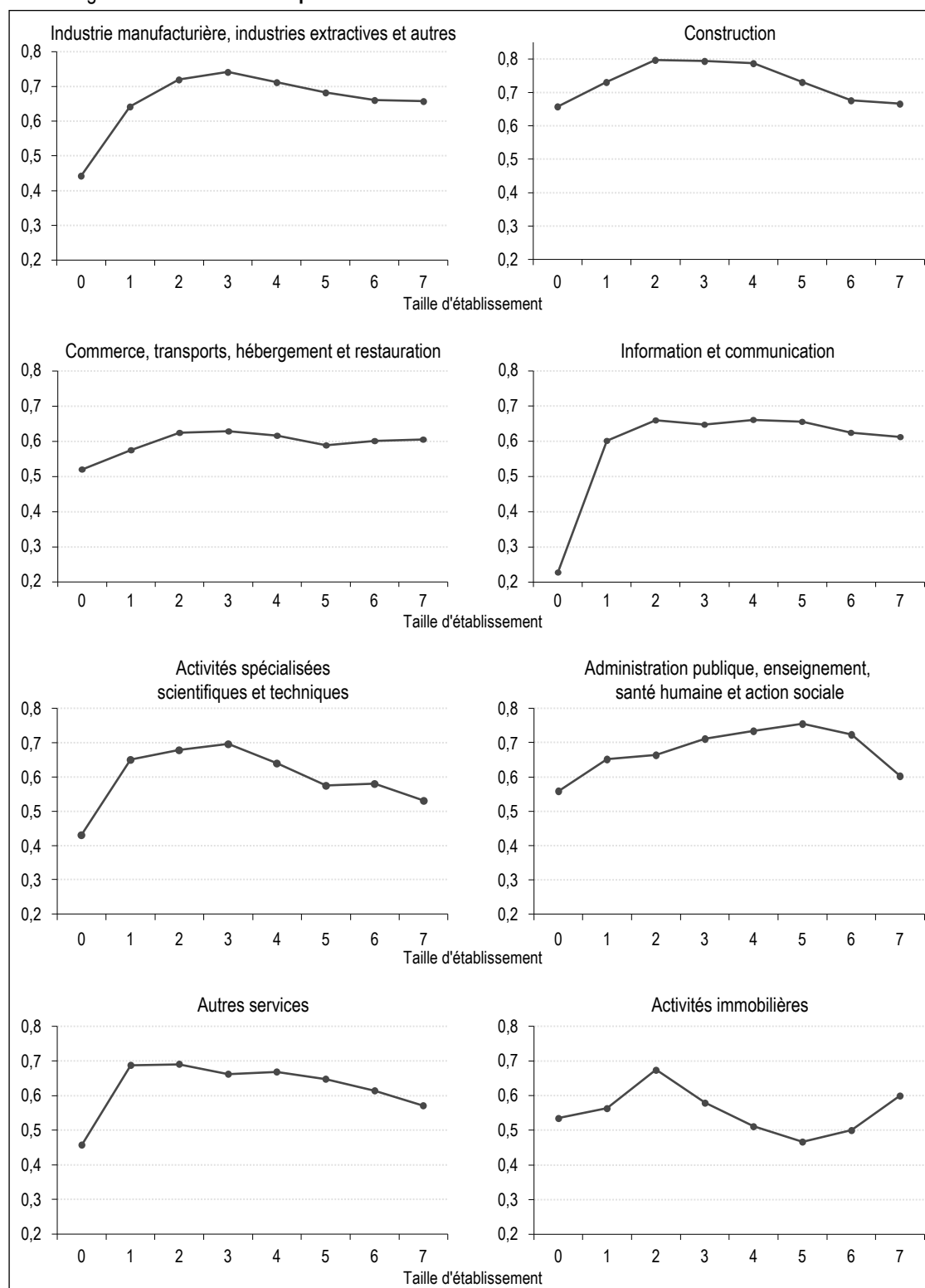
Lecture : parmi les établissements de 1 à 4 salariés qui anticipent de recruter, 63 % anticipent au moins un recrutement difficile. Parmi les 10 % des établissements qui anticipent de recruter ayant le plus faible chiffre d'affaires, 63 % anticipent au moins un recrutement difficile.

Source : enquêtes BMO, Pôle emploi, FARE et DADS, Insee.

l'appartenance de l'établissement à un groupe (voir la figure S1-I de l'Annexe en ligne). Les différences de difficultés de recrutement selon

le décile de chiffre d'affaires sont sensiblement identiques que les établissements appartiennent ou non à un groupe.

Figure II – Difficultés anticipées de recrutement en fonction de la taille et du secteur d'activité

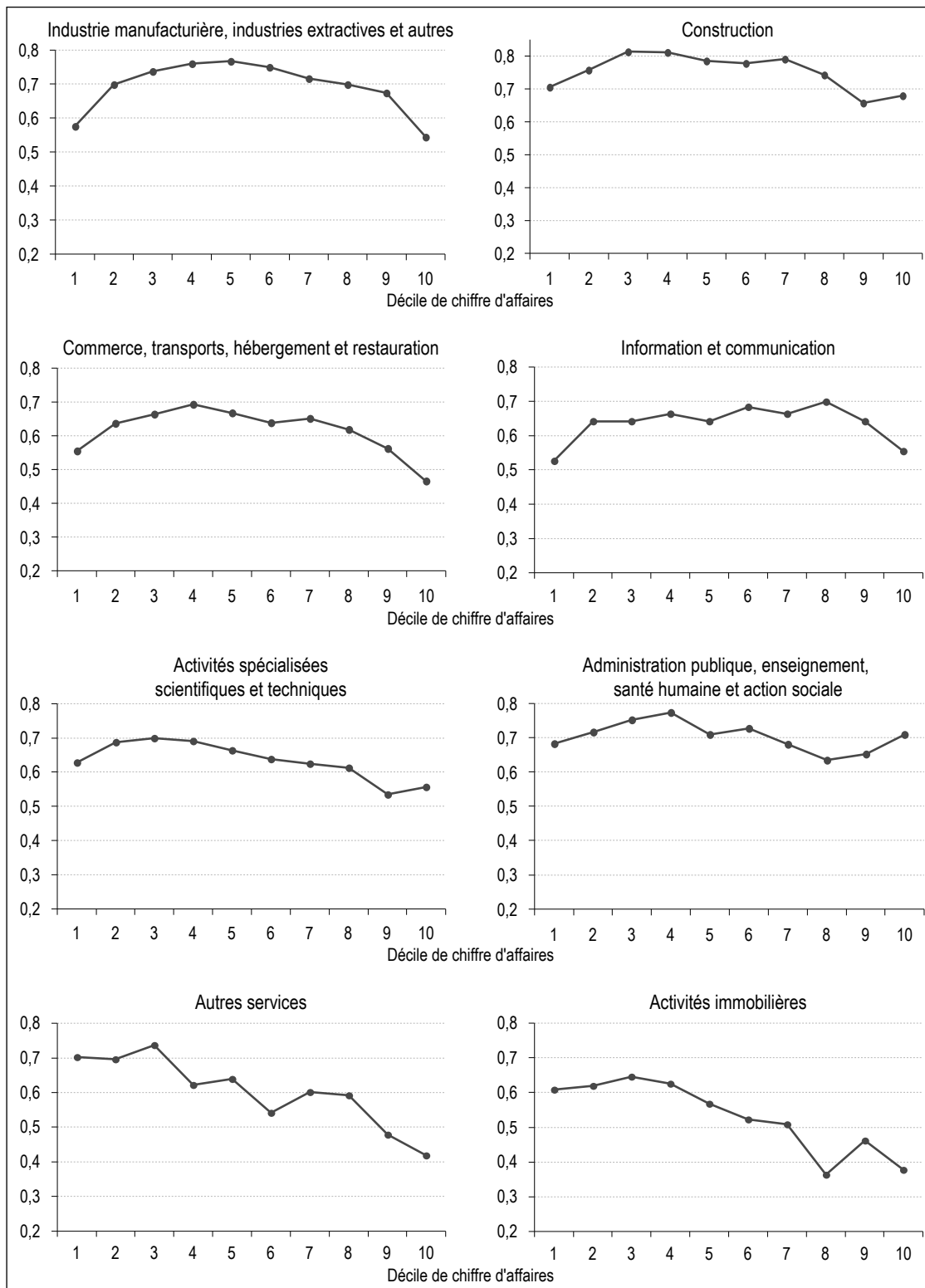


Note : la taille d'établissement 0 correspond aux établissements sans salarié, 1 à ceux de 1 à 4 salariés, 2 à ceux de 5 à 9 salariés, 3 à ceux de 10 à 19 salariés, 4 à ceux de 20 à 49 salariés, 5 à ceux de 50 à 99 salariés, 6 à ceux de 100 à 199 salariés et 7 à ceux de plus de 200 salariés. Lecture : dans le secteur de la construction, 72 % des établissements de 1 à 4 salariés anticipent au moins un recrutement difficile. Source : enquêtes BMO, Pôle emploi, Fare et DADS, Insee.

Les figures II et III déclinent ces analyses selon la taille et selon le chiffre d'affaires par secteur d'activité. Dans l'industrie manufacturière et

dans la construction on observe la même courbe en U inversé qu'au niveau de l'économie toute entière. Cette forme ne se retrouve cependant

Figure III – Difficultés anticipées de recrutement en fonction du chiffre d'affaires et du secteur



Note : voir tableau S1-3 en Annexe en ligne pour obtenir les montants associés à chaque décile.

Lecture : dans le secteur de la construction, 70 % des établissements dont le chiffre d'affaires est parmi les 10 % les plus faibles anticipent au moins un recrutement difficile.

Source : enquêtes BMO, Pôle emploi, FARE et DADS, Insee.

pas dans tous les secteurs d'activité. Ce n'est par exemple pas le cas dans les activités immobilières, ni pour le commerce, transports, hébergement et restauration pour ce qui est des effectifs

La figure IV montre que les difficultés de recrutement anticipées sont moindres lorsque le taux de rotation est élevé. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les établissements qui recrutent souvent et donc ayant un taux de rotation élevé, ayant l'habitude de recruter sont aussi les mieux préparés à ces recrutements, et donc anticipent le moins de difficultés. Concernant l'écart de rémunération par rapport aux établissements similaires du département, si l'on excepte les 10 % d'établissements où cet écart est le plus élevé, les difficultés de recrutement anticipées sont d'autant plus grandes que cet écart de rémunération est élevé, c'est-à-dire que l'établissement verse des salaires relativement élevés par rapport à ses voisins. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les établissements qui anticipent des difficultés à recruter décident d'augmenter leurs salaires pour rendre les postes plus attractifs (Mueller *et al.*, 2018 ; Carrillo-Tudela *et al.*, 2020).

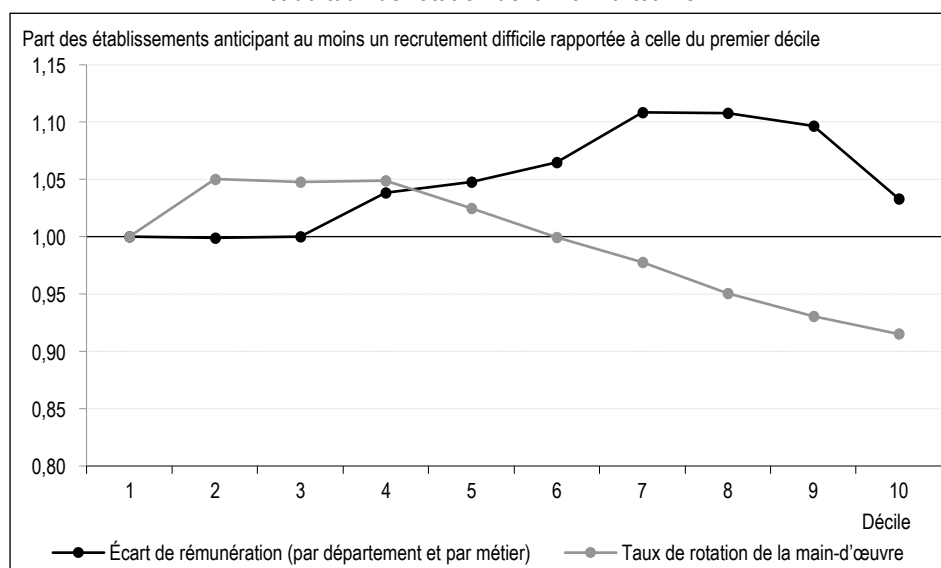
La figure S1-II de l'Annexe en ligne représente les difficultés de recrutements anticipées en fonction du nombre de recrutements prévus, tout en distinguant les établissements qui recrutent des saisonniers de ceux qui ne le font pas. On

observe que la part d'établissements anticipant des difficultés de recrutement est moindre dans les établissements recrutant (au moins un peu) des saisonniers, quel que soit le nombre total de recrutements. Cela suggère que l'habitude de recruter contribuerait bien à limiter les difficultés anticipées, les saisonniers étant souvent recrutés de façon régulière. Cela peut également tenir au fait que, dans le cas de recrutements saisonniers, on rappelle les mêmes salariés d'une année sur l'autre, limitant ainsi les possibles difficultés de recrutement⁹.

Les établissements qui font face à des difficultés de recrutement sont donc majoritairement de taille petite ou moyenne, et font partie plus souvent du secteur manufacturier ou de la construction. Sans surprise, anticiper des difficultés pour au moins un recrutement est d'autant plus fréquent que le nombre de recrutements prévus est élevé : recruter 3 ou 4 personnes expose mécaniquement plus que recruter un seul salarié. Ce sont aussi les établissements qui n'ont pas l'habitude du processus et qui

9. De plus, on remarque une courbe en U inversé pour les établissements qui ne recrutent pas de saisonniers. Cela suggère que plus un établissement cherche à recruter d'individus, plus la tâche est compliquée. Cependant, arrivé à un certain nombre de recrutements, on anticipe moins de difficultés. Pour les établissements qui recrutent pour plus de 51 postes, le niveau de difficultés est le même qu'ils recrutent ou non des saisonniers. Cela peut s'expliquer par le fait que les grands établissements qui disposent de structures de cellules de recrutement et pour qui le processus est bien maîtrisé sont aussi ceux qui recrutent beaucoup.

Figure IV – Difficultés anticipées de recrutement en fonction de l'écart de rémunération et du taux de rotation de la main-d'œuvre



Note : en abscisse les établissements sont regroupés par décile d'écart de rémunération (courbe noire) et par décile de taux de rotation de la main-d'œuvre (courbe grise). En ordonnée la part des établissements anticipant au moins un projet de recrutement difficile est représentée sous forme d'indice. Les valeurs sont normalisées de sorte à ce que le premier décile corresponde à la base 1.

Interprétation : les 10 % des établissements avec le plus haut taux de rotation de la main-d'œuvre sont 0,9 fois moins nombreux à anticiper des difficultés de recrutement que 10 % des établissements avec le plus faible taux de rotation de la main-d'œuvre.

Source : enquêtes BMO, Pôle emploi, Fare et DADS, Insee.

recrutent rarement qui déclarent anticiper le plus de difficultés.

3.2. Disparités géographiques

Les établissements d'Île-de-France ont le taux le plus faible de difficultés de recrutement de France métropolitaine (60 %, voir tableau S1-5 de l'Annexe en ligne). C'est en Bretagne et dans les Pays de la Loire que la proportion d'établissements anticipant des difficultés de recrutement est la plus élevée (71 %).

La figure V illustre que, quel que soit le type d'aire urbaine, les difficultés de recrutement anticipées décroissent avec la densité de population. L'ampleur des difficultés varie d'un type d'aire urbaine à l'autre, mais la tendance reste la même. Les différences selon la densité peuvent s'expliquer par une offre de travail plus importante dans les communes fortement peuplées et donc moins de difficultés pour les employeurs à recruter de la main-d'œuvre. Typiquement on observe un faible taux d'établissements anticipant des difficultés de recrutement dans la ville de Paris. Conformément aux résultats dans la littérature (Blanc *et al.*, 2008), au niveau agrégé, nous observons que les difficultés de recrutement anticipées sont corrélées négativement avec la population, la densité de population et avec le taux de chômage (voir figure S1-III de l'Annexe en ligne)¹⁰.

4. Analyse économétrique

4.1. Présentation du modèle

L'analyse économétrique repose sur un modèle Y_i Probit. À la différence d'une approche linéaire, dans un modèle Probit c'est une variable latente – non observée – qui est spécifiée comme fonction linéaire des facteurs explicatifs. La variable observée, Y_i , correspond ici à la présence d'au moins un projet de recrutement anticipé comme difficile par l'établissement. Le modèle s'écrit, pour chaque établissement i :

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ anticipe des difficultés de recrutement} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

avec introduction d'une variable latente non observable Y_i (qui pourrait être le coût des difficultés de recrutement en temps et en argent) telle que :

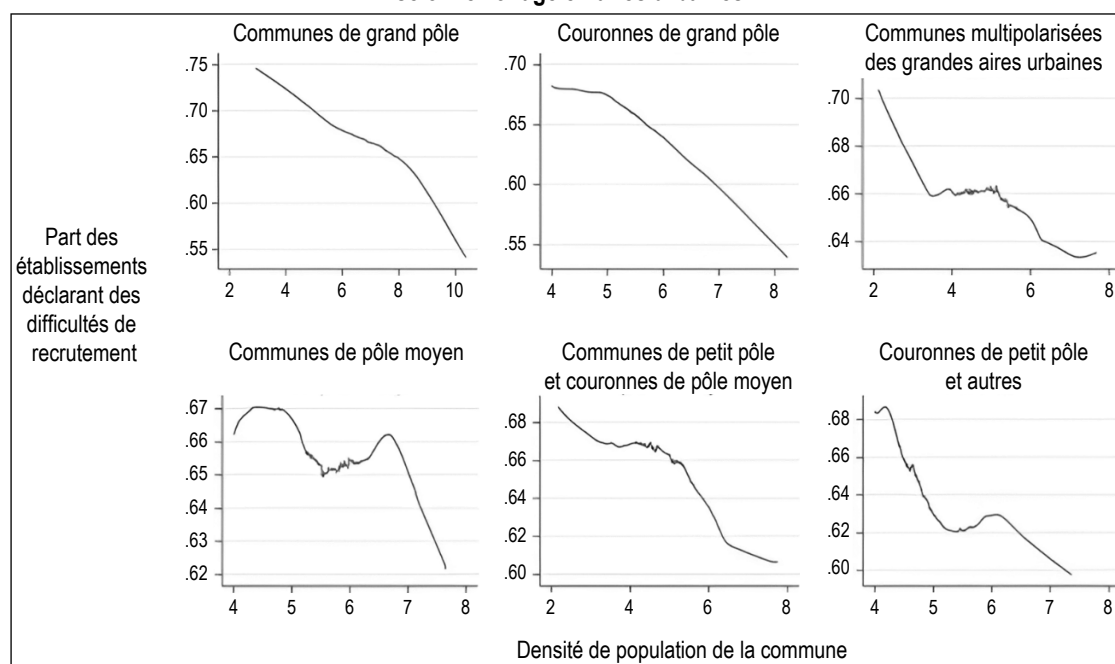
$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{si } Y_i > C \\ 0 & \text{si } Y_i \leq C \end{cases}$$

où C désigne un seuil qui peut être fixé à 0 sans perte de généralité.

On distingue deux groupes de variables explicatives. Le premier groupe rassemble des indicateurs économiques caractéristiques de

10. La population et la densité de population sont calculées à l'échelle de la commune. Le taux de chômage est calculé par département et par métier (voir annexe 2 pour plus de détails).

Figure V – Difficultés anticipées de recrutement et densité de population selon le zonage en aires urbaines



Note : la figure représente la part des établissements déclarant anticiper au moins un recrutement difficile l'année suivante (en ordonnée) en fonction de la densité de population de la commune. Les communes sont réparties selon les six catégories de zonage en aires urbaines. Source : enquêtes BMO, Pôle emploi, FARE et DADS, Insee.

l'établissement (chiffre d'affaires de l'entreprise en log, appartenance à un groupe, taux de rotation de la main-d'œuvre, proportion de saisonniers dans les recrutements de l'établissement, l'écart de rémunération par métier, département et taille d'établissement, et taille de l'établissement). Le second groupe décrit les facteurs économiques et géographiques qui peuvent influencer sur les difficultés de recrutement de l'établissement. On tient compte en particulier de la densité de population de la commune et du taux de chômage local. En plus de ces deux groupes de variables, nous ajoutons des variables indicatrices décrivant le métier dans lequel on recrute (en 21 modalités) et le secteur d'activité (en 10 modalités).

Certaines variables pourraient être endogènes, en particulier le taux de rotation de la main-d'œuvre et l'écart de rémunération. Pour prendre en compte cette potentielle endogénéité, l'écart de rémunération et le taux de rotation de la main-d'œuvre sont calculés pour 2015, soit plusieurs années avant les éventuelles difficultés déclarées (en 2018 et 2019). Par prudence, nous nous gardons d'interpréter les relations entre ces variables et les difficultés de recrutement comme des relations causales.

La variable latente Y_i est ainsi décrite par le modèle de régression linéaire suivant :

$$Y_i = c + X_i' \beta_1 + \sum_j S_{ij} \beta_{2j} + \sum_k \left(\frac{N_{ik}}{N_i} \right) M_{ik} \beta_{3k} + \varepsilon_i \quad (1)$$

où le vecteur X_i regroupe les deux groupes de caractéristiques précédemment cités (caractéristiques des établissements et de leur environnement), S_{ij} est l'indicatrice prenant la valeur 1 si l'établissement se trouve dans le secteur j et 0 sinon. M_{ik} est l'indicatrice prenant la valeur 1 si l'établissement recrute dans le métier k et 0 sinon. $\frac{N_{ik}}{N_i}$ est le ratio des recrutements de l'établissement i pour le métier k , par rapport au nombre total de recrutements envisagés. Cela permet de pondérer les variables indicatrices par le nombre de recrutements dans chaque métier.

Une spécification alternative consiste à s'intéresser à la persistance des difficultés de recrutement d'une année sur l'autre. L'objectif est de déterminer s'il y a une inertie dans les difficultés de recrutement, autrement dit si les établissements qui ont déclaré des difficultés en 2018 sont plus susceptibles que les autres d'en déclarer en 2019. Étant donné qu'une partie seulement des établissements répondent à l'enquête deux années de suite, la taille de l'échantillon est réduite (18 498 observations, contre 89 139 dans la base initiale). Dans cette

spécification, Y_i est une variable latente qui correspond aux difficultés anticipées déclarées en 2019 et prend la forme suivante :

$$Y_i = c + X_i' \beta_1 + \sum_j S_{ij} \beta_{2j} + \sum_k \left(\frac{N_{ik}}{N_i} \right) M_{ik} \beta_{3k} + P_i \beta_4 + \varepsilon_i \quad (2)$$

où P_i est l'indicatrice égale à 1 si l'établissement i déclarait anticiper des difficultés en 2018. β_4 capte ici un *effet de persistance* des difficultés d'une année sur l'autre.

Pour chacune de ces spécifications, les résultats sont présentés avec et sans pondération. Comme expliqué précédemment, seul 45 % de l'échantillon initial est conservé dans l'échantillon final, après appariement avec les données DADS et FARE : cela modifie la représentativité de notre échantillon (voir le tableau A1 en annexe). Pour cette raison, nous présentons dans la section suivante et en Annexe en ligne les résultats avec et sans la pondération calculée par Pôle emploi.

Ces spécifications répondent à trois objectifs. Tout d'abord, l'étude des signes des coefficients permet de confirmer les tendances observées dans les statistiques descriptives et de comparer ces résultats à la littérature. Deuxièmement, nous mesurons quelle est la part de la variance expliquée par les facteurs retenus. Si une grande part de la variance reste inexpliquée après avoir inclus les caractéristiques des établissements, de leur environnement, leur secteur d'activité et le type de métiers dans lesquels ils recrutent, cela laisse penser que d'autres facteurs, comme par exemple l'organisation interne de l'activité de l'établissement ou la psychologie des recruteurs, jouent peut-être de façon significative dans le fait d'anticiper des difficultés de recrutement. Si, à l'inverse, les caractéristiques introduites comme facteurs explicatifs sont dominantes dans l'explication des difficultés anticipées, il sera possible d'envisager des actions spécifiques d'accompagnement pour des établissements présentant les mêmes caractéristiques. Troisièmement, au-delà de l'évaluation de la part globale de variance expliquée, il est également intéressant de comparer la part relative de cette variance expliquée pouvant être attribuée aux différents types de facteurs explicatifs : ceux qui sont liés aux caractéristiques de l'établissement, à son environnement géographique ou économique, ou aux métiers concernés par les projets de recrutement.

4.2. Résultats

Le tableau 1 présente les résultats de l'estimation de l'équation (1) sans pondération (colonne 1) et

avec pondération (colonne 2). Nous n'incluons pas la population de la commune ni celle de la zone urbaine dans laquelle se situe la commune comme variables de contrôle, car elles sont redondantes avec celle de densité de population¹¹. Les résultats des estimations avec et sans pondération sont similaires en termes de significativité et de signe.

Les signes des coefficients sont cohérents avec les statistiques descriptives pour l'appartenance à un groupe, le taux de rotation de la main-d'œuvre, le pourcentage de recrutements saisonniers, le taux de chômage et la densité de population : ces variables sont corrélées négativement avec les difficultés de recrutement anticipées. On note toutefois que le coefficient associé à l'appartenance à un groupe n'est pas significatif, ce qui était suggéré sur la figure S1-I en Annexe en ligne¹². Le taux de rotation de la main-d'œuvre est corrélé négativement avec les difficultés anticipées, ce qui peut s'interpréter par le fait qu'un taux de rotation élevé se traduit probablement par une certaine habitude des recrutements, toutefois le coefficient est non significatif. Les difficultés de recrutement sont d'autant plus faibles que le taux de chômage et la densité de population sont élevés : l'offre de

travail étant plus grande, il est moins compliqué de recruter (Mortensen & Pissarides, 1994). Les difficultés anticipées sont corrélées positivement avec le nombre de recrutements : plus il y a de postes à pourvoir, plus la tâche est compliquée pour les recruteurs. Le coefficient associé à l'écart de rémunération est non significatif.

Le montant de chiffre d'affaires de l'entreprise est corrélé négativement avec les difficultés de recrutement. Le tableau S2-1 en Annexe en ligne introduit le carré du chiffre d'affaires dans la régression, et le coefficient associé est négatif. On retrouve donc la forme convexe mise en évidence dans les statistiques descriptives.

Le tableau 2 présente les résultats d'estimation de l'équation (2). Les signes des coefficients associés aux variables déjà introduites dans l'équation (1) restent inchangés, à la fois pour les estimations avec et sans pondération. Dans les spécifications avec et sans pondération,

11. Dans les tableaux S2-2 et S2-3 de l'Annexe en ligne, nous présentons les résultats où la densité de population est remplacée par la population de la commune et la population de la zone urbaine dans laquelle se situe la commune respectivement et trouvons des résultats très similaires.

12. Le coefficient associé à l'appartenance à un groupe est toutefois significatif lorsque le chiffre d'affaires est introduit au carré dans la régression (voir tableau S2-1 en Annexe en ligne).

Tableau 1 – Résultats d'estimation – existence de difficultés de recrutement anticipées

	Sans pondération (1)	Avec pondération (2)
Caractéristiques de l'établissement		
Chiffre d'affaires (Log)	-0,0239*** (0,000955)	-0,0230*** (0,00117)
Appartenance à un groupe	-0,00194 (0,00429)	-0,00630 (0,00509)
Nombre total de recrutements	0,000201*** (0,000081)	0,000684*** (0,000113)
Taux de rotation	-0,000588* (0,000331)	-0,000342 (0,000361)
Proportion de saisonniers dans les recrutements	-0,131*** (0,00477)	-0,139*** (0,00579)
Écart de rémunération (par métier, département et taille d'établissement)	0,000215 (0,00184)	-0,000605 (0,00255)
Variables indicatrices taille	Oui	Oui
Variables indicatrices âge	Oui	Oui
Caractéristiques géographiques		
Densité	-0,0128*** (0,00107)	-0,0109*** (0,00130)
Taux de chômage (par département et par métier)	-0,715*** (0,0337)	-0,707*** (0,0412)
Caractéristiques des métiers		
Variables indicatrices métier	Oui	Oui
Variables indicatrices secteur	Oui	Oui
Nombre d'observations	89 139	89 139
Pseudo-R ²	0,0622	0,0632

Note : écarts-types robustes entre parenthèses. *** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,10. La régression Probit porte sur l'ensemble des établissements qui ont répondu à l'enquête en 2018 ou 2019. La variable expliquée est égale à 1 si l'établissement déclare anticiper au moins un projet de recrutement comme difficile, à 0 sinon. Les valeurs affichées correspondent aux effets marginaux. Les coefficients associés à la taille de l'établissement et au secteur d'activité sont disponibles dans les tableaux S2-4 et S2-5 en Annexe en ligne.

Source : enquêtes BMO, Pôle emploi, FARE et DADS, Insee.

Tableau 2 – Résultats d'estimation – effet persistance

	Sans pondération (1)	Avec pondération (2)
Effet de persistance	0,265*** (0,00745)	0,270*** (0,00924)
Caractéristiques de l'établissement		
Chiffre d'affaires (Log)	-0,0309*** (0,00225)	-0,0272*** (0,00278)
Appartenance à un groupe	-0,000191 (0,00954)	-0,0154 (0,0113)
Nombre total de recrutements	0,000115 (0,000107)	0,000225* (0,000122)
Taux de rotation	-0,00099 (0,000679)	-0,00153* (0,000964)
Proportion de saisonniers dans les recrutements	-0,114*** (0,0103)	-0,115*** (0,0129)
Écart de rémunération (par métier, département et taille d'établissement)	-3,89e-05 (0,00292)	-0,00560 (0,00603)
Variables indicatrices taille	Oui	Oui
Variables indicatrices âge	Oui	Oui
Caractéristiques géographiques		
Densité	-0,0170*** (0,00238)	-0,0141*** (0,00292)
Taux de chômage (par département et par métier)	-0,386*** (0,0873)	-0,423*** (0,109)
Caractéristiques des métiers		
Variables indicatrices métier	Oui	Oui
Variables indicatrices secteur	Oui	Oui
Nombre d'observations	18 467	18 467
Pseudo-R ²	0,140	0,145

Note : écarts-types robustes entre parenthèses. *** p<0,01, ** p<0,05, * p<0,10. La régression Probit porte sur les établissements qui ont répondu à la fois à l'enquête en 2018 et en 2019. La variable expliquée est égale à 1 si l'établissement déclare anticiper un projet de recrutement difficile en 2019, 0 sinon. L'« effet de persistance » est une variable indicatrice égale à 1 si l'établissement déclarait anticiper des projets difficiles en 2018, 0 sinon. Les valeurs affichées correspondent aux effets marginaux.

Source : enquêtes BMO, Pôle emploi, FARE et DADS, Insee.

L'effet de persistance des difficultés est positif et largement significatif. Cela suggère qu'il pourrait y avoir des caractéristiques structurelles qui expliquent les difficultés de recrutement et qui seraient propres à chaque établissement. Il pourrait par exemple s'agir de caractéristiques liées à la qualité du service des ressources humaines, sa taille ou plus simplement son existence : en l'absence de service de recrutement suffisamment efficace, les difficultés peuvent se répéter d'une année sur l'autre. L'effet persistance peut aussi capter la psychologie des recruteurs de l'établissement, leur tempérament optimiste ou pessimiste, qui, s'ils restent dans l'établissement, se traduit par la persistance du caractère optimiste ou pessimiste des anticipations. Les figures S1-IV et S1-V en Annexe en ligne présentent des statistiques descriptives complémentaires sur la part des établissements anticipant des difficultés en 2018 et 2019 selon la taille d'établissement et le secteur d'activité.

4.3. Part de variance expliquée et sens des contributions des facteurs explicatifs

Les différents modèles estimés dans les tableaux 1 et 2 affichent une valeur relativement

faible du pseudo-R², que les données soient ou non pondérées. L'ensemble des variables expliquent au maximum environ 6 % de la variance des difficultés anticipées (colonne 2 du tableau 1). Ce résultat concorde avec les précédents travaux sur le sujet : par exemple, Fabling & Maré (2016) et Arik *et al.* (2021) trouvent des pseudo-R² qui n'excèdent pas 0,15.

Il s'agit du résultat principal de cette étude. Après l'introduction d'un nombre élevé de variables explicatives dans le modèle économétrique, qui concernent à la fois des caractéristiques des établissements et de leur environnement et les métiers dans lesquels ils recrutent, la valeur du pseudo-R² reste très faible. Alors que ces caractéristiques observées sont généralement celles qui sont considérées comme expliquant les difficultés de recrutement (de Zeeuw, 2018 ; Lhommeau & Rémy, 2019), notre analyse suggère que les principaux facteurs sont essentiellement non observés. Il pourrait s'agir par exemple de caractéristiques organisationnelles telles que les méthodes de recrutement et l'organisation des services de ressources humaines ou de caractéristiques idiosyncratiques comme la psychologie des recruteurs, qui est susceptible

d'affecter leur ressenti en termes de difficultés de recrutements anticipées (Weaver, 2021).

Le tableau 2 montre que l'« effet de persistance » des anticipations de difficultés de recrutement est significatif. Ainsi, lorsque l'on contrôle par les difficultés anticipées l'année précédente, on améliore significativement la qualité prédictive du modèle. Par rapport au tableau 1, la part de la variance expliquée passe de 6 % à 14 %. Cet effet de persistance peut s'interpréter comme un signe de cohérence des anticipations telles qu'exprimées sur deux années consécutives. Le coefficient qui mesure l'effet de persistance varie peu avec la spécification (contrôle ou non par des indicatrices de métier, de secteur, de taille et de localisation). Cette faible variabilité révèle a priori que ces facteurs non observés sont indépendants des facteurs observés. Le surcroît de variance expliqué par l'effet de persistance pourrait être imputé à des facteurs non observés organisationnels (qualité de la gestion des ressources humaines, par exemple) ou idiosyncratiques (pessimisme de l'employeur).

4.4. Contribution des différents facteurs explicatifs

On s'intéresse maintenant aux contributions relatives de chaque catégorie de variables : celles caractéristiques des établissements, celles caractéristiques de l'environnement des établissements et celles caractéristiques du métier et du secteur

dans lequel on recrute. Partant de l'estimation de l'équation (1), on enlève tour à tour chacune des catégories de variables, et on compare les contributions de chacune d'entre elles.

Le tableau 3 montre les valeurs du pseudo-R² pour les différentes estimations de l'équation (1). C'est l'inclusion des variables indicatrices relatives aux métiers qui accroît le plus le pseudo-R². Il s'agit là d'une importante conclusion : les caractéristiques spécifiques aux métiers ont le plus fort pouvoir explicatif relativement aux autres variables, même si leur pouvoir reste faible. Ces résultats sont cohérents avec Lhommeau & Rémy (2022) qui montrent que les difficultés de recrutement sont très hétérogènes entre métiers, en distinguant quatre catégories : les métiers techniques, manuels, d'aide à la personne et de contact avec le public.

* *
*

L'objectif principal de cette étude était d'étudier les facteurs classiquement avancés pour expliquer les difficultés de recrutement exprimées par les entreprises françaises et d'en déterminer les principaux. Contrairement aux études antérieures (Lhommeau & Rémy, 2019 ; Gaumont *et al.*, 2020), les difficultés sont examinées au niveau de l'établissement et non du métier dans lequel on cherche à recruter.

Tableau 3 – Part de variance expliquée (pseudo-R²) - équation (1)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Caractéristiques de l'établissement					
Chiffre d'affaires	Oui		Oui	Oui	Oui
Appartenance à un groupe	Oui		Oui	Oui	Oui
Nombre total de recrutements	Oui		Oui	Oui	Oui
Taux de rotation de la main-d'œuvre	Oui		Oui	Oui	Oui
Écart de rémunération	Oui		Oui	Oui	Oui
Proportion de saisonniers	Oui		Oui	Oui	Oui
Variables indicatrices taille	Oui		Oui	Oui	Oui
Variables indicatrices âge	Oui		Oui	Oui	Oui
Caractéristiques géographiques					
Densité de population	Oui	Oui		Oui	Oui
Taux de chômage	Oui	Oui		Oui	Oui
Caractéristiques des métiers					
Variables indicatrices métiers	Oui	Oui	Oui		Oui
Variables indicatrices secteur	Oui	Oui	Oui	Oui	
Nombre d'observations	89 139	89 139	89 139	89 139	89 139
Pseudo-R ²	0,0622	0,0448	0,0566	0,0394	0,0618

Note : modèle Probit où la variable expliquée est une indicatrice égale à 1 si l'établissement déclare anticiper au moins un projet de recrutement comme difficile. « Oui » signifie que la variable est incluse dans la régression comme variable explicative (modèle sans pondération).
Source et champ : enquêtes BMO, Pôle emploi, FARE et DADS, Insee. Établissements ayant répondu à l'enquête BMO en 2018 ou en 2019.

Quels facteurs expliquent les difficultés exprimées par les recruteurs ? Un premier résultat est que l'ensemble des caractéristiques observées incluses dans nos modèles expliquent au maximum 14 % des difficultés exprimées par les employeurs interrogés. Les managers d'entreprises aux caractéristiques similaires ont ainsi une perception des difficultés de recrutement qui peut varier fortement. Ce résultat est comparable à ceux trouvés dans d'autres pays (Fabling & Maré, 2016 ; Arik *et al.*, 2021) et suggère que ces difficultés sont dues à des facteurs non directement observables. Ceux-ci peuvent être des caractéristiques organisationnelles ou idiosyncratiques, comme la qualité de la gestion des ressources humaines et du management, la psychologie du chef d'entreprise, l'image de marque de l'entreprise, etc. Ce résultat va dans le même sens que ceux d'Algan *et al.* (2020) qui montrent qu'apporter du soutien aux entreprises pour renforcer leur service de ressources humaines peut augmenter significativement le nombre et la qualité des recrutements.

Concernant les facteurs observables, l'analyse permet de les classer par ordre d'importance. Le premier type de facteur concerne les spécificités des métiers recherchés, qui contribuent pour environ un tiers de la variance expliquée. Le tableau S1-11 en Annexe en ligne dresse une liste des 10 métiers pour lesquels la proportion d'employeurs anticipant des difficultés à recruter est la plus élevée. Le second type de facteurs est lié aux caractéristiques de l'établissement, à savoir sa taille, son secteur d'activité, le chiffre d'affaires de l'entreprise et la rotation des salariés.

Ces facteurs contribuent un peu moins de 30 % de la variance expliquée. Le troisième type de facteurs qui contribue à hauteur d'environ 10 % de la variance expliquée concerne les caractéristiques géographiques et les conditions économiques environnantes (densité de population dans la commune et taux de chômage dans le département).

Dans de nombreux secteurs d'activité, les difficultés de recrutement anticipées varient en forme de « U inversé » avec le nombre de salariés de l'établissement et le chiffre d'affaires de l'entreprise. Les difficultés sont d'autant moins fréquentes que le taux de rotation des salariés est élevé, suggérant qu'il existe un effet d'apprentissage de la gestion des projets de recrutement. Le contexte local a aussi un pouvoir explicatif, mais limité : plus la densité de la population et le niveau de chômage local sont élevés, moins les difficultés exprimées sont fréquentes.

En résumé, ces résultats suggèrent que les caractéristiques observées classiques ne rendent que très partiellement compte des difficultés de recrutement, qui s'expliqueraient pour l'essentiel par des caractéristiques non observées ou non observables, comme par exemple des caractéristiques organisationnelles ou idiosyncratiques. Parmi les caractéristiques observées, c'est la catégorie de métier dans lequel se fait le recrutement qui explique la plus grande part de la variance expliquée. Un accompagnement ciblé sur les métiers concernés pourrait ainsi s'avérer utile pour atténuer les difficultés de recrutement perçues. □

Lien vers l'Annexe en ligne :

www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/8302693/ES544_Bezy-et-al_Annexe-en-ligne.pdf

BIBLIOGRAPHIE

- Algan, Y., Crépon, B. & Glover, D. (2020).** Are Active Labor Market Policies Directed at Firms Effective? Evidence from a Randomized Evaluation with Local Employment Agencies. *J-PAL Working Paper*. <https://www.povertyactionlab.org/media/file-research-paper/are-active-labor-market-policies-directed-firms-effective-evidence>
- Arik, M., Abston, K. & Zaza, S. (2021).** How Difficult is it to Fill Manufacturing Positions? A Cross-sectional Assessment of Survey Results. *Global Journal of Accounting and Finance*, 5(1), 113. https://www.igbr.org/wp-content/Journals/Articles/GJAF_Vol_5_No_1_2021%20pp%20113-134.pdf
- Banque de France (2022).** Point sur la conjoncture française à début novembre 2022. *Enquêtes de conjoncture de la Banque de France*. https://www.banque-france.fr/system/files/2023-01/point-conjoncture_2022-10.pdf

- Blache, G. & Gaumont, S. (2016).** Les offres d'emploi difficiles à satisfaire : les difficultés sont d'origines multiples et se concentrent sur certains secteurs. Direction des Statistiques des Études et de l'Évaluation, *Éclairages et Synthèses* N° 21. https://www.pole-emploi.org/files/live/sites/peorg/files/documents/Statistiques-et-analyses/E%26S/eets_n21-oe_difficiles_a_satisfaire_2016avr56054.pdf
- Blanc, M., Cahuzac, E. & Tahar, G. (2008).** Hiring Difficulties and Manpower Flows: Does Labour Market Density Matter? *Environment and Planning Journals*, 40(5), 1090–1108. <https://doi.org/10.1068/a3939>
- Carrillo-Tudela, C., Gartner, H. & Kaas, L. (2020).** Recruitment Policies, Job-Filling Rates and Matching Efficiency. *Journal of the European Economic Association*, 21(6), 2413–2459. <https://doi.org/10.1093/jeea/jvad034>
- Davis, S. J., Faberman, R. J. & Haltiwanger, J. C. (2013).** The Establishment-level Behavior of Vacancies and Hiring. *The Quarterly Journal of Economics*, 128(2), 581–622. <https://doi.org/10.1093/qje/qjt002>
- Diamond, P. A. (1982).** Wage Determination and Efficiency in Search Equilibrium. *The Review of Economic Studies*, 49(2), 217–227. <https://doi.org/10.2307/2297271>
- Fabling, R. & Maré, D.-C. (2016).** Firm-Level Hiring Difficulties: Persistence, Business Cycle and Local Labour Market Influences. *Journal of Labor Research*, 37, 179–210. <https://doi.org/10.1007/s12122-016-9221-8>
- Gaumont, S. (2020).** Offres pourvues et abandons de recrutement en 2018. Pôle emploi. *Éclairages et Synthèses* N° 54. <https://statistiques.pole-emploi.org/offres/offrespub/199729>
- Gaumont, S., Lainé, F. & Vroylandt, T. (2020).** Enquête « Besoins en main-d'œuvre » : les employeurs anticipent une progression de leurs perspectives d'embauche pour 2020. Pôle emploi. *Éclairages et Synthèses* N° 57.
- Haskel, J. & Martin, C. (2001).** Technology, Wages and Skill Shortages: Evidence from UK Micro Data. *Oxford Economic Papers*, 53(4), 642–658. <https://doi.org/10.1093/oep/53.4.642>
- Insee (2022).** En juillet 2022, dans l'industrie manufacturière, les difficultés de recrutement s'accroissent. *Informations Rapides* N° 187. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6478188>
- Lazear, E. P. (2014).** Structural or cyclic? Labor markets in recessions. *IZA World of Labor*. <https://doi.org/10.15185/izawol.4>
- Lhommeau, B. & Rémy, V. (2019).** Le recrutement n'est pas toujours un long fleuve tranquille. 17 % des recrutements sont jugés difficiles par les recruteurs. *Dares analyses* N° 031. <https://dares.travail-emploi.gouv.fr/publications/le-recrutement-n-est-pas-toujours-un-long-fleuve-tranquille>
- Lhommeau, B. & Rémy, V. (2020).** Quels liens entre tension sur le marché du travail, difficultés de recrutement et efforts de recherche des employeurs ? *Travail et Emploi*, 163, 45–82. <https://dares.travail-emploi.gouv.fr/publication/quels-liens-entre-tension-sur-le-marche-du-travail-difficultes-de-recrutement-et>
- Lhommeau, B. & Rémy, V. (2019).** Candidate Selection Criteria: A Summary of the Recruitment Process. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 534-35, 61–81. <https://doi.org/10.24187/ecostat.2022.534.2079>
- Mortensen, D. T. & Pissarides, C. A. (1994).** Job Creation and Job Destruction in the Theory of Unemployment. *The Review of Economic Studies*, 61(3), 397–415. <https://doi.org/10.2307/2297896>
- Mueller, A. I., Osterwalder, D., Zweimüller, J. & Kettmann, A. (2018).** Vacancy Durations and Entry Wages: Evidence from Linked Vacancy-employer-employee Data. NBER, *Working Paper* N° w25118. <https://doi.org/10.3386/w25118>
- Niang, M. & Vroylandt, T. (2020).** Les tensions sur le marché du travail en 2019. *DARES Résultats* N° 032. <https://dares.travail-emploi.gouv.fr/publications/les-tensions-sur-le-marche-du-travail-en-2019>
- Niang, M., Lainé, F. & Chartier, F. (2021).** Les tensions sur le marché du travail en 2020. *DARES Résultats* N° 069. <https://dares.travail-emploi.gouv.fr/publication/les-tensions-sur-le-marche-du-travail-en-2020>
- Rémy, V. (2022).** Compétences inadéquates, efforts de recrutement insuffisants : quelle place dans les difficultés d'embauche ? *Notes de la DARES*. <https://dares.travail-emploi.gouv.fr/publication/competences-inadequates-efforts-de-recrutement-insuffisants>
- Rogerson, R., Shimer, R. & Wright, R. (2005).** Search-Theoretic Models of the Labor Market: A Survey, *Journal of Economic Literature*, 43(4), 959–988. <https://doi.org/10.1257/002205105775362014>
- Weaver, A. (2021).** Hiring Frictions in a Regulated Occupation: Evidence from US Laboratories. *British Journal of Industrial Relations*, 59(3), 899–927. <https://doi.org/10.1111/bjir.12570>
- de Zeeuw, M. (2018).** Hiring Difficulties across Industries and Location. Federal Reserve Bank of Atlanta. *Workforce Current*, 2018-04. <https://doi.org/10.29338/wc2018-04>

ANNEXE 1

Tableau A1 – Caractéristiques du nouvel échantillon par rapport à la base initiale BMO

Variables	Base initiale	Base initiale restreinte aux recrutements	Base finale
Pourcentage d'établissements qui recrutent	26	100	100
Pourcentage d'établissements exprimant des difficultés de recrutement parmi ceux qui recrutent	52	52	66
Nombre de projets de recrutements par établissement	1,5	5,7	7,6
Proportion de saisonniers dans les recrutements	26	26	18
Répartition par taille d'établissement (en %)			
0 salarié	11	10	1
1-4 salariés	45	28	20
5-9 salariés	15	16	18
10-19 salariés	10	15	18
20-49 salariés	12	19	23
50-99 salariés	3	6	9
100-199 salariés	2	4	6
200 salariés ou plus	1	2	5
Répartition par secteur d'activité (en %)			
Industrie manufacturière, extractive et autres	10	11	18
Construction	10	11	14
Commerce, transport, hébergement et restauration	30	33	41
Information et communication	2	3	2
Activités immobilières	2	2	1
Activités spécialisées, scientifiques et techniques, services administratifs et soutien	15	13	14
Administration publique, enseignement, santé et activités sociales	21	18	5
Autres activités de services	9	9	4
Nombre d'observations	760 544	199 192	89 139

Note : la « base initiale » correspond aux deux bases BMO 2018 et BMO 2019 empilées. La « base initiale restreinte aux recrutements » regroupe uniquement les établissements qui déclarent avoir au moins un projet de recrutement l'année où ils sont interrogés. La « base finale » est celle obtenue après appariement de la « base initiale restreinte aux recrutements » avec les DADS 2015 et FARE 2017.

Par construction, les difficultés de recrutement anticipées et les projets de recrutement saisonniers ne sont calculées que pour les établissements ayant des projets de recrutement. Les proportions de projets jugés difficiles et de projets saisonniers restent donc identiques entre la première et la deuxième colonne. Ces chiffres varient à la suite des appariements avec les autres bases de données car les caractéristiques des établissements retenus dans la base finale (taille, secteur) diffèrent de la base initiale. À la suite de l'appariement avec les bases de données économiques, le nombre d'établissements des secteurs agricoles et des activités financières était trop faible pour être représentatif du secteur (moins de 100 observations) et ont donc été exclues de l'analyse.

Source : enquête Besoins en main-d'œuvre, 2018 et 2019 (hors établissements des secteurs « Agriculture, silviculture et pêche » et « Activités financières et d'assurance »), DADS et FARE, Insee.

DESCRIPTION DES VARIABLES

A2-1. Liste des variables et des bases utilisées

Tableau A2 – Liste des variables du modèle

Variable	Base utilisée	Années retenues
Caractéristiques des établissements		
Nombre de recrutements	Besoins en main-d'œuvre (Pôle emploi)	2018/2019
Taille		
Secteur		
Proportion de saisonniers		
Type de métier		
Appartenance à un groupe	Données FARE (Insee)	2017
Chiffre d'affaires*		
Taux de rotation de la main-d'œuvre	Données DADS (Insee)	2015
Écart de rémunération		
Caractéristiques de leur environnement		
Chômage	Recensement de la population (Insee)	2019
Densité*	Données ANCT	2018
Population*		
Zonage en aires urbaines	Base des aires urbaines de 2010 (Insee)	2018

* Variables exprimées en logarithme dans les estimations.

A2-2. Calcul du taux de rotation de la main-d'œuvre

On ne dispose pas du nombre d'arrivées et de départs pour chaque année. Nous avons donc dû utiliser une autre formule. La formule standard pour le taux de rotation est la suivante :

$$\text{Taux de rotation} = \frac{NBa + NBd}{2 \times E(01.01)}$$

avec NBa le nombre d'arrivées dans l'établissement durant l'année, NBd le nombre de départ durant l'année et $E(01.01)$ l'effectif de l'établissement au début de l'année au 1^{er} janvier. On note $E(TOT)$ l'effectif total durant l'année, et $E(31.12)$ à l'effectif de l'établissement à la fin de l'année au 31 décembre.

On peut écrire :

$$E(TOT) = E(01.01) + NBa = E(31.12) + NBd$$

On obtient alors :

$$NBa = E(TOT) - E(01.01)$$

$$NBd = E(TOT) - E(31.12)$$

En remplaçant NBa et NBd dans l'équation du taux de rotation, on obtient finalement :

$$\text{Taux de rotation} = \frac{2E(TOT) - E(01.01) - E(31.12)}{2 \times E(01.01)}$$

Nous utilisons donc cette formule dans notre étude. Pour les établissements dont l'effectif est nul au 01.01, nous fixons le taux de rotation à 0. Cela signifie implicitement qu'il n'y a pas de rotation de la main-d'œuvre.

A2-3. Calcul du taux de chômage

Le taux de chômage par département est calculé à partir des données individuelles du Recensement de la population de 2019 (Insee). Nous calculons pour chaque département des taux de chômage par catégorie socioprofessionnelle (CS) en 8 modalités. Ces taux départementaux par CS sont obtenus en utilisant les pondérations individuelles fournies dans la base de données de recensement.

On associe ensuite à chaque recrutement le taux de chômage de sa catégorie socioprofessionnelle dans son département.

Exemple : un établissement de l'Ain envisage un recrutement dans la CS 1. Le taux de chômage de la CS 1 dans l'Ain est de 8 %. On associe donc la valeur 8 % à ce recrutement.

On considère ensuite tous les recrutements envisagés par l'établissement et on calcule le taux de chômage moyen associé.

Exemple : un établissement de l'Ain envisage deux recrutements dans la CS 1 et trois dans la CS 2. Le taux de chômage de la CS 1 dans l'Ain est de 8 %, celui de la CS 2 est de 10 %. Le taux de chômage auquel est confronté l'établissement pour ces recrutements est calculé ainsi :

$$\text{Taux de chômage} = 8\% \times \frac{2}{5} + 10\% \times \frac{3}{5} = 9,2\%$$

A2-4. Calcul de l'écart de rémunération

Un salaire moyen de référence est d'abord calculé par catégorie socioprofessionnelle (CS en 8 postes), taille d'établissement et département. On associe ensuite à chaque recrutement un écart de rémunération dépendant du salaire moyen pratiqué par l'établissement qui recrute dans la CSP concernée en mesurant l'écart avec le salaire de référence en pourcentages.

Exemple : les établissements qui ont entre 3 et 4 salariés dans l'Ain proposent un salaire moyen de 2 000 € mensuels dans la CSP 1. L'établissement A, domiciliée dans l'Ain et ayant entre 3 et 4 salariés cherche à recruter dans la CSP 1 et rémunère ses employés de la CSP 1 à hauteur de 2 400 € chaque mois en moyenne. L'écart de rémunération associé à ce recrutement est :

$$\text{Ecart de rémunération}_{\text{recrutement}} = \frac{2400 - 2000}{2000} = 20\%$$

Une fois associée une valeur de l'écart de rémunération à chaque recrutement, il faut agréger à l'échelle de l'établissement. On considère donc tous les recrutements fait par chaque établissement et on calcule l'écart de rémunération associé, pondéré par le nombre de recrutements.

Exemple : l'établissement A embauche des salariés dans les CSP 1 et 2. L'écart de rémunération est de 20 % pour la CSP 1 et de -10 % pour la CSP 2. L'établissement A embauche deux nouveaux salariés dans la CSP 1 et trois nouveaux salariés dans la CSP 2. Dans ce cas, la formule de l'écart de rémunération est donc :

$$\text{Écart de rémunération} = 20\% \times \frac{2}{5} + (-10\%) \times \frac{3}{5} = 2\%$$

Diversité sectorielle et croissance de l'emploi local en France

Sectoral Diversity and Local Employment Growth in France

Mounir Amdaoud* et Nadine Levratto*

Résumé – Cet article examine les liens entre la diversité sectorielle et la croissance de l'emploi local en France entre 2004 et 2015. Suivant les travaux précurseurs de Frenken *et al.* (2007), nous prenons en compte à la fois la diversité intrasectorielle (également appelée « variété reliée ») et la diversité intersectorielle (ou « variété non reliée »), au niveau local et au niveau du voisinage. Nos résultats confirment que la variété reliée est corrélée positivement avec la croissance de l'emploi. De plus, cette corrélation semble alimentée par la variété reliée locale en période de croissance et par la variété reliée du voisinage en période de crise. La variété non reliée est corrélée négativement avec la croissance de l'emploi, et ce lien ne passe que par le canal du voisinage.

Abstract – This article investigates the links between sectoral diversity and local employment growth in France over the period 2004-2015. Starting from the seminal contribution of Frenken *et al.* (2007), we take into account both the within and between sectoral diversities at the local level and at the neighbourhood one. Our empirical investigations confirm that intrasector diversity (so called related variety) is positively associated with employment growth. Moreover, this association seems to be driven by the local related variety in growth phase and by the related variety in the neighbourhood in crisis period. We also find that the negative relationship between unrelated variety and employment growth goes only through the neighbourhood canal.

JEL : R11, O18, D62

Mots-clés : variété reliée, variété non reliée, croissance de l'emploi, interactions spatiales, France

Keywords: related variety, unrelated variety, employment growth, spatial interactions, France

* Economix, CNRS, université Paris Nanterre. Correspondance : mounir.amdaoud@economix.fr

Les auteurs remercient les rapporteurs, la rédaction de la revue *Economie et Statistique / Economics and Statistics* et Dominique Goux pour leur lecture attentive des versions précédentes de cet article, ainsi que pour leurs commentaires et suggestions qui ont contribué à l'améliorer.

Reçu en novembre 2022, accepté en juillet 2024. Traduit de « Sectoral Diversity and Local Employment Growth in France ».

Les jugements et opinions exprimés par les auteurs n'engagent qu'eux-mêmes, et non les institutions auxquelles ils appartiennent, ni a fortiori l'Insee.

Citation : Amdaoud, M. & Levratto, N. (2024). Sectoral Diversity and Local Employment Growth in France. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 544, 75–94. doi: 10.24187/ecostat.2024.544.2125

Dans un contexte de mondialisation des marchés, de concurrence croissante et de crises récurrentes, la composition du tissu économique la mieux adaptée pour assurer le développement régional reste une information stratégique importante pour les décideurs politiques et les scientifiques.

La littérature scientifique sur l'innovation souligne depuis longtemps l'importance de la proximité géographique dans l'échange de connaissances entre entreprises. De nombreux articles montrent qu'un regroupement d'entreprises spécialisé ou diversifié peut instaurer des conditions propices au développement de l'innovation, du fait de la circulation des connaissances entre les entreprises. Dans les domaines de recherche de l'économie géographique, de l'économie urbaine et de la science régionale, cette discussion fait référence au débat de longue date entre l'approche dite de Marshall-Arrow-Romer (MAR) conceptualisée par Marshall (1920), puis par Arrow (1962) et Romer (1986) d'une part et l'approche de Jacobs (Jacobs, 1969) d'autre part.

Toutefois, ces externalités spatiales ne saisissent pas toutes les dimensions entrant en jeu dans la notion de proximité. Les récentes avancées théoriques ont rappelé qu'il est important de prendre en compte les proximités relationnelles – cognitives, organisationnelles, institutionnelles, politiques, culturelles, etc. – pour moduler les avantages liés à la proximité géographique (Boschma, 2005). Les avantages liés à la diversité sectorielle (externalités au sens de Jacobs) ont depuis été décomposés en « variété reliée » (i.e. entre industries étroitement liées) et « variété non reliée » (Frenken *et al.*, 2007). La variété reliée mesure la diversité au sein de secteurs définis à un niveau agrégé, c'est-à-dire entre secteurs relativement proches les uns des autres et appartenant au même secteur agrégé, tandis que la variété non reliée mesure la diversité entre secteurs définis à un niveau agrégé, c'est-à-dire entre secteurs (définis de manière large) différents les uns des autres (Mameli *et al.*, 2012). Bien que l'effet potentiel de la variété reliée et non reliée sur la croissance régionale ait été largement examiné de manière empirique¹, il reste quelques questions ouvertes sur l'application de ce concept.

Le présent article aborde cette question en envisageant la mesure dans laquelle les externalités intrasectorielles favorisent la croissance de l'emploi. La plupart des analyses empiriques visant à évaluer la contribution de la variété reliée et non reliée au dynamisme territorial testent la relation

à l'aide de modèles et techniques économiques raisonnant au niveau de l'unité spatiale, excluant ainsi la possibilité d'interactions entre les territoires. D'autres, principalement des études de cas visant à séparer la variété reliée de la variété non reliée, se concentrent sur un territoire particulier ou sur un petit nombre de territoires (Brenet *et al.*, 2019 ; Elouaer-Mrizak & Picard, 2016), ou encore sur des secteurs d'activité spécifiques (Tanner, 2014, entre autres). À notre connaissance, la dimension spatiale de cette famille d'externalités n'a pas encore été explorée. En effet, la pertinence des connaissances extra-régionales pour la croissance régionale est largement ignorée par les travaux menés dans la lignée de ceux de Glaeser et de Henderson, qui se concentrent principalement sur la structure sectorielle régionale (Boschma, 2005).

Cet article vise donc à déterminer si, et dans quelle mesure, la variété (reliée et non reliée) affecte la croissance de l'emploi local, en se concentrant sur la structure sectorielle locale (mesurée au niveau de la zone d'emploi) en France, et en prenant en compte les externalités géographiques afin de tenir compte des interactions potentielles et de la complémentarité entre les activités économiques exercées dans une zone d'emploi donnée et celles exercées dans les autres zones d'emploi. Notre travail distingue ainsi empiriquement la variété locale (également appelée « dimension directe ») et la variété dans le voisinage (également appelée « dimension indirecte »). Pour pousser plus loin l'analyse, il distingue en outre les variétés locale et de voisinage selon l'intensité technologique des secteurs, d'une part, et mène une analyse séparée selon le caractère rural ou urbain des zones d'emploi, d'autre part. À cet égard, certains travaux ont souligné l'importance de tenir compte des spécificités sectorielles pour évaluer l'effet de la variété sur la croissance de l'emploi (Bishop & Grippaios, 2010 ; Boschma & Iammarino, 2009). Hartog *et al.* (2012), par exemple, distinguent les processus d'innovation au sein des secteurs à haute technologie de ceux au sein des secteurs à basse ou moyenne technologie pour expliquer les différences d'effet de la variété reliée sur l'emploi. Il existe d'autres arguments soutenant l'idée selon laquelle les mécanismes à l'œuvre reliant la diversité sectorielle et les variations de l'emploi diffèrent selon les contextes géographiques, selon les caractéristiques des villes ou

1. Frenken *et al.* (2007) pour les Pays-Bas ; Boschma & Iammarino (2009) et Mameli *et al.* (2012) pour l'Italie ; Bishop & Grippaios (2010) pour le Royaume-Uni ; Hartog *et al.* (2012) pour la Finlande ; Boschma *et al.* (2012) pour l'Espagne.

selon que les zones sont rurales ou urbaines (Frenken *et al.*, 2007 ; Duranton & Puga, 2005). Selon Grabner & Modica (2022), la variété reliée a été un facteur de résilience industrielle significatif dans les comtés américains suite à la crise économique de 2008, et cet effet a été essentiellement porté par les comtés ruraux et ceux d'un degré d'urbanité intermédiaire. Notre étude s'appuie sur une base de données originale décrivant les 304 zones d'emploi françaises entre 2004 et 2015. La spécification économétrique s'inspire de celles introduites par Glaeser *et al.* (1992), Henderson *et al.* (1995) et Combes (2000) et innove en tenant compte de la question de la dépendance spatiale. Le modèle de base utilisé dans cette étude distingue la variété reliée et la variété non reliée comme variables indépendantes clés et contrôle pour la densité, les qualifications et le caractère rural ou urbain des zones d'emploi.

Nos analyses confirment que la variété reliée est corrélée positivement avec la croissance de l'emploi. De plus, cette corrélation semble alimentée par la dimension locale (directe) de la variété reliée en période de croissance économique et par sa dimension indirecte (dans le voisinage) en période de crise. Nous constatons aussi que la relation négative entre la variété non reliée et la croissance de l'emploi ne passe que par le canal indirect. Nos résultats montrent également que la relation entre la variété reliée et l'emploi local est conditionnée par les différences entre les zones rurales et urbaines et, dans une certaine mesure, par l'intensité technologique des industries locales.

La contribution centrale de cet article consiste à déterminer quel type de variété influence la croissance de l'emploi et quelle est l'origine de cette influence (interne au territoire ou externe). À notre connaissance, aucune étude antérieure n'a simultanément examiné le lien entre la dynamique d'une unité spatiale d'une part et la structure de son tissu productif ainsi que celle des unités spatiales voisines, d'autre part. Nous étudions également les éventuels changements de régime correspondant à la crise financière mondiale de 2008-2009, en réalisant des estimations séparées pour les périodes situées avant, pendant et après la crise. Enfin, nous établissons des résultats originaux en distinguant nos deux formes de variété, reliée et non reliée, selon l'intensité de recherche et développement (R&D) des secteurs et selon le caractère rural ou urbain de la zone d'emploi.

L'article se poursuit comme suit. La section 1 passe en revue la littérature et les réflexions

théoriques sur les variables d'intérêt. Les données et les variables mobilisées sont détaillées à la section 2. La section 3 présente les résultats ainsi que les tests de robustesse, après quoi nous concluons.

1. Revue de littérature et contexte théorique

Au cours des trois dernières décennies, le débat sur la contribution des différents types d'économies d'agglomération au développement économique local a été continu. Le volume de plus en plus important de littérature sur ce sujet n'est pas sans lien avec le développement de la théorie moderne de la croissance économique (Romer, 1986 ; Lucas, 1988) qui souligne l'importance cruciale des externalités de connaissance dans la croissance économique. Glaeser *et al.* (1992) ont lancé cette branche de la littérature dédiée à l'effet des différents types d'économies d'agglomération sur la croissance économique locale.

En bref, la controverse était de savoir si c'est la spécialisation régionale des activités économiques (externalités au sens de Marshall-Arrow-Romer) ou la diversité régionale (externalités au sens de Jacobs) qui est la plus propice à la bonne performance économique régionale. Toutefois, à ce jour, les résultats empiriques n'ont pas encore abouti à un consensus. On trouve autant d'études en faveur de l'hypothèse de « MAR » qu'en faveur de l'hypothèse de Jacobs (pour une revue récente de la littérature, voir De Groot *et al.*, 2016). Cette variabilité des résultats empiriques peut provenir des concepts théoriques de spécialisation et de diversité² qui ne sont encore pas parfaitement clairs (Content & Frenken, 2016), du niveau de l'agrégation spatiale (municipal, local ou régional), du type de secteurs analysés (industrie manufacturière vs services), du niveau sectoriel d'analyse (nomenclature à deux chiffres ou plus), de l'indicateur de performance économique régional retenu (emploi, productivité totale des facteurs ou productivité du travail, salaires, ou produit intérieur brut), et enfin des cycles de vie des secteurs et du contexte institutionnel (O'Huallachain & Lee,

2. De nombreuses études publiées avant Frenken *et al.* (2007) ont modélisé la diversité régionale à partir de l'indice Herfindahl-Hirschman inversé (Combes *et al.*, 2004 ; Henderson *et al.*, 1995 ; Combes, 2000) sans intégrer à l'analyse la diversité des secteurs reliés. Beaudry & Schiffauerova (2009) soulignent que cela peut entraîner une sous-estimation des externalités de Jacobs et une surestimation des externalités de MAR en raison de la diversité, qui serait simplement mesurée comme une variété non reliée. De plus, l'approche d'entropie (ou indice Shannon) semble préférable à l'indice Simpson/Herfindahl-Hirschman pour mesurer la variété reliée et non reliée (pour une discussion technique, voir Nagendra, 2002).

2011). Récemment, une nouvelle branche de recherche issue du renouvellement conceptuel de l'économie géographique institutionnelle et évolutionniste préconise des approches différenciées pour rendre compte de la façon dont la diversification et la spécialisation affectent la croissance économique régionale (van Oort *et al.*, 2015 ; Boschma, 2005). S'appuyant principalement sur les travaux sur le degré de corrélation entre les technologies utilisées dans les secteurs et la diffusion des connaissances et de l'innovation (Rosenberg & Frischtak, 1983 ; Cohen & Levinthal, 1990 ; Nooteboom, 2000), les chercheurs ont intégré ces concepts dans la littérature sur les externalités d'agglomération et la croissance régionale. Frenken *et al.* (2007) affirment que les externalités au sens de Jacobs mélangent deux formes différentes de variété (variétés reliée et non reliée) qui devraient être distinguées car leurs effets économiques sont différents. Ces auteurs affirment, dans la lignée de Nooteboom (2000), que certains types de connaissances sont plus faciles à recombinaison et peuvent s'étendre à différents secteurs lorsque leur proximité cognitive et leur distance ne sont ni trop petites ni trop grandes. Cette complémentarité entre secteurs est saisie par ce que Frenken *et al.* (2007) appellent la « variété reliée », qui désigne la diversité entre secteurs partageant certaines complémentarités en matière de bases de connaissances, de technologies, d'inputs/outputs ou de compétences, c'est-à-dire la diversité intrasectorielle.

S'agissant de la variété non reliée, entre les secteurs qui ne présentent aucun lien entre eux ou qui présentent des liens ou complémentarités limités (c'est-à-dire la diversité intersectorielle), Frenken *et al.* (2007) estiment qu'elle capte un effet que l'on pourrait appeler « de portefeuille » : ainsi, plus les secteurs non reliés sont nombreux dans une région donnée, plus les chocs spécifiques à un secteur pourront être facilement circonscrits à ce seul secteur (Essletzbichler, 2007). En d'autres termes, la variété non reliée réduit la vulnérabilité locale, augmente la résilience des territoires et limite la hausse du chômage (Content *et al.*, 2019 ; Boschma & Iammarino, 2009).

Plusieurs études empiriques ont été menées au cours des vingt dernières années pour étudier comment les variétés reliée et non reliée expliquent le développement économique régional, en matière de croissance de l'emploi, du chômage et de la productivité, de croissance de la valeur ajoutée et de performance ou capacité en matière d'innovation (pour une synthèse de la littérature, voir Content & Frenken, 2016).

Ces travaux soulignent clairement l'importance de la variété reliée pour expliquer la croissance économique régionale aux Pays-Bas (Frenken *et al.*, 2007), en Espagne (Boschma *et al.*, 2012), en Grande-Bretagne (Bishop & Gripiaios, 2010), en Italie (Mameli *et al.*, 2012 ; Boschma & Iammarino, 2009) et aux États-Unis (Castaldi *et al.*, 2015).

En revanche, l'influence de la variété non reliée est moins clairement démontrée. Si Frenken *et al.* (2007) observent que les régions néerlandaises (niveau NUTS-3) présentant un niveau élevé de variété non reliée entre 1996 et 2002 connaissent une moindre hausse du chômage (effet de portefeuille), d'autres études ne montrent aucune corrélation robuste (Fitjar & Timmermans, 2016 ; van Oort *et al.*, 2015 ; Boschma & Iammarino, 2009).

La figure I représente l'origine conceptuelle, les sources et les moyens de transfert des connaissances qui correspondent à la variété reliée et à la variété non reliée, ainsi que leur effet sur la croissance locale. Chaque type de variété peut être relié à un type particulier de politique publique territoriale. La variété reliée, par exemple, inspire des mesures conçues pour stimuler la performance d'une région par le biais d'une spécialisation accrue dans un ou plusieurs secteurs susceptibles de partager des ressources communes, en particulier techniques et technologiques. Une région pourrait d'abord se spécialiser dans l'industrie automobile puis l'abandonner pour développer son industrie aéronautique, et enfin développer l'ingénierie ferroviaire. Une stratégie de diversification reliée, élaborée en couplant des méthodes quantitatives et qualitatives, pourra promouvoir de nouvelles activités étroitement liées aux activités existantes dans les différentes unités spatiales composant une région. Fonder la politique industrielle sur des mesures de corrélation et d'analyses qualitatives, inspirées par le processus entrepreneurial ou la sérendipité, permet d'identifier les opportunités de diversification. Les tenants de cette démarche affirment que l'alignement des nouvelles activités sur les capacités locales améliore leur taux de survie, ce qui est étayé par un ensemble de faits. En l'absence d'évaluations empiriques, certaines études, comme celle de Balland *et al.* (2019), suggèrent que la diversification reliée pourrait être efficace pour renforcer la complexité des activités dans une région donnée, s'agissant notamment des technologies complexes. Rigby *et al.* (2022) soulignent quant à eux les avantages économiques, montrant que les régions européennes qui se diversifient en faveur d'activités

reliées et complexes ont connu une croissance plus élevée que les autres entre 1981 et 2015.

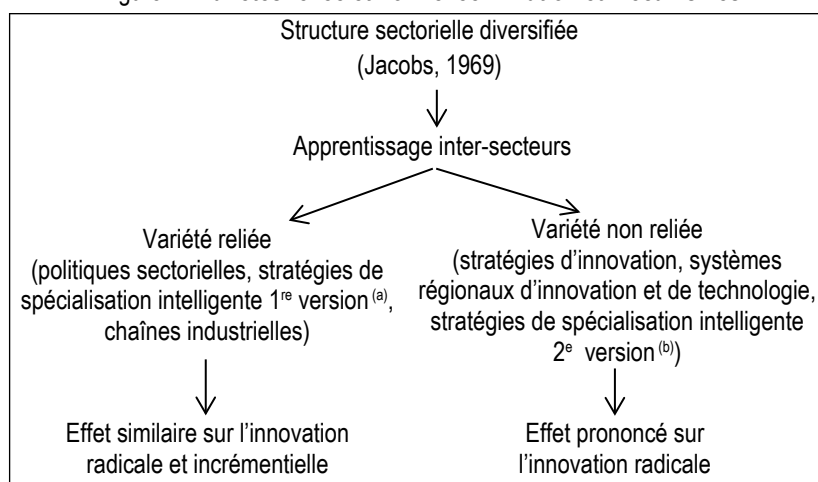
La variété non reliée inspire des politiques publiques qui encouragent le changement structurel dans une zone donnée, via le développement de nouvelles activités non reliées aux industries existantes. C'est le cas lorsqu'une région axée sur les textiles se diversifie en passant à la fabrication d'avions ou à la pharmaceutique. Certains chercheurs prônent des politiques publiques favorisant une diversification non reliée, s'éloignant des compétences locales, mais visant à créer de nouvelles voies de croissance. Cette approche, proposée par Grilitsch *et al.* (2018) puis Janssen & Frenken (2019), revient à combiner des compétences locales non reliées pour favoriser l'innovation. L'accent mis sur la diversification non reliée est motivé par la nécessité d'éviter une dépendance régionale (à des compétences, à des secteurs particuliers), ses partisans affirmant que, pour surmonter les défis du développement économique, il faut instaurer des changements radicaux et développer de nouvelles trajectoires entièrement différentes. En outre, la faible occurrence et la difficulté de la diversification non reliée justifient un soutien gouvernemental, car cela implique de développer de nouvelles capacités et de réduire les distances cognitives, ce qui nécessite une action collective et une intervention politique.

Enfin, à partir des données européennes du *Global Entrepreneurship Monitor* sur les régions (niveaux NUTS 2 et NUTS 1), Content *et al.* (2019) obtiennent des résultats allant dans le sens d'une relation positive entre les variétés

reliée et non reliée et la croissance de l'emploi régional. Ils notent cependant que la création de nouvelles entreprises atténue la relation entre la variété non reliée et la croissance de l'emploi, mais pas celle entre la variété reliée et la variation de l'emploi. Ce résultat suggère que les aspects technologiques ne sont pas les seuls éléments qui déterminent la relation entre la variété et la dynamique régionale ; l'entrepreneuriat compte aussi.

Par conséquent, l'examen des aspects directs et de voisinage de la corrélation offre de nouvelles perspectives sur la nature des externalités des deux types de variété. Les récentes discussions des universitaires sur la fonction de production de connaissances ont suggéré l'importance de la proximité géographique pour la création et la diffusion de connaissances (Boschma, 2005 ; Buzard *et al.*, 2020 ; Baland & Boschma, 2021). Par exemple, dans une étude portant sur cinq secteurs manufacturiers et 853 comtés métropolitains aux États-Unis, Kekezi *et al.* (2022) mettent en lumière le rôle des débordements de connaissance interrégionaux et soulignent que les débordements intrasectoriels et intersectoriels au sein d'un comté sont des facteurs déterminants importants de la production de connaissances. L'hypothèse sous-jacente est que l'accès aux connaissances extrarégionales permet d'éviter la dépendance régionale. Ainsi, la complémentarité ou la proximité cognitive entre la base de connaissances locale et les sources de connaissance externes contribue également à la croissance économique et à l'innovation au niveau de la région.

Figure I – Variétés reliée et non reliée : filiation et mécanismes



Note : ^(a) les régions ne devraient pas partir de zéro lorsqu'elles développent de nouveaux domaines d'activité. Elles devraient au contraire promouvoir la fertilisation croisée des connaissances et des idées entre les domaines (Frenken *et al.*, 2007). ^(b) Selon cette version, les politiques régionales devraient reposer sur une diversification non reliée plutôt que reliée afin d'éviter la dépendance régionale et de promouvoir un changement radical dans les régions (Frenken, 2017 ; Grilitsch *et al.*, 2018 ; Janssen & Frenken, 2019).

Source : Boschma, 2017 ; Quatraro & Usai, 2017.

2. Données, variables et analyse descriptive

2.1. Données et définition des variables

Nous utilisons la base de données Connaissance locale de l'appareil productif (Clap), fournie par l'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee), décrivant les zones d'emploi, pour la période comprise entre 2004 et 2015. La base de données Clap est un système d'information alimenté par diverses sources administratives (Sirene, DADS, Urssaf et Siasp). Depuis 2003, elle fournit des données localisées sur l'emploi salarié et les rémunérations à un niveau géographique fin (commune). Elle couvre la France entière et les secteurs d'activité marchand et non marchand. Nous utilisons ces données agrégées au niveau de la zone d'emploi (selon le découpage de 2010, voir Aliaga (2015) pour des informations plus détaillées) et à différents niveaux sectoriels. Notre étude porte sur les zones d'emploi de France métropolitaine (les zones situées dans les départements d'outre-mer sont exclues de notre analyse³) et incluent les zones urbaines comme rurales. Une zone d'emploi est un espace géographique au sein duquel la majeure partie de la population active réside et travaille. La France métropolitaine comporte 304 zones d'emploi. Ce découpage est retenu, d'une part, parce qu'il est fonctionnel (voir par exemple Broekel & Binder, 2007) et, d'autre part, parce que les zones d'emploi sont beaucoup plus homogènes que les unités politiques ou administratives. Il rend en outre possible l'analyse spatiale dans la mesure où il couvre l'ensemble du territoire.

2.1.1. Variable dépendante

Notre variable dépendante est la croissance de l'emploi (*Croissance*). Elle est définie comme étant la variation du nombre total de salariés travaillant dans une zone d'emploi i ($i=1, \dots, I$) au cours de la période considérée :

$$Croissance_{i,t'} = \log(E_{i,t'}) - \log(E_{i,t})$$

où E est l'emploi, t le début de la période et t' la fin.

2.1.2. Variables indépendantes

Suivant Frenken *et al.* (2007) et les travaux connexes ultérieurs, nous utilisons deux indicateurs de la diversité sectorielle régionale : la variété reliée et la variété non reliée. Pour construire ces variables, nous nous appuyons sur l'emploi sectoriel décrit au niveau détaillé (à cinq chiffres) de la nomenclature d'activités française (NAF rév. 2, 2008). À quelques exceptions près,

cette nomenclature correspond à la NACE rév. 2 (nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne), qui découle elle-même de la classification internationale type, par industrie (CITI). Les indicateurs de variété reliée et de variété non reliée sont nos principales variables indépendantes. Ils ont été construits à l'aide d'une mesure d'entropie fondée sur la fonction de Shannon. L'entropie saisit la diversité des activités économiques d'une zone en mesurant la différence ou le désordre par rapport à une répartition uniforme de l'emploi dans tous les secteurs. L'entropie de la variété reliée rend compte de la diversité au sein des (grands) secteurs, tandis que l'entropie de la variété non reliée rend compte de la diversité entre les (grands) secteurs.

Autrement dit, l'indicateur de variété reliée (*RelVar*) capte la diversité des secteurs reliés entre eux. Dans notre cas, les secteurs reliés entre eux sont les secteurs détaillés à cinq chiffres (niveau des sous-classes de la NAF) appartenant au même secteur agrégé à deux chiffres (niveau des divisions de la NAF). Cet indicateur correspond à la somme pondérée des entropies, mesurées au niveau à cinq chiffres, des secteurs à deux chiffres, soit :

$$RelVar_i = \sum_{g=1}^G P_{g,i} H_{g,i}$$

où $H_{g,i}$ est le degré d'entropie (ou variété) au sein du secteur à deux chiffres g de la zone d'emploi i . $H_{g,i}$ est calculé ainsi :

$$H_{g,i} = \sum_{j \in S_g \text{ avec } P_{j,i} > 0} \frac{P_{j,i}}{P_{g,i}} \log_2 \left(\frac{1}{\frac{P_{j,i}}{P_{g,i}}} \right)$$

où $P_{g,i}$ est la part de salariés travaillant dans le secteur à deux chiffres g (niveau A88) par rapport à l'emploi total dans la zone d'emploi i et $P_{j,i}$ est le ratio du nombre de salariés travaillant dans le secteur à cinq chiffres j (avec $j=1, \dots, J$) au sein du secteur à deux chiffres S_g , par rapport à l'emploi total dans la zone d'emploi i . Nous avons donc :

$$P_{g,i} = \sum_{j \in S_g} P_{j,i}$$

L'indicateur de variété reliée prend ses valeurs entre 0 (lorsque l'emploi dans chaque secteur à deux chiffres est concentré dans un seul de ses secteurs à cinq chiffres) et $\log_2(J) - \log_2(G)$ (si la part de salariés de tous les secteurs à cinq chiffres d'un secteur à deux chiffres est la même – pour des informations plus détaillées

3. Ces zones ne sont pas prises en compte en raison de leur distance géographique par rapport à la France métropolitaine (trop éloignées de la métropole et, dans quelques cas, géographiquement isolées).

sur le calcul, voir Theil, 1972). Sachant que notre étude distingue 732 secteurs au niveau cinq chiffres (J) au sein de 88 secteurs à deux chiffres (G), notre indicateur a pour borne supérieure théorique 3,06.

L'indicateur de variété non reliée (*UnrelVar*) capte la diversité entre secteurs à deux chiffres, ou diversification intersectorielle. Il est calculé comme étant l'entropie mesurée au niveau des secteurs à deux chiffres (NAF en 88 divisions) :

$$UnrelVar_i = \sum_{g=1}^G P_{g,i} \log_2 \left(\frac{1}{P_{g,i}} \right).$$

avec $P_{g,i} > 0$

Il varie entre 0 (concentration de l'emploi dans un seul secteur à deux chiffres) à $\log_2(G)$ (tous les secteurs emploient le même nombre de salariés). Notre analyse distinguant 88 secteurs à deux chiffres, la borne supérieure de l'indicateur de variété non reliée est de 6,46.

Nous décomposons ensuite ces deux indicateurs en fonction de l'intensité de R&D des secteurs (voir la figure A1 de l'annexe). Nous utilisons la classification des activités économiques selon l'intensité de R&D de l'OCDE (Galindo-Rueda & Verger, 2016) pour l'industrie manufacturière et pour les autres secteurs⁴. Nous distinguons donc, d'une part, la variété reliée dans les secteurs à haute technologie et la variété reliée dans les secteurs à basse ou moyenne technologie et d'autre part, la variété non reliée dans les secteurs à haute technologie et la variété non reliée dans les secteurs à basse ou moyenne technologie. Cela nous permet de déterminer si la relation entre les variétés reliée et non reliée et la croissance de l'emploi dépend de l'intensité technologique des industries locales (Hartog *et al.*, 2012).

La fabrication de machines et équipements (division 28 de la NAF) est celle qui contribue le plus à la variété reliée et à la variété non reliée dans les secteurs à haute technologie. Elle est suivie par l'industrie automobile (NAF 29), l'industrie chimique (NAF 20) et le secteur de la programmation, du conseil et des autres activités informatiques (NAF 62), mais pas dans le même ordre ni dans la même proportion selon qu'il s'agit de contribuer à la variété reliée ou non reliée. S'agissant de la variété reliée dans les secteurs à basse ou moyenne technologie, le commerce de gros (NAF 46), le commerce de détail (NAF 47) et les travaux de construction spécialisés (NAF 43) sont les trois secteurs qui y contribuent le plus. S'agissant enfin de la variété non reliée dans les secteurs à basse ou moyenne technologie, l'administration publique

et défense, sécurité sociale obligatoire (NAF 84), l'enseignement » (NAF 85), les activités pour la santé humaine (NAF 86), l'hébergement médico-social et social (NAF 87 et l'action sociale sans hébergement (NAF 88) apportent la plus grande contribution.

2.2. Principales statistiques descriptives

Les statistiques descriptives des variables utilisées dans l'analyse sont reportées dans le tableau 1. Notre variable dépendante est le taux de croissance de l'emploi entre 2004 et 2015, une période marquée par la crise financière mondiale de 2008. Or, la relation entre la variété et la croissance de l'emploi peut être différente selon que l'on se trouve en période de croissance ou en période de récession. Selon Bishop & Grippaios (2010), l'influence de la structure industrielle est plus marquée au cours des phase de repli économique durant lesquelles la relation entre variété et croissance de l'emploi est visiblement perturbée. Nous avons donc divisé la période d'étude en trois sous-périodes : la première (2004-2008) précède la crise de 2008, la deuxième (2008-2012) couvre la phase de crise et la troisième (2011-2015) couvre la période après la crise. Nous menons l'analyse séparément pour chacune de ces trois sous-périodes⁵.

La partie supérieure de la figure II représente la croissance de l'emploi dans chaque zone d'emploi sur les trois périodes. De façon générale, pour les trois sous-périodes, les territoires « gagnants » sont situés plutôt à l'ouest et au sud, tandis que les territoires en déclin se situent plutôt dans l'axe nord-est et sud-ouest. La période 2004-2008 se caractérise par un support plus large de la distribution des taux de croissance (ils varient de -0,13 à +0,48) par rapport à la période 2008-2012 (de -0,13 à +0,16) et à la période 2011-2015 (de -0,13 à +0,11). Cette moindre variabilité des taux de croissance coïncide avec un ralentissement économique généralisé dans le pays.

4. Sur la base de la nomenclature NAF à deux ou trois chiffres, les secteurs à haute technologie comprennent les secteurs suivants de l'industrie manufacturière : Aéronefs et engins spatiaux (30.3), Industrie pharmaceutique (21), Fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques (26), Armes et munitions (25.4), Industrie automobile (29), Industrie chimique (20), Fabrication d'équipements électriques (27), Fabrication de machines et équipements (28), Construction de locomotives et d'autre matériel ferroviaire roulant (30.2), Construction de véhicules militaires de combat (30.4), Fabrication de matériels de transport (30.9), Fabrication d'instruments et de fournitures à usage médical et dentaire (32.5), ainsi que les secteurs hors industrie manufacturière suivants : Recherche-développement scientifique (72), Édition de logiciels (58.2), Programmation, conseil et autres activités informatiques (62), Services d'information (63). Les autres secteurs sont inclus dans les secteurs à basse ou moyenne technologie (y compris les secteurs tels que l'administration publique, l'éducation et la santé humaine).

5. Les données Clap ne sont pas disponibles après 2015. Pour que les trois périodes aient une durée égale (de quatre ans), la deuxième période (2008-2012) et la troisième (2011-2015) se chevauchent.

Tableau 1 – Statistiques descriptives

Variable	Moyenne	Écart-type	Min	Max
Croissance de l'emploi local 2004-2008	0,01	0,05	-0,13	0,48
Croissance de l'emploi local 2008-2012	-0,02	0,04	-0,13	0,16
Croissance de l'emploi local 2011-2015	-0,01	0,03	-0,13	0,11
Caractéristiques de la zone d'emploi en 2004 :				
Variété reliée	1,87	0,27	1,09	2,37
Variété reliée des secteurs à haute technologie	0,06	0,05	0,00	0,26
Variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie	1,80	0,25	1,07	2,28
Variété non reliée	4,84	0,23	3,63	5,31
Variété non reliée des secteurs à haute technologie	0,36	0,20	0,00	1,06
Variété non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie	4,46	0,21	3,44	4,84
Densité	3,31	1,01	0,88	8,55
Proportion de cadres	0,13	0,03	0,09	0,32
Caractéristiques de la zone d'emploi en 2008 :				
Variété reliée	1,95	0,24	1,18	2,40
Variété reliée des secteurs à haute technologie	0,06	0,05	0,00	0,27
Variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie	1,88	0,22	1,15	2,34
Variété non reliée	4,87	0,21	3,98	5,34
Variété non reliée des secteurs à haute technologie	0,36	0,20	0,02	0,99
Variété non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie	4,51	0,19	3,63	4,89
Densité	3,32	1,01	1,03	8,58
Proportion de cadres	0,13	0,03	0,08	0,32
Caractéristiques de la zone d'emploi en 2011 :				
Variété reliée	1,96	0,24	1,13	2,42
Variété reliée des secteurs à haute technologie	0,05	0,05	0,00	0,25
Variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie	1,91	0,22	1,11	2,38
Variété non reliée	4,85	0,20	4,04	5,31
Variété non reliée des secteurs à haute technologie	0,34	0,19	0,01	0,97
Variété non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie	4,51	0,18	3,73	4,90
Densité	3,31	1,01	0,96	8,59
Proportion de cadres	0,11	0,03	0,06	0,31
Observations	304	304	304	304

Source : Insee, Clap 2004-2015. Calcul des auteurs.

Le milieu et le bas de la figure II représentent la variété reliée et la variété non reliée dans chaque zone d'emploi en 2008 et en 2011 respectivement. Comme les cartes le montrent, les deux mesures de variété, de même que l'entropie totale, somme de la variété reliée et de la variété non reliée⁶, n'ont pas la même répartition régionale. La variété reliée est plus élevée dans les zones d'emploi urbaines que dans les zones d'emploi rurales, tandis que la variété non reliée semble répartie de façon plus homogène, que ce soit en 2008 ou en 2011⁷. La plupart des zones

où le niveau d'entropie totale est élevé sont aussi des zones où la variété reliée est de niveau élevé. C'est le cas, par exemple, des zones d'emploi

6. La décomposabilité de l'entropie implique que l'entropie mesurée au niveau des secteurs fins (cinq chiffres) est égale à la somme de la variété reliée (somme pondérée des entropies mesurées au niveau fin pour chaque grand secteur - deux chiffres) et de la variété non reliée (entropie au niveau des grands secteurs - deux chiffres).

7. Si nous lisons ces résultats en ayant en mémoire les cartes de la variété reliée et de la récente croissance de l'emploi, on peut établir certaines similitudes pour les valeurs élevées, en particulier dans le sud-est et le centre de la France (Lyon, Issoire, Annecy et Bourg-en-Bresse), à l'ouest (Nantes et Les Herbiers), ainsi que dans les régions du sud-ouest (Bordeaux, Bayonne et La Teste-de-Buch).

de Lyon, Nantes, Tours et Bordeaux. La comparaison des cartes de la variété non reliée et de l'entropie montre quelques différences : les zones où la variété non reliée est élevée sont plutôt des zones d'entropie totale de niveau intermédiaire. Au contraire, la plupart des zones où les niveaux sont faibles sont rurales (la Lozère, Pontivy et Villeneuve-sur-Lot) même si ce groupe comprend également quelques zones à densité de population plus élevée, telles qu'Avignon, Créteil, Quimper, Lorient et Orly. Enfin, la corrélation entre les variétés reliée et non reliée est relativement élevée (0,58). Cette valeur est proche des niveaux obtenus par Aarstad *et al.* (2016) à partir des données norvégiennes et par Content *et al.* (2019) pour 204 régions européennes.

Le tableau S1 de l'Annexe en ligne (lien de l'Annexe en ligne à la fin de l'article) présente la matrice de corrélation des variables de contrôle utilisées dans notre analyse pour chacune des trois périodes. Globalement, l'analyse de ces corrélations ne révèle pas de multicolinéarité entre ces variables.

3. Stratégie d'estimation et principaux résultats

3.1. Méthode d'estimation

Pour estimer la relation entre la variété du tissu économique et la croissance de l'emploi régional, il est essentiel de prendre en compte différents types d'interaction spatiale. En règle générale, trois types d'interaction différents peuvent expliquer pourquoi une observation relative à une zone spécifique peut dépendre d'observations relatives à des zones voisines :

- une interaction dite endogène, lorsque la valeur de la variable dépendante d'une zone géographique est déterminée conjointement avec celle des zones voisines ;
- une interaction dite exogène, lorsque la valeur de la variable dépendante d'une zone géographique dépend des caractéristiques observables des zones voisines ;
- un effet d'interaction entre les termes d'erreur, en raison de variables omises du modèle qui sont spatialement autocorrélées.

Ces trois formes d'interaction sont issues d'un modèle de regroupement spatial général, ou modèle de Manski (1993). Le modèle de Manski est moins utilisé dans les travaux empiriques car, d'une part, sa faible identifiabilité conduit à estimer très imprécisément les paramètres (Elhorst, 2014) et, d'autre part, il est souvent

sur-paramétré (Burridge *et al.*, 2016). La solution privilégiée dans la littérature empirique consiste à ne pas tenir compte de l'une des trois formes de corrélation spatiale, solution que nous adoptons. Nous appliquons un modèle à erreur spatiale de Durbin (*Spatial Durbin Error Model* – SDEM), dans lequel la variable dépendante est influencée par les variables indépendantes, les variables indépendantes spatialement décalées et la corrélation spatiale du terme d'erreur.

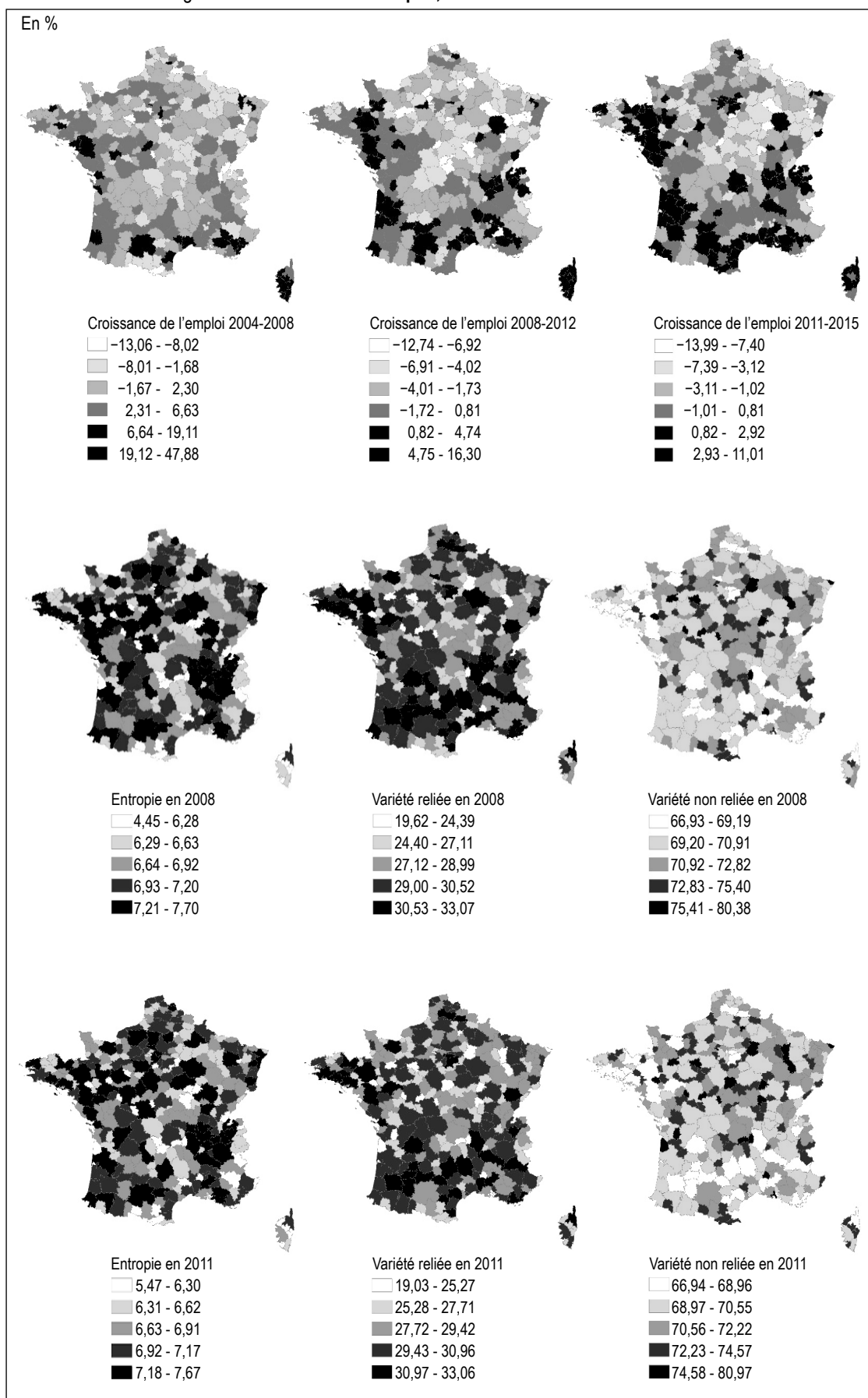
$$\begin{aligned} Croissance_{i,t+4} = & a_0 + \alpha_1 RelVar_{i,t} + \alpha_2 UnrelVar_{i,t} \\ & + \alpha_3 Control_{i,t} + \theta_1 RelVar_{w_i,t} \\ & + \theta_2 UnrelVar_{w_i,t} + \theta_3 Control_{w_i,t} + u_{i,t} \quad (1) \\ \text{et } u_{i,t} = & \lambda u_{w_i,t} + \varepsilon_{i,t}, \end{aligned}$$

où $Croissance_{i,t+4}$ est l'évolution de l'emploi dans la zone d'emploi i entre l'année t et l'année $t+4$, $RelVar_{i,t}$ et $UnrelVar_{i,t}$ sont respectivement la variété reliée et la variété non reliée dans la zone d'emploi i l'année t , w_i représente le voisinage de la zone d'emploi i . a_0, α_1, α_2 et $\alpha_3, \theta_1, \theta_2$ et θ_3 , les effets d'interaction de voisinage, et λ , l'effet d'interaction entre les erreurs, sont des paramètres inconnus à estimer. Enfin, ε est un vecteur d'erreurs. Outre nos variables d'intérêt, *Control* est un ensemble de variables de contrôle choisies en raison de leur importance dans la dynamique de l'emploi. Afin de prendre en compte les économies d'urbanisation, nous contrôlons par la densité de l'emploi⁸. L'hypothèse sous-jacente est que les zones urbanisées favorisent les externalités de connaissances locales et la formation de liens, et que l'offre de biens publics y est plus importante (Combes, 2000 ; Mameli *et al.*, 2008 ; Paci & Usai, 2008). Nous nous attendons à ce que la croissance de l'emploi soit plus forte dans les zones les plus denses en emploi. Nous contrôlons également par le niveau local de qualification de la main-d'œuvre, mesuré par la part de cadres et professions intellectuelles supérieures dans la population active locale⁹. La disponibilité d'une population active hautement qualifiée dans une région s'avère hautement cruciale pour la croissance de l'emploi local car cette catégorie est susceptible de contribuer aux activités d'innovation et à la croissance (Paci & Usai, 2008 ; van Oort *et al.*, 2015). Récemment, dans une étude portant sur 204 régions européennes, Content *et al.* (2019) ont souligné que le niveau d'éducation rendait bien compte de la capacité à détecter et à exploiter les

8. La densité de l'emploi est calculée comme le logarithme du nombre de salariés travaillant dans la zone d'emploi par kilomètre carré (km²).

9. Groupe 3 de la nomenclature des professions et catégories socioprofessionnelles (PCS). Pour la composition de ce groupe, voir : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/pcs2020/groupeSocioprofessionnel/1?champRecherche=true>

Figure II – Croissance de l'emploi, variété reliée et variété non reliée



Source : Insee, Clap 2004-2015. Calcul des auteurs.

opportunités commerciales potentielles, ainsi que des compétences en la matière. La matrice de poids spatiale W utilisée dans l'estimation économétrique est la matrice de distance spatiale inverse standardisée en ligne (avec un point de coupure)¹⁰.

3.2. Résultats

Cette section présente les résultats des estimations réalisées séparément sur chacune des trois périodes (avant la crise de 2008, pendant la crise et après la crise). Les diagnostics de dépendance spatiale de l'estimation du modèle par les MCO sont reportés dans la partie inférieure des tableaux de résultats. Quelle que soit la période, l'indice I de Moran sur les résidus de la régression est très significatif. Les modèles ont été estimés par maximum de vraisemblance avec des écarts-types robustes calculés selon la méthode White. Le facteur d'inflation de la variance (*Variance Inflation Factor* – VIF) est toujours inférieur à 2,77, ce qui signifie qu'il n'y a pas de problème de multicollinéarité entre nos variables (voir par exemple par O'Brien, 2007). La signification globale de nos estimations est bonne et le R^2 des modèles spatiaux est compris entre 9 % et 31 %.

Les résultats sont présentés séparément pour trois périodes : avant la crise (2004-2008), pendant la crise (2008-2012) et après la crise (2011-2015). Nous procédons à des tests d'hétérogénéité et réalisons également des estimations séparément pour les zones rurales et les zones urbaines¹¹. Nous réalisons également des estimations en excluant les zones d'emploi de la région Île-de-France. Cette région est en effet très spécifique en raison de l'importance de son poids dans l'emploi en France (près de 23 % en 2015).

L'analyse séparée des zones rurales et des zones urbaines se justifie parce que ces zones diffèrent dans de nombreuses dimensions, comme la structure du tissu productif, le capital humain, les institutions, l'histoire, l'organisation et l'aménagement de l'espace, la géographie, etc. Certains articles de la littérature ont pris en compte ces différences. Par exemple, Duranton & Puga (2005) soulignent que les grandes villes se spécialisent dans les services aux entreprises, tandis que les zones rurales le sont plus dans l'industrie. van Oort *et al.* (2015) ont étudié 205 petites, moyennes et grandes régions européennes et n'ont observé une corrélation positive entre la variété reliée et la croissance de l'emploi que dans les petites et moyennes.

3.2.1. Résultats pour la période précédant la crise

Le tableau 2 présente les estimations des effets directs et de voisinage des variétés reliée et non reliée sur la croissance de l'emploi local. La variété reliée locale et, dans une moindre mesure, la variété reliée du voisinage, sont corrélées positivement avec la croissance de l'emploi au cours de la période 2004-2008 (modèle 1). Ces résultats sont cohérents avec ceux d'études antérieures montrant une relation positive entre la variété reliée et la dynamique de l'emploi (Frenken *et al.*, 2007 ; Wixe & Andersson, 2017 ; van Oort *et al.*, 2015). Cette relation peut passer par les entreprises, comme le soulignent Cainelli *et al.* (2016) dans le cadre de leur analyse microéconomique : une variété reliée plus forte augmente la capacité d'innovation des entreprises et, par suite, leur productivité, ce qui aboutit à un taux de croissance de l'emploi plus élevé. Ces résultats sont inchangés si l'on utilise une autre matrice de poids spatiaux (voir les modèles 1 et 2 dans le tableau S2 de l'Annexe en ligne). Cependant, la variété non reliée locale ne semble pas corrélée avec la croissance de l'emploi. Ce résultat est également obtenu par Cortinovis & van Oort (2015) dans leur étude sur 260 régions européennes (niveau NUTS 2). En revanche, la variété non reliée du voisinage semble avoir une influence négative sur la dynamique de l'emploi local.

Lorsque nous ajoutons des variables de contrôle (modèle 2), nous constatons que la densité de l'emploi, en tant qu'indicateur des économies d'urbanisation, et le niveau de qualification ont respectivement une influence négative et une influence positive. Ces résultats sont conformes à la plupart des résultats présentés dans la littérature sur la croissance régionale (Frenken *et al.*, 2007 ; Hartog *et al.*, 2012 ; Deidda *et al.*, 2006). Combes (2000) considère que ce coefficient négatif de la densité de l'emploi reflète des effets de congestion (loyer foncier élevé, congestion des infrastructures et des transports, etc.) qui engendrent des externalités négatives sur la croissance de l'emploi local. S'agissant de la main-d'œuvre qualifiée, dans une analyse

10. Nous définissons les zones d'emploi comme « voisines » lorsque la distance qui sépare leur barycentre est inférieure à 67,5 km. Le poids utilisé dans la matrice spatiale est la distance inverse entre les zones. Si la distance entre les unités est supérieure à 67,5 km, ce poids est fixé à zéro. Comme dans la plupart des études appliquées, la matrice de distance inverse est standardisée en ligne (chaque élément de la ligne i est divisé par la somme des éléments de la ligne i), de sorte que l'incidence des zones voisines est égalisée.

11. Les zones d'emploi sont classées comme urbaines ou rurales en fonction de leur densité de population. Les zones dont la densité de population est égale ou supérieure au premier quartile (47,91 habitants par km²) sont considérées comme urbaines, les autres sont considérées comme rurales.

exhaustive de 784 marchés du travail locaux en Italie, Paci & Usai (2008) soulignent qu'un nombre plus élevé de travailleurs diplômés dans une région favorise l'innovation et la diffusion des connaissances et, par conséquent, la croissance locale. Enfin, nous trouvons que plus le

niveau de qualification des emplois est élevé dans les zones voisines, plus la croissance de l'emploi est faible.

Si l'on décompose la variété reliée et la variété non reliée en fonction de l'intensité de R&D

Tableau 2 – Croissance de l'emploi entre 2004 et 2008

Variable dépendante : Croissance de l'emploi 2004-2008	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4 (zones rurales)	Modèle 5 (zones urbaines)	Modèle 6 (sans la région IdF)
Caractéristiques de la zone d'emploi en 2004 :						
Variété reliée	0,047*** (0,013)	0,039*** (0,014)		0,078*** (0,030)	0,029** (0,014)	0,051*** (0,014)
Variété non reliée	-0,014 (0,017)	-0,017 (0,017)		-0,140*** (0,038)	0,030* (0,017)	-0,024 (0,017)
Densité		-0,013** (0,005)				
Part de cadres		0,714*** (0,121)				
Variété reliée des secteurs à haute technologie			0,213** (0,095)			
Variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			0,044*** (0,015)			
Variété non reliée des secteurs à haute technologie			-0,065** (0,027)			
Variété non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			-0,017 (0,019)			
Caractéristiques des zones voisines en 2004 :						
Variété reliée	0,015 (0,025)	0,010 (0,025)		-0,048 (0,060)	0,045* (0,027)	0,046 (0,029)
Variété non reliée	-0,064** (0,026)	-0,055** (0,026)		-0,031 (0,064)	-0,076*** (0,026)	-0,080*** (0,029)
Densité		0,011 (0,007)				
Part de cadres		-0,490** (0,202)				
Variété reliée des secteurs à haute technologie			0,118 (0,227)			
Variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			0,046 (0,032)			
Variété non reliée des secteurs à haute technologie			-0,093 (0,058)			
Variété non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			-0,084** (0,038)			
Constante	0,269*** (0,095)	0,242** (0,107)	0,339** (0,168)	0,771*** (0,260)	0,0953 (0,121)	0,331** (0,130)
lambda	0,346*** (0,078)	0,377*** (0,075)	0,338*** (0,079)	0,645*** (0,181)	0,281** (0,110)	0,357*** (0,080)
Observations	304	304	304	76	228	285
I de Moran	6,725***	7,043***	6,706***			
R ²	0,133	0,206	0,135	0,309	0,115	0,123
Vraisemblance	490,660	507,180	491,993	106,285	415,011	460,255
Prob > chi2	0,000	0,000	0,0001	0,000	0,000	0,000

Note : les erreurs standard sont indiquées entre parenthèses. ***, **, * = significatif au seuil de 1 %, 5 % et 10 %, respectivement.
Source : Insee, Clap 2004-2015. Calcul des auteurs.

des secteurs, on observe que les variétés reliées respectives des secteurs à haute technologie et des secteurs à basse ou moyenne technologie sont corrélées positivement avec la croissance de l'emploi (modèle 3). Cette constatation est quelque peu différente du résultat obtenu par Hartog *et al.* (2012), qui n'observent un effet positif de la variété reliée parmi les secteurs à haute technologie qu'en Finlande. Le modèle 3 montre également que plus la variété non reliée des secteurs à haute technologie est élevée, plus la croissance de l'emploi est faible. La variété non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie des zones voisines renforce la corrélation négative avec la croissance de l'emploi.

Dans les zones urbaines comme dans les zones rurales nous observons une corrélation positive de la variété reliée avec la croissance de l'emploi (modèles 4 et 5), ainsi que dans l'ensemble des zones d'emploi une fois exclues les 19 zones d'emploi de l'Île-de-France, dont 10 sont rurales et 9 sont urbaines (modèle 6). S'agissant des effets de voisinage, la variété reliée du voisinage est corrélée positivement avec la croissance de l'emploi dans les zones urbaines (modèle 5) et la variété non reliée du voisinage corrélée négativement avec la croissance de l'emploi dans tous les modèles sauf le cinquième portant sur les zones rurales.

3.2.2. Résultats concernant la période de crise

Le tableau 3 fournit les mêmes résultats que le tableau 2 mais pour la période 2008-2012, c'est-à-dire pendant la période de crise mondiale. Le tableau montre que la variété reliée du voisinage est corrélée positivement avec la croissance de l'emploi (modèle 1), ce qui nous pousse à dire que la crise a renforcé l'interdépendance entre les zones d'emploi (Cousquer, 2022). Ce résultat confirme que la proximité cognitive entre les secteurs reliés d'une zone donnée et les secteurs reliés des zones d'emploi voisines augmente les opportunités d'échanges et facilite l'apprentissage interactif entre les secteurs, ce qui finit par favoriser la croissance de l'emploi. Ce résultat empirique est cohérent avec ceux de Boschma & Iammarino (2009), qui soulignent que la croissance de l'emploi d'une région ne provient pas uniquement de bonnes interconnexions avec les autres ou des flux de connaissance provenant de l'extérieur. Selon ces auteurs, la proximité cognitive entre les connaissances extrarégionales et la base de connaissances d'une région importe également pour créer des possibilités d'apprentissage favorables à la croissance de l'emploi régional.

De plus, le niveau de variété non reliée du voisinage est corrélé négativement avec la croissance de l'emploi. Le modèle 3 suggère que cette corrélation découle de la variété non reliée des secteurs à haute technologie dans les zones voisines. S'agissant des autres interactions de voisinage, le niveau de variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie est corrélé positivement avec la croissance de l'emploi.

En faisant la distinction entre les zones rurales (modèle 4) et les zones urbaines (modèle 5), nous observons que la variété non reliée est corrélée positivement avec la croissance de l'emploi uniquement dans les zones urbaines. S'agissant des liens avec le voisinage, nos résultats montrent une corrélation positive de la variété reliée du voisinage et une corrélation négative de la variété non reliée du voisinage avec l'emploi local dans les zones urbaines, et aucune corrélation significative dans les zones rurales. Ce dernier résultat est également vérifié lorsque nous excluons la région Île-de-France de l'analyse (modèle 6).

3.2.3. Résultats sur la période post-crise et comparaisons intertemporelles

Les estimations de nos modèles pour la période après la crise (tableau 4) sont proches de celles de la période avant la crise. S'agissant des effets directs, nous observons trois similitudes entre les deux périodes : la variété reliée totale, la variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie et la part des emplois de cadre sont corrélées positivement avec la croissance de l'emploi. S'agissant des effets de voisinage, nous n'observons qu'une seule similitude : une corrélation négative de la variété non reliée du voisinage avec la croissance de l'emploi. En outre, au cours de la période post-crise, nous observons une corrélation négative de la variété non reliée du voisinage et une corrélation positive de la variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie du voisinage avec la croissance de l'emploi local. Ce dernier résultat est également observé pendant la période de crise.

S'agissant des zones d'emploi urbaines, les résultats sont les mêmes que pour la période précédant la crise pour la variété reliée locale. Concernant les effets de voisinage, la variété reliée du voisinage joue un rôle positif et la variété non reliée un rôle négatif (modèle 5), tout comme pendant dans la période de crise. Dans le modèle 6 qui exclut la région Île-de-France, nous retrouvons les mêmes résultats que le modèle 5 pour les effets de voisinage.

Tableau 3 – Croissance de l'emploi entre 2008 et 2012

Variable dépendante : Croissance de l'emploi 2008-2012	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4 (zones rurales)	Modèle 5 (zones urbaines)	Modèle 6 (sans la région IdF)
Caractéristiques de la zone d'emploi en 2008 :						
Variété reliée	0,012 (0,010)	0,007 (0,011)		0,000 (0,020)	0,014 (0,012)	0,013 (0,010)
Variété non reliée	0,0017 (0,012)	-0,006 (0,012)		-0,061** (0,027)	0,015 (0,013)	-0,002 (0,012)
Densité		0,002 (0,003)				
Part de cadres		0,134* (0,081)				
Variété reliée des secteurs à haute technologie			0,017 (0,067)			
Variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			0,008 (0,012)			
Variété non reliée des secteurs à haute technologie			-0,003 (0,019)			
Variété non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			0,010 (0,015)			
Caractéristiques des zones voisines en 2008 :						
Variété reliée	0,070*** (0,024)	0,074*** (0,026)		0,025 (0,042)	0,064** (0,025)	0,064*** (0,024)
Variété non reliée	-0,073*** (0,024)	-0,060** (0,025)		-0,049 (0,044)	-0,078*** (0,024)	-0,067*** (0,024)
Densité		-0,008 (0,006)				
Part de cadres		0,024 (0,192)				
Variété reliée des secteurs à haute technologie			0,126 (0,168)			
Variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			0,050* (0,027)			
Variété non reliée des secteurs à haute technologie			-0,092** (0,043)			
Variété non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			-0,036 (0,033)			
Constante	0,168 (0,115)	0,146 (0,126)	0,018 (0,158)	0,461** (0,190)	0,134 (0,117)	0,166 (0,116)
lambda	0,515*** (0,065)	0,516*** (0,0651)	0,510*** (0,0656)	0,676*** (0,165)	0,470*** (0,094)	0,531*** (0,066)
Observations	304	304	304	76	228	285
I de Moran	9,500***	9,803***	9,424***			
R ²	0,099	0,118	0,106	0,253	0,086	0,096
Vraisemblance	620,110	623,381	620,938	144,560	478,332	586,857
Prob > chi2	0,016	0,015	0,081	0,026	0,001	0,036

Note : les erreurs standard sont indiquées entre parenthèses. ***, **, * = significatif au seuil de 1 %, 5 % et 10 %, respectivement.
Source : Insee, Clap 2004-2015. Calcul des auteurs.

Pour résumer, concernant les effets directs sur les trois périodes, la variété reliée est corrélée positivement avec la croissance de l'emploi avant la crise, n'est plus corrélée significativement pendant la période de crise (2008-2012), et le redevient toujours positivement pendant la période post-crise. Une interprétation possible est que, pendant la crise, la spécialisation des

secteurs reliés limite la flexibilité qui permettrait d'adapter les produits et de reconvertir les activités économiques. Dans cette veine, Steijn *et al.* (2023) affirment, à partir d'une étude approfondie des grandes crises du passé, que les crises réduisent considérablement le rythme de la diversification. La variété non reliée ne semble pas jouer de rôle sur notre période d'étude.

Lorsque nous faisons la distinction entre les secteurs à haute technologie et les secteurs à basse ou moyenne technologie pour chaque type de variété, nous observons que la variété reliée des premiers et la variété reliée des deuxièmes sont toutes deux corrélées positivement avec la croissance de l'emploi¹². Seule la variété non reliée des secteurs à haute technologie est associée à un ralentissement de l'emploi au cours de la période 2004-2008. Ce résultat contraste avec celui de Cortinovis & van Oort (2015), qui trouvent un effet négatif de la variété non reliée dans les régions à basse technologie en contrôlant pour le niveau régional du progrès technique. Pendant la crise, ni la variété reliée ni la variété non reliée n'influencent directement la variation de l'emploi. Ce résultat est maintenu lorsque nous distinguons les secteurs à basse ou moyenne technologie des secteurs à haute technologie.

Les résultats changent pour la période post-crise pour laquelle nous estimons une corrélation positive de la variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie et de la variété non reliée des secteurs à haute technologie avec la croissance de l'emploi. L'analyse par type de territoire (rural ou urbain) montre que l'effet de la variété reliée est dû à la fois aux zones urbaines et rurales pendant la période 2004-2008 et seulement aux zones urbaines après la crise. De façon surprenante, il existe une corrélation négative entre la variété non reliée et la croissance de l'emploi dans les zones rurales pendant la crise qui ne semble pas persister après la crise. La variété reliée est également corrélée positivement avec la croissance de l'emploi dans les zones urbaines, hormis pendant la période de crise¹³. Ce résultat est cohérent avec ceux de Cortinovis & van Oort (2015). Dans la même veine, dans leur étude sur l'Autriche, Firgo & Mayerhofer (2018) constatent que l'emploi bénéficie davantage de la variété de domaines connexes dans les régions urbaines. Cependant, cette étude effectuée sur une longue période (2000-2013) ne fait pas la distinction entre la période de crise et les autres périodes.

Concernant les effets indirects, nos résultats montrent que, à l'exception des zones rurales, la variété reliée du voisinage est corrélée positivement avec la croissance de l'emploi pendant la crise. En revanche, cette corrélation est moins marquée pendant la période post-crise. La variété non reliée du voisinage est quant à elle corrélée négativement à la croissance de l'emploi quelle que soit la période étudiée (avec une corrélation plus forte pendant la crise), ce qui est également le cas si on raisonne uniquement sur les zones

urbaines et en excluant la région Île-de-France de l'analyse.

S'agissant de l'intensité de R&D des activités économiques, nous observons une corrélation positive de la variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie avec la croissance de l'emploi pendant la crise et après la crise (la corrélation étant plus faible après la crise). La variété non reliée dans les secteurs à basse ou moyenne technologie est corrélée négativement avec la croissance de l'emploi entre 2004 et 2008, de même que la variété non reliée dans les secteurs à haute technologie entre 2008 et 2012.

L'analyse séparée des zones d'emploi urbaines montre clairement une corrélation positive de la variété reliée du voisinage et une corrélation négative de la variété non reliée du voisinage avec la croissance de l'emploi avant, pendant et après la crise. Ces corrélations sont plus fortes pendant la crise (de 2008 à 2012). Cela confirme le rôle potentiellement important joué par la variété reliée du voisinage dans l'atténuation des effets de la crise. Dans les trois périodes, la corrélation de la variété reliée du voisinage et de la variété non reliée du voisinage avec la croissance de l'emploi ne s'observe que dans les zones urbaines. Il semble que, lorsque l'intensité des formes de variété est faible dans une zone d'emploi, les territoires voisins contribuent à combler ce déficit. Toutefois, cet effet de compensation n'est observé que dans les zones d'emploi urbaines ; les zones d'emploi rurales en sont exclues.

En guise de test de robustesse, nous avons estimé les mêmes six modèles, pour chacune des trois périodes, avec une spécification différente de la matrice de poids spatiale, à savoir la matrice de distance inverse entre unités spatiales élevée au carré. Cette distance est en effet jugée plus robuste pour distinguer les zones voisines des zones plus éloignées, car l'utilisation de valeurs au carré augmente le poids relatif des zones les plus proches. Les résultats obtenus pour nos variables clés sont très similaires à nos principales estimations en termes de significativité et d'ampleur (voir les tableaux S2 à S4 dans l'Annexe en ligne).

12. Pour Hartog et al. (2012), l'effet positif et significatif de la variété reliée parmi les secteurs à haute technologie des régions finlandaises peut s'expliquer par la capacité de ces secteurs à produire des innovations radicales et, en conséquence, à introduire de nouveaux produits sur le marché.

13. La capacité à rebondir des départements urbains est également vérifiée dans l'étude de Talandier & Calixte (2021) sur les effets de la crise économique de 2008 en France. Cependant, dans une étude similaire portant sur les États-Unis, Grabner & Modica (2022) observent des effets à la fois dans les zones rurales et urbaines, avec un effet particulièrement important dans les zones urbaines.

Tableau 4 – Croissance de l'emploi entre 2011 et 2015

Variable dépendante : Croissance de l'emploi local 2011-2015	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4 (zones rurales)	Modèle 5 (zones urbaines)	Modèle 6 (sans la région IdF)
Caractéristiques de la zone d'emploi en 2011 :						
Variété reliée	0,018** (0,009)	0,015* (0,009)		-0,002 (0,018)	0,027*** (0,010)	0,014 (0,009)
Variété non reliée	0,009 (0,011)	-0,002 (0,011)		-0,009 (0,026)	0,008 (0,012)	0,011 (0,011)
Densité		-0,000 (0,003)				
Part de cadres		0,196*** (0,070)				
Variété reliée des secteurs à haute technologie			-0,057 (0,064)			
Variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			0,027*** (0,010)			
Variété non reliée des secteurs à haute technologie			0,029* (0,017)			
Variété non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			0,002 (0,013)			
Caractéristiques des zones voisines en 2011 :						
Variété reliée	0,046** (0,019)	0,037* (0,020)		0,050 (0,037)	0,047** (0,021)	0,047** (0,020)
Variété non reliée	-0,040* (0,021)	-0,039* (0,021)		-0,062 (0,040)	-0,050** (0,023)	-0,046** (0,021)
Densité		-0,002 (0,005)				
Part de cadres		0,178 (0,155)				
Variété reliée des secteurs à haute technologie			-0,009 (0,155)			
Variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			0,045** (0,023)			
Variété non reliée des secteurs à haute technologie			-0,029 (0,036)			
Variété non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie			-0,034 (0,029)			
Constante	0,015 (0,093)	0,057 (0,099)	0,004 (0,133)	0,233 (0,153)	0,048 (0,107)	0,035 (0,093)
lambda	0,406*** (0,0734)	0,398*** (0,0740)	0,407*** (0,073)	0,332 (0,208)	0,465*** (0,095)	0,402*** (0,075)
Observations	304	304	304	76	228	285
I de Moran	7,172***	6,851***	7,238***			
R ²	0,089	0,1272	0,095	0,112	0,101	0,093
Vraisemblance	660,047	666,543	661,229	151,829	512,374	620,069
Prob > chi2	0,004	0,000	0,022	0,307	0,000	0,009

Note : les erreurs standard sont indiquées entre parenthèses. ***, **, * = significatif au seuil de 1 %, 5 % et 10 %, respectivement.
Source : Insee, Clap 2004-2015. Calcul des auteurs.

* *
*

Cet article vise à étudier les relations entre les disparités intra et intersectorielles, aussi appelées variétés reliée et non reliée, et la croissance de l'emploi au niveau des zones d'emploi en France métropolitaine entre 2004 et 2015. Sa principale

contribution est d'améliorer la compréhension des relations entre les différentes formes de variété sectorielle et la croissance de l'emploi local, d'une part, en développant une approche qui tient compte des disparités sectorielles tant locales que du voisinage, et d'autre part, en distinguant les périodes de crise des périodes ordinaires.

Si les résultats empiriques montrent que la diversité sectorielle locale est corrélée avec l'évolution de l'emploi local, deux questions restent ouvertes, en particulier pour les décideurs publics. La première est de savoir si, et comment, la diversité sectorielle locale pourrait être renforcée. Il semble plus simple et moins coûteux de soutenir l'arrivée d'un secteur relié à des activités existantes que d'introduire un secteur non relié aux activités existantes. La deuxième question concerne la façon dont les politiques publiques pourraient tenir compte des interactions entre les territoires, dès lors que la croissance locale est influencée par la variété sectorielle du voisinage. De ce point de vue, divers cadres institutionnels pourraient être explorés. Par exemple, il serait ici possible de mobiliser le concept de « réseau de politiques publiques » (*policy network*) ou de communautés de politiques publiques (*policy community*) qui recouvrent des formes de relations entre groupes d'intérêt et élites politico-administratives variables selon les caractéristiques du réseau. Il souligne l'importance des relations informelles entre les groupes d'intérêt et suggère une forme de coordination entre les niveaux nationaux et sub-nationaux qui pourrait s'appliquer aux politiques industrielles. Un autre développement prometteur repose sur la gouvernance multiniveaux, en tant qu'alternative au gouvernement hiérarchique – ce qui implique un mode de relations négocié préétabli entre les institutions de différents niveaux institutionnels. La gouvernance multiniveaux peut également se mettre en place grâce à l'interconnexion de réseaux politiques au sein d'institutions gouvernementales formelles.

Si certains résultats empiriques suggèrent que plus la diversité sectorielle est élevée, plus la croissance de l'emploi local est forte, et dans l'hypothèse où cette relation serait de cause à effet, une question essentielle pour les décideurs politiques est de savoir si la diversité sectorielle peut être volontairement augmentée et, si oui, par quels moyens. Il semble raisonnable de supposer qu'il est plus simple et moins coûteux d'aider à l'introduction et au développement de secteurs reliés (à des secteurs existants) que de créer des secteurs non reliés (aux secteurs existants). Toutefois, les résultats empiriques remettent en question cette hypothèse, indiquant qu'une structure sectorielle non reliée pourraient être plus avantageuse sur le plan économique. En outre, les décideurs politiques devraient également se préoccuper des politiques adoptées dans les territoires voisins afin d'assurer

la cohérence régionale des actions publiques menées au niveau de chaque unité spatiale.

Pour répondre à ces questions, les recherches futures devraient se concentrer sur l'analyse des flux de connaissances entre les secteurs reliés d'une part, et entre les secteurs non reliés d'autre part, ainsi que sur les politiques publiques susceptibles d'augmenter ces flux. La diversité des situations devrait également être prise en compte dans la mesure où les externalités de Jacobs découlent de l'innovation et nécessitent un certain niveau de capacité d'absorption (aptitudes à acquérir, assimiler et exploiter des connaissances) pour favoriser leur effet sur la croissance. L'idée est que l'élargissement de la base des connaissances régionales renforce la capacité à absorber des connaissances provenant de divers secteurs reliés et non reliés, ce qui se traduit par un effet plus important sur la croissance de l'emploi (Fritsch & Kublina, 2017). Par conséquent, il serait essentiel de développer des politiques qui non seulement soutiennent la diversification régionale, mais aussi améliorent la capacité d'absorption afin de maximiser les bénéfices des flux de connaissances dans tous les secteurs.

Nos résultats suggèrent plusieurs pistes pour des recherches futures. Tout d'abord, l'utilisation de la nomenclature sectorielle emboîtée NAF, ou de son équivalent européen NACE, pour mesurer les variétés reliée et non reliée est contestable. Cette nomenclature se fonde principalement sur la proximité entre les produits, ce qui implique que les secteurs appartenant à une sous-catégorie donnée fabriquent des produits qui sont plus proches de ceux fabriqués par les autres sous-catégories de la même catégorie mère que ceux d'autres sous-catégories (Hartog *et al.*, 2012). Toutefois, cette façon de regrouper les secteurs et sous-secteurs ignore les externalités de connaissance et la proximité technologique entre secteurs (Boschma *et al.*, 2012). Une possibilité serait d'utiliser d'autres classifications sectorielles, comme celle de Pavitt (1984) qui repose sur la proximité des technologies et identifie quatre groupes (industries de nature scientifique, industries à grande échelle, industries de fournisseurs spécialisés et industries à prédominance de fournisseurs), ou celle de Neffke & Hanning (2008) qui adoptent une nouvelle technique de caractérisation reposant sur le lieu de fabrication des produits. L'étude de Wixe & Andersson (2017) souligne l'importance de deux autres dimensions de la variété reposant sur ses liens respectifs avec le niveau de formation et la profession des salariés, qui pourraient être prises en compte dans

des recherches complémentaires. L'argument est que les transferts d'informations et de connaissances impliquent principalement des personnes. Pour finir, un troisième domaine de recherche prometteur est celui des canaux par lesquels la variété reliée conduit à la croissance de l'emploi. Dans une étude récente basée sur

une nouvelle enquête régionale paneuropéenne, Content *et al.* (2019) montrent que l'entrepreneuriat peut être un mécanisme de transmission possible, par lequel les externalités entre secteurs reliés conduisent à la création de nouveaux emplois et, par conséquent, à la croissance de l'emploi. □

Lien vers l'Annexe en ligne :

www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/8302691/ES544_Amdaoud-Levratto_Annexe-en-ligne.pdf

BIBLIOGRAPHIE

Aarstad, J., Kvitastein, O. A. & Jakobsen, S. E. (2016). Related and unrelated variety as regional drivers of enterprise productivity and innovation: A multilevel study. *Research Policy*, 45(4), 844–856. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.01.013>

Aliaga, C. (2015). Les zonages d'étude de l'Insee. Une histoire des zonages supracommunaux définis à des fins statistiques. *INSEE Méthodes* N° 129. <https://www.insee.fr/fr/information/2571258>

Arrow, K. J. (1962). The Economic Implications of Learning by Doing. *Review of Economic Studies*, 29(3), 155–73. <https://doi.org/10.2307/2295952>

Balland, P.-A., Boschma, R., Crespo, J. & Rigby, D. (2019). Smart specialization policy in the EU: Relatedness, knowledge complexity and regional diversification. *Regional Studies*, 53(9), 1252–1268. <https://doi.org/10.1080/00343404.2018.1437900>

Balland, P.-A. & Boschma, R. (2021). Complementary interregional linkages and smart specialisation: An empirical study on European regions. *Regional Studies*, 55(6), 1059–1070. <https://doi.org/10.1080/00343404.2020.1861240>

Beaudry, C. & Schiffrauerova, A. (2009). Who's right, Marshall or Jacobs? The localization versus urbanization debate. *Research Policy*, 38(2), 318–337. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.11.010>

Bishop, P. & Gripiaios, P. (2010). Spatial Externalities, Relatedness and Sector Employment Growth in Great Britain. *Regional Studies*, 44(4), 443–454. <https://doi.org/10.1080/00343400802508810>

Boschma, R. (2017). Relatedness as driver of regional diversification: a research agenda. *Regional Studies*, 51(3) 351–364. <https://doi.org/10.1080/00343404.2016.1254767>

Boschma, R. A. (2005). Proximity and Innovation: A Critical Assessment. *Regional Studies*, 39(1), 61–74. <https://doi.org/10.1080/0034340052000320887>

Boschma, R., Minondo, A. & Navarro, M. (2012). Related variety and regional growth in Spain. *Papers in Regional Science*, 91(2), 241–256. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5957.2011.00387.x>

Boschma, R. & Iammarino, S. (2009). Related variety, trade linkages, and regional growth in Italy. *Economic Geography*, 85(3), 289–311. <https://doi.org/10.1111/j.1944-8287.2009.01034.x>

Brenet, P., Chabaud, D. & Henrion, C. (2019). Créer une dynamique de coopération entrepreneuriale dans un territoire de faible densité : le cas de la Petite Montagne dans le Jura. In: É. Bonneveux (Ed.), *GRH, RSE et emplois: Vers de nouvelles approches inclusives*, 173–196. Paris: Vuibert. <https://doi.org/10.3917/vuib.bonne.2019.01.0173>

Broekel, T. & Binder, M. (2007). The Regional Dimension of Knowledge Transfers—A Behavioral Approach. *Industry and Innovation*, 14(2), 151–175. <https://doi.org/10.1080/13662710701252500>

Burridge, P., Elhorst, J. P. & Zigova, K. (2016). Group Interaction in Research and the Use of General Nesting Spatial Models. In: B. H. Baltagi, J. P. LeSage & R. K. Pace (Eds.), *Spatial Econometrics: Qualitative and Limited Dependent Variables*, 223–258. Emerald Group Publishing Limited, Leeds.

- Buzard, K., Carlino, G. A., Hunt, R. M., Carr, J. K. & Smith, T. E. (2020).** Localized knowledge spillovers: Evidence from the spatial clustering of R&D labs and patent citations. *Regional Science and Urban Economics*, 81, 103490. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2019.103490>
- Cainelli, G., Ganau, R. & Iacobucci, D. (2016).** Do Geographic Concentration and Vertically Related Variety Foster Firm Productivity? Micro-Evidence from Italy. *Growth and Change*, 47(2), 197–217. <https://doi.org/10.1111/grow.12112>
- Castaldi, C., Frenken, K. & Los, B. (2015).** Related Variety, Unrelated Variety and Technological Breakthroughs: An analysis of US State-Level Patenting. *Regional Studies*, 49(5), 767–781. <https://doi.org/10.1080/00343404.2014.940305>
- Cohen, W. M. & Levinthal, D. A. (1990).** Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128–52. <https://doi.org/10.2307/2393553>
- Combes, P. P. (2000).** Economic Structure and Local Growth: France, 1984-1993. *Journal of Urban Economics*, 47(3), 329–355. <https://doi.org/10.1006/juec.1999.2143>
- Combes, P. P., Magnac, T. & Robin, J. M. (2004).** The dynamics of local employment in France. *Journal of Urban Economics*, 56(2), 217–243. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2004.03.009>
- Content, J., Frenken, K. & Jordaan, J. A. (2019).** Does related variety foster regional entrepreneurship? Evidence from European regions. *Regional Studies*, 53(11), 1531–1543. <https://doi.org/10.1080/00343404.2019.1595565>
- Content, J. & Frenken, K. (2016).** Related variety and economic development: A literature review. *European Planning Studies*, 24(12), 2097–2112. <https://doi.org/10.1080/09654313.2016.1246517>
- Cortinovis, N. & van Oort, F. (2015).** Variety, economic growth and knowledge intensity of European regions: A spatial panel analysis. *The Annals of Regional Science*, 55(1), 7–32. <https://doi.org/10.1007/s00168-015-0680-2>
- Cousquer, D. (2022).** Industrie et territoires. *Administration*, 274, 19–21. <https://doi-org.inshs.bib.cnrs.fr/10.3917/admi.274.0019>
- De Groot, H. L. F., Poot, J. & Smit, M. J. (2016).** Which agglomeration externalities matter most and why? *Journal of Economic Surveys*, 30(4), 756–782. <https://doi.org/10.1111/joes.12112>
- Deidda, S., Paci, R. & Usai, S. (2006).** *Spatial externalities and local economic growth*, Contribiti di Ricerca No. 02/06. Centro Ricerche Economiche Nord Sud (CRENoS), Cagliari.
- Duranton, G. & Puga, D. (2005).** From sectoral to functional urban specialisation. *Journal of Urban Economics*, 57, 343–370. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2004.12.002>
- Elouaer-Mrizak, S. & Picard, F. (2016).** Dynamique technologique et politique régionale d'innovation : l'apport de l'analyse statistique des réseaux. *Innovations*, 50, 13–41. <https://doi.org/10.3917/inno.050.0013>
- Elhorst, J. P. (2014).** *Spatial Econometrics: From Cross-sectional Data to Spatial Panels*. New York: Springer, 2014.
- Essletzbichler, J. (2007).** Diversity, stability and regional growth in the United States 1975–2002. In: K. Frenken (ed.) *Applied evolutionary economics and economic geography*. Edward Edgar: Cheltenham.
- Fitjar, R. D. & Timmermans, B. (2016).** Regional skill relatedness: towards a new measure of regional related diversification. *European Planning Studies*. <https://doi.org/10.1080/09654313.2016.1244515>
- Firgo, M. & Mayerhofer, P. (2018).** (Un)related variety and employment growth at the sub-regional level, *Papers in Regional Science*, 97(3), 519–548. <https://doi.org/10.1111/pirs.12276>
- Frenken, K. (2017).** A Complexity-Theoretic Perspective on Innovation Policy, Complexity. *Governance & Networks*, 35–47. <https://doi.org/10.20377/cgn-41>
- Frenken, K., van Oort, F. & Verburg, T. (2007).** Related Variety, Unrelated Variety and Regional Economic Growth. *Regional Studies*, 41(5), 685–697. <https://doi.org/10.1080/00343400601120296>
- Fritsch, M. & Kublina, S. (2017).** Related variety, unrelated variety and regional growth: the role of absorptive capacity and entrepreneurship. *Regional Studies*, 52(10), 1360–1371. <https://doi.org/10.1080/00343404.2017.1388914>
- Galindo-Rueda, F. & Verger, F. (2016).** OECD Taxonomy of Economic Activities Based on R&D Intensity. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers* N° 2016/04. Paris: OECD Publishing.
- Glaeser, E. L., Kallal, H. D., Scheinkman, J. A. & Shleifer, A. (1992).** Growth in Cities. *Journal of Political Economy*, 100(6), 1126–1152. <https://doi.org/10.1086/261856>
- Grabner, S. M. & Modica, M. (2022).** Industrial resilience, regional diversification and related variety during times of crisis in the US urban–rural context. *Regional Studies*, 56(10), 1605–1617. <https://doi.org/10.1080/00343404.2021.2002837>

- Grillitsch, M., Asheim, B. & Trippi, M. (2018).** Unrelated knowledge combinations: the unexplored potential for regional industrial path development. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 11(2), 257–274. <https://doi.org/10.1093/cjres/rsy012>
- Hartog, M., Boschma, R. & Sotarauta, M. (2012).** The impact of related variety on regional employment growth in Finland 1993–2006: High-tech versus medium/low-tech. *Industry and Innovation*, 19, 459–476. <https://doi.org/10.1080/13662716.2012.718874>
- Henderson, V., Kuncoro, A. & Turner, M. (1995).** Industrial Development in Cities. *Journal of Political Economy*, 103(5), 1067–1090. <https://doi.org/10.1086/262013>
- Jacobs, J. (1969).** *The Economy of Cities*. New York: Vintage.
- Janssen, M. & Frenken, K. (2019).** Cross-specialisation policy: rationales and options for linking unrelated industries. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 12, 195–212. <https://doi.org/10.1093/cjres/rsz001>
- Kekezi, O., Dall’erba, O. S. & Kang, D. (2022).** The role of interregional and inter-sectoral knowledge spillovers on regional knowledge creation across US metropolitan counties. *Spatial Economic Analysis*, 1–23. <https://doi.org/10.1080/17421772.2022.2045344>
- Lucas, R. E. (1988).** On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, 22, 3–42. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7)
- Mameli, F., Iammarino, S. & Boschma, R. (2012).** Regional variety and employment growth in Italian labour market areas: Services versus manufacturing industries. *Papers in Evolutionary Economic Geography*, 12(3). Utrecht University. <https://ideas.repec.org/p/egu/wpaper/1203.html>
- Mameli, F., Faggian, A. & McCann, P. (2008).** Employment Growth in Italian Local Labour Systems: Issues of Model Specification and Sectoral Aggregation. *Spatial Economic Analysis*, 3(3), 343–360. <https://doi.org/10.1080/17421770802353030>
- Manski, C. F. (1993).** Identification of Endogenous Social Effects: The Reflection Problem. *Review of Economic Studies*, 60(3), 531–542. <https://doi.org/10.2307/2298123>
- Marshall, A. (1920).** *Principles of Economics*. London: Macmillan.
- Nagendra, H. (2002).** Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity. *Applied Geography*, 22, 175–186. [https://doi.org/10.1016/s0143-6228\(02\)00002-4](https://doi.org/10.1016/s0143-6228(02)00002-4)
- Neffke, F. & Henning, M. S. (2008).** Revealed relatedness : Mapping industry space. *Papers in Evolutionary Economic Geography* (PEEG). Utrecht University. <https://ideas.repec.org/p/egu/wpaper/0819.html>
- Nooteboom, B. (2000).** *Learning and Innovation in Organizations and Economies*. Oxford: Oxford University Press.
- O’Brien, R. M. (2007).** A Caution Regarding Rules of Thumb for Variance Inflation Factors. *Quality & Quantity*, 41(5), 673–690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- O’Huallachain, B. & Lee, D. S. (2011).** Technological Specialization and Variety in Urban Invention. *Regional Studies*, 45(1), 67–88. <https://doi.org/10.1080/00343404.2010.486783>
- Paci, R. & Usai, S. (2008).** Agglomeration economies, spatial dependence and local industry growth. *Revue d’économie industrielle*, 123, 87–109. <https://doi.org/10.4000/rei.3917>
- Pavitt, K. (1984).** Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory. *Research Policy*, 13(6), 343–373. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(84\)90018-0](https://doi.org/10.1016/0048-7333(84)90018-0)
- Quatraro, F. & Usai, S. (2017).** Knowledge flows, externalities and innovation networks. *Regional Studies*, 51(8), 1133–1137. <https://doi.org/10.1080/00343404.2017.1337884>
- Rigby, D. L., Roesler, C., Kogler, D., Boschma, R. & Balland, P.-A. (2022).** Do EU regions benefit from Smart Specialisation principles? *Regional Studies*, 56(12), 2058–2073. <https://doi.org/10.1080/00343404.2022.2032628>
- Romer, P. M. (1986).** Increasing Returns and Long-Run Growth. *Journal of Political Economy*, 94, 1002–1037. <https://doi.org/10.1086/261420>
- Rosenberg, N. & Frischtak, C. R. (1983).** Long waves and economic growth: A critical appraisal. *American Economic Review*. Papers and Proceedings, 73(2), 146–151. <https://ideas.repec.org/a/aea/aecrev/v73y1983i2p146-51.html>
- Steijn, M. P. A., Balland, P.-A., Boschma, R. & Rigby, D. L. (2023).** Technological diversification of U.S. cities during the great historical crises. *Journal of Economic Geography*, 23(6), 1303–1344. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbad013>
- Talandier, M. & Calixte, Y. (2021).** Résilience économique et disparité territoriale : Quelles leçons retenir de la crise de 2008 ? *Revue d’Économie Régionale & Urbaine*, 361–396. <https://doi.org/10.3917/reru.213.0361>

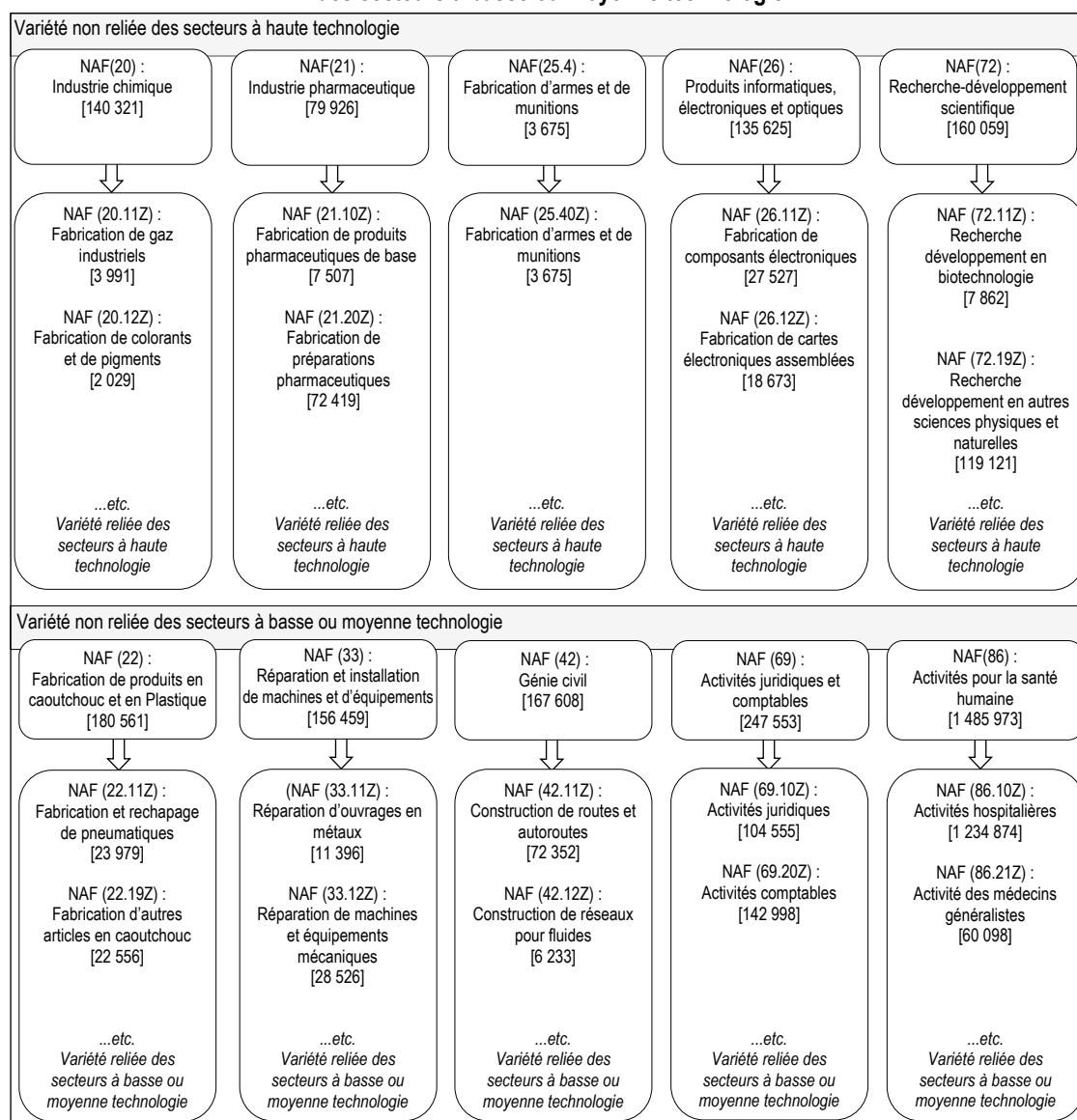
Tanner, A. N. (2014). Regional Branching Reconsidered: Emergence of the Fuel Cell Industry in European Regions. *Economic Geography*, 90(4), 403–427. <https://doi.org/10.1111/ecge.12055>

Theil, H. (1972). *Statistical Decomposition Analysis*. North-Holland, Amsterdam.

van Oort, F., de Geus, S. & Dogaru, T. (2015). Related Variety and Regional Economic Growth in a Cross-Section of European Urban Regions. *European Planning Studies*, 23(6), 1110–1127. <https://doi.org/10.1080/09654313.2014.905003>

Wixe, S. & Andersson, M. (2017). Which types of relatedness matter in regional growth? Industry, occupation and education. *Regional Studies*, 51(4), 523–536. <https://doi.org/10.1080/00343404.2015.1112369>

Figure A1 – Variété reliée et non reliée des secteurs à haute technologie / variété reliée et non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie



Note : les valeurs entre crochets indiquent l'emploi au niveau national en 2011. Elles sont obtenues à partir du système d'information Clap. La figure illustre, d'une part, comment la variété reliée est décomposée entre variété reliée des secteurs à haute technologie et variété reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie et, d'autre part, comment la variété non reliée est décomposée entre variété non reliée des secteurs à haute technologie et variété non reliée des secteurs à basse ou moyenne technologie. Tous les secteurs ne sont pas représentés, la figure ne présente qu'un extrait.

Source : Insee, Clap, 2011, calcul des auteurs.

N° 543 (2024)

*ENVIRONNEMENT : LES ENJEUX ÉCONOMIQUES DU DÉFI CLIMATIQUE / ENVIRONMENT:
THE ECONOMIC STAKES OF THE CLIMATE CHALLENGE*

- Coûts & co-bénéfices des politiques de transition climatique : comment seront-ils retracés par les indicateurs de niveau de vie & de bien-être ? / *Costs and Co-Benefits of Climate Transition Policies: How Accurately Will They Be Measured by Standard of Living and Well-Being Indicators?* – Didier Blanchet & Craig Pesme
- La sobriété énergétique choisie : chocs de préférences & biais comportementaux / *Chosen Energy Sufficiency: Preference Shocks and Behavioural Biases* – Miquel Oliu-Barton, Aude Pommeret, Alice Robinet, Katheline Schubert & Mathilde Viennot
- Impact macroéconomique des dommages climatiques en France / *Macroeconomic Impact of Climate Damage in France* – Florian Jacquetin & Gaël Callonnec
- Commentaire – Le peu d'intérêt de la science économique pour le défi du siècle / *Comment – The Lack of Interest in Economics for the Challenge of the Century* – Xavier Timbeau

SOCIÉTÉ / SOCIETY

- L'attachement aux animaux de compagnie revisité / *Attachment to Pets Revisited* – Cécile Brousse & Marceline Bodier

N° 542 (2024)

ÉCONOMIE DE LA SANTÉ / HEALTH ECONOMICS

- Introduction – De la théorie à la pratique et vice versa ou comment les économistes contribuent à comprendre et à améliorer le système de santé / *Introduction – From Theory to Practice and Vice Versa or How Economists Contribute to Understanding and Improving the Healthcare System* – Thomas Barnay & David Crainich

INÉGALITÉS ET VULNÉRABILITÉ / INEQUALITIES AND VULNERABILITY

- La répartition géographique des internes en médecine générale : un outil de régulation des lieux d'installation ? / *Geographical Distribution of Interns in General Practice: A Tool for Regulating Place of Settlement?* – Julien Silhol
- Comment prendre en compte le coût supplémentaire lié au handicap dans la mesure du niveau de vie des ménages en France ? / *How Can the Additional Cost Due to Disability Be Taken Into Account When Measuring the Standard of Living of Households in France?* – Thomas Blavet
- Le reste à charge en santé nuit-il à l'équité dans le financement des soins ? Une comparaison des systèmes de santé en Europe / *Do Out-Of-Pockets Undermine Equity in Healthcare Financing? A Comparison of Healthcare Systems in Europe* – Florence Jusot & Adèle Lemoine

CONSOMMATION DE SOINS ET PRÉVENTION / HEALTH CARE CONSUMPTION AND PREVENTION

- L'impact d'un programme social sur la consommation de soins des travailleurs indépendants âgés en France / *The Impact of a Social Programme on the Healthcare Consumption of Elderly Self-Employed Workers in France* – Estelle Augé & Nicolas Sirven
- Impact d'Internet haut débit sur les comportements préventifs en matière de santé au Sénégal / *Impact of Broadband Internet on Preventive Healthcare Behaviors in Senegal* – Pauline Kergall & Jean-Baptiste Guiffard

EHPAD ET HÔPITAL / EHPADs AND HOSPITAL

- Effet de l'aide informelle fournie par leurs enfants sur la santé des personnes âgées en maison de retraite / *The Effect of Informal Care Provided by Children on Health in Nursing Homes* – Quitterie Roquebert
- Inciter à prescrire des médicaments biosimilaires : évaluation d'une expérimentation de partage de gains entre les hôpitaux et l'Assurance maladie en France / *Biosimilar Prescribing Incentives: Results of a French Pilot of Gainsharing Between Hospitals and the National Health Insurance* – Vincent Attia, Mathilde Gaini, Edouard Maugendre & Catherine Pollak

N° 541 (2023)

- Discriminations dans l'accès à l'emploi : les effets croisés du genre, de l'origine et de l'adresse / *Discrimination in Access to Employment: The Combined Effects of Gender, Origin and Address* – Sylvain Chareyron, Yannick L'Horty & Pascale Petit
- La régulation des prix des alcools en France : quel scénario de réforme pour une politique proportionnée aux objectifs de santé publique et d'équité fiscale ? / *Alcohol Price Regulation in France: Choosing a Reform Scenario to Achieve Public Health and Tax Fairness Objectives* – Sébastien Lecocq, Valérie Orozco, Christine Boizot-Szantai, Céline Bonnet & Fabrice Etilé
- Les stéréotypes de genre en Europe / *Gender Stereotypes in Europe* – Clotilde Coron
- La non-imposition des loyers imputés : un cadeau pour Harpagon ? Une estimation dans le cas de la France / *Non-Taxation of Imputed Rent: A Gift to Scrooge? Evidence from France* – Montserrat Botey & Guillaume Chapelle

N° 540 (2023)

- Qui est mieux classé que ses parents dans l'échelle des revenus ? Une analyse de la mobilité intergénérationnelle en France / *Who Climbs Up the Income Ladder? An Analysis of Intergenerational Income Mobility in France* – Michaël Sicsic
- Les délocalisations jouent-elles encore un rôle dans le déclin de l'emploi industriel ? / *Does Offshoring Still Play a Role in the Decline in Manufacturing Employment?* – Camille Beaurepaire & Victor Laviolle
- Aides publiques et performances des entreprises nées mondiales / *Public Aid and the Performance of Born Globals* – Flora Bellone, Catherine Laffineur & Sophie Pomet
- Brexit et exportations agricoles et alimentaires bretonnes / *Brexit and Breton Agricultural and Food Exports* – Angela Chepeta, Marilyne Huchet & Lucile Henry

N° 539 (2023)

- Au-delà du PIB : une évaluation de la croissance du bien-être monétaire dans 14 pays européens et aux États-Unis / *Beyond GDP: A Welfare-Based Estimate of Growth for 14 European Countries and the USA Over Past Decades* – Jean-Marc Germain
- Produits numériques gratuits et mesures agrégées de l'activité économique / *Free Digital Products and Aggregate Economic Measurement* – Diane Coyle & David Nguyen

TÉLÉTRAVAIL ET PRODUCTIVITÉ / TELEWORK AND PRODUCTIVITY

- Les liens entre télétravail et productivité pendant et après la pandémie de Covid-19 / *The Role of Telework for Productivity During and Post COVID-19* – Chiara Criscuolo, Peter Gal, Timo Leidecker, Francesco Losma & Giuseppe Nicoletti
- Télétravail et productivité avant, pendant et après la pandémie de Covid-19 / *Telework and Productivity Before, During and After the COVID-19 Crisis* – Antonin Bergeaud, Gilbert Cette & Simon Drapala
- Commentaire – Télétravail et productivité trois ans après les débuts de la pandémie / *Comment – Telework and Productivity Three Years After the Start of the Pandemic* – Pierre Pora

N° 538 (2023)

VEILLISSEMENT ET RETRAITE / AGEING AND RETIREMENT

- Vieillesse, retraites et dépendance – Introduction / *Ageing, Pensions and Dependency – Introduction* – Didier Blanchet
- Dynamique du processus de perte d'autonomie dans les populations vieillissantes / *Dynamic of the Disabling Process in Ageing Populations* – Mahdi Ben Jelloul, Antoine Bozio, Elsa Perdrix, Audrey Rain & Léa Toulemon
- Le recours aux établissements pour personnes âgées en France (2008-2015) : le rôle de l'entourage familial / *Institutional Long-Term Care Use in France (2008-2015): The Role of Family Resources* – Amélie Carrère, Emmanuelle Cambois & Roméo Fontaine
- Effets sur la consommation de soins d'un report de l'âge de départ à la retraite annoncé en fin de carrière / *The Health-Consumption Effects of Increasing Retirement Age Late in the Game* – Eve Caroli, Catherine Pollak & Muriel Roger
- Le droit à l'information sur la retraite introduit par la réforme de 2003 rend-il les Français mieux informés et moins inquiets quant à leur future retraite ? / *Does the Right to Information on their Pension Introduced by the 2003 Reform Make the French Better Informed and Less Concerned about their Future Pension?* – Luc Arrondel, Loïc Gautier, Aurélie Lemonnier & Laurent Soulat
- Les perspectives financières du système de retraite et du niveau de vie des retraités à l'horizon 2070 / *Financial Outlook for the Pension System and the Standard of Living of Pensioners by 2070* – Frédérique Nortier-Ribordy

Economie et Statistique / Economics and Statistics

Objectifs généraux de la revue

Economie et Statistique / Economics and Statistics publie des articles traitant de tous les phénomènes économiques et sociaux, au niveau micro ou macro, s'appuyant sur les données de la statistique publique ou d'autres sources. Une attention particulière est portée à la qualité de la démarche statistique et à la rigueur des concepts mobilisés dans l'analyse. Pour répondre aux objectifs de la revue, les principaux messages des articles et leurs limites éventuelles doivent être formulés dans des termes accessibles à un public qui n'est pas nécessairement spécialiste du sujet de l'article.

Soumissions

Les manuscrits doivent être adressés au secrétariat de la revue (redaction-ecostat@insee.fr), de préférence en format MS-Word. Il doit s'agir de travaux originaux, qui ne sont pas soumis en parallèle à une autre revue. Les articles peuvent être soumis en français ou en anglais. Le texte d'un article standard fait environ 11 000 mots en français (y compris encadrés, tableaux, figures, annexes et bibliographie, non compris d'éventuelles annexes en ligne). Aucune proposition initiale de plus de 12 500 mots (11 500 mots pour les soumissions en anglais) ne sera examinée.

La soumission doit comporter deux fichiers distincts :

- Un fichier d'une page indiquant : le titre de l'article ; les prénom, nom, affiliations (maximum deux) et adresses e-mail et postale de chaque auteur ; un résumé de 160 mots maximum (140 mots pour les soumissions en anglais) qui doit présenter très brièvement la problématique, indiquer la source et donner les principaux axes et conclusions de la recherche ; les codes JEL et quelques mots-clés ; d'éventuels remerciements.
- Un fichier anonymisé du manuscrit complet (texte, illustrations, bibliographie, éventuelles annexes) indiquant en première page uniquement le titre, le résumé, les codes JEL et les mots-clés.

Les propositions retenues sont évaluées par deux à trois rapporteurs (procédure en « double-aveugle »). Les articles acceptés pour publication devront être mis en forme suivant les consignes aux auteurs (accessibles sur <https://www.insee.fr/fr/information/2410168>). Ils pourront faire l'objet d'un travail éditorial visant à améliorer leur lisibilité et leur présentation formelle.

Publication

Les articles sont publiés en français dans l'édition papier et simultanément en français et en anglais dans l'édition électronique. Celle-ci est disponible, en accès libre, sur le site de l'Insee, le jour même de la publication ; cette mise en ligne immédiate et gratuite donne aux articles une grande visibilité. La revue est par ailleurs accessible sur le portail francophone Persée, et référencée sur le site international Repec et dans la base EconLit.

Main objectives of the journal

Economie et Statistique / Economics and Statistics publishes articles covering any micro- or macro- economic or sociological topic, either using data from public statistics or other sources. Particular attention is paid to rigor in the statistical approach and clarity in the concepts and analyses. In order to meet the journal aims, the main conclusions of the articles, as well as possible limitations, should be written to be accessible to an audience not necessarily specialist of the topic.

Submissions

Manuscripts should be sent to the editorial team (redaction-ecostat@insee.fr), preferably in MS-Word format. The manuscript must be original work and not submitted at the same time to any other journal. It can be submitted either in French or in English. The standard length of an article is of about 10,000 words (including boxes if any, tables, figures, appendices, bibliography, but not counting online appendices if any). Manuscripts of more than 11,500 words will not be considered. Submissions must include two separate files:

- A one-page file providing: the title of the article; the first name, name, affiliation-s (at most two), e-mail et postal addresses of each author; an abstract of maximum 140 words, briefly presenting the research question, data and methodology, and the main conclusions; JEL codes and a few keywords; acknowledgements if any.
- An anonymised manuscript (including the main text, illustrations, bibliography and appendices if any), mentioning only the title, abstract, JEL codes and keywords on the front page.

Proposals that meet the journal objectives are reviewed by two to three referees ("double-blind" review). The articles accepted for publication will have to be presented according to the guidelines for authors (available at <https://www.insee.fr/en/information/2591257>). They may be subject to editorial work aimed at improving their readability and formal presentation.

Publication

The articles are published in French in the printed edition, and simultaneously in French and in English in the online edition. The online issue is available, in open access, on the Insee website the day of its publication; this immediate and free online availability gives the articles a high visibility. The journal is also available online on the French portal Persée, and indexed in Repec and EconLit.

N° 544 - 2024

Economie Statistique **ET**

Economics **AND** Statistics



ISBN 978-2-11-162457-3 - ISSN 0336-1454 - ECO 544
Parution décembre 2024 - PRIX : 22 €

