UCLouvain, Belgium,
Institut de Recherches Economiques et Sociales, IRES/LIDAM,
Economics School of Louvain,
IZA Network at LISER (Luxemburg) & CESifo (Germany).

Les travailleurs face aux crises climatiques et aux politiques environnementales

Bruno Van der Linden

9 avril 2026

CC BY NC ND

Email de l'auteur (personne de contact [1]) : bruno.vanderlinden@uclouvain.be

Citation : Bruno Van der Linden (2026). *Les travailleurs face aux crises climatiques et aux politiques environnementales*. Open Educational Resources de l'UCLouvain oer.uclouvain.be

Certains graphiques et tableaux de ce document sont issus de publications scientifiques et de rapports dont les références sont à chaque fois indiquées. La licence CC BY-NC-ND de ce document ne couvre pas ces graphiques et ces tableaux.

Je précise qu'aucune partie de ce texte n'a été rédigée avec l'aide d'un outil d'intelligence artificielle. Je ne puis bien entendu pas affirmer la même chose à propos des passages de livres et d'articles récents que je cite.

1. Page personnelle : https://perso.uclouvain.be/bruno.vanderlinden/

Remerciements

Ce texte a bénéficié des commentaires d'Amélie Géal, Fabio Mariani, Joséphine Martiat, Vincent Van Steenberghe et Francesco Vona. Je les en remercie. La responsabilité du contenu de ce livre n'engage cependant personne d'autre que moi.
Je remercie aussi ma collègue Muriel Dejemeppe, l'Institut de Recherches Economiques et Sociales de l'UCLouvain, l'Economics School of Louvain et l'Open Educational Resources – UCLouvain pour leur soutien à ce projet. Mes remerciements vont enfin à mon épouse pour sa patience et son soutien tout au long de la rédaction de ce texte.

Avis et réactions

Je suis naturellement intéressé à connaître l'opinion des lectrices et des lecteurs sur ce livre. Leurs remarques et leurs questions peuvent être envoyées à
bruno.vanderlinden@uclouvain.be
Merci d'avance.

Table des matières

1 Introduction **1–1**

2 Préambule méthodologique **2–1**
2.1 Le réchauffement planétaire, externalité globale 2–1
2.2 Comment quantifier l'impact du changement climatique ? 2–3
2.2.1 L'exploitation de données en coupe instantanée 2–5
2.2.2 L'exploitation de données en panel 2–6
2.2.3 Les "variations partitionnées" 2–8
2.2.4 La simulation de modèles mathématiques 2–9

I Les travailleurs face aux manifestations du changement climatique **2–11**

3 Réchauffement climatique, allocation du temps et emploi **3–1**
3.1 Études exploitant des données en coupe instantanée 3–2
3.2 Études exploitant des données de panel 3–5
3.3 Résumé et élargissement de la perspective 3–9

4 Réchauffement climatique et développement du capital humain **4–1**
4.1 Tests à faible enjeu 4–3
4.2 Test à (très) gros enjeu 4–7
4.3 Résumé 4–9

5 Réchauffement climatique et productivité du travail **5–1**
5.1 Résultats relatifs aux pays du sud de la planète 5–3
5.2 Résultats relatifs aux États-Unis et à l'Europe 5–5
5.3 Résumé 5–7

6 Réchauffement climatique, sécurité et santé au travail **6–1**
6.1 Les températures extrêmes causent un surcroît d'accidents du travail 6–2
6.2 Les mécanismes à l'oeuvre 6–4

6.3 Résumé et élargissement 6–5

7 Impact d'autres phénomènes associés au changement climatique 7–1
7.1 Les ouragans 7–3
7.1.1 Que sait-on ? 7–3
7.1.2 Résumé 7–8
7.2 Les sécheresses 7–9
7.2.1 Que sait-on ? 7–9
7.2.2 Résumé 7–10
7.3 Les inondations 7–11
7.3.1 Que sait-on ? 7–11
7.3.2 Résumé 7–14

II Les travailleurs face à la transition environnementale 7–17

8 Transition environnementale : de quoi parle-t-on ? 8–1
8.1 Transition environnementale : la perspective englobante 8–3
8.2 Transition environnementale : la perspective étroite de la décarbonation . . . 8–5

9 Prix énergétiques, emploi et rémunérations : analyses empiriques 9–1
9.1 Préoccupations méthodologiques 9–3
9.2 Exploitation de données d'établissement ou d'entreprise 9–6
9.3 Exploitation de données régionales 9–11
9.4 Exploitation de données sectorielles 9–12
9.5 Résumé 9–13

10 La taxation du carbone, l'emploi, le chômage et la distribution des revenus : analyses empiriques 10–1
10.1 La taxation du carbone est nécessaire, mais elle fait peur 10–3
10.2 Synthèse de la littérature empirique relative aux effets de la taxation du carbone sur l'emploi, le chômage et les salaires 10–7
10.2.1 Exploitation de données micro-économiques 10–7
10.2.2 Exploitation de données sectorielles ou régionales 10–12
10.2.3 Exploitation de données macroéconomiques 10–14
10.3 Les effets redistributifs de la taxe carbone 10–16
10.4 Résumé concernant les effets de la tarification du carbone 10–20
10.5 Le rôle des subventions 10–21

11 Analyse macro-économique et macro-sectorielle de la décarbonation 11–1
11.1 Quelques études relatives à l'Union européenne . . . 11–2
11.2 Etudes mondiales et centrées sur le G20 . . . 11–13
11.3 Résumé . . . 11–16
11.4 L'Inflation Reduction Act et les mesures canadiennes . . . 11–19
11.5 Mise en oeuvre de narratifs de changements macro-économiques et comportementaux . . . 11–21

12 Analyse critique de l'approche macro-économique 12–1
12.1 L'incertitude . . . 12–1
12.2 L'ignorance de l'encastrement de l'économie dans la nature . . . 12–2
12.3 Des failles dans la représentation des processus de production . . . 12–6
12.4 Autres critiques adressées aux modèles macroéconomiques standards . . . 12–7
12.5 Une représentation trop grossière du marché du travail . . . 12–7
12.6 L'approche des "Sustainability transitions" ou la critique de la logique rationaliste . . . 12–8

13 Emplois verts et bruns 13–1
13.1 Les approches basées sur le processus de production ou sur ce qui est produit 13–3
13.2 L'approche basée sur les professions ou les tâches des travailleurs . . . 13–5
13.2.1 L'approche préconisée par Dierdorff et al. (2009) . . . 13–6
13.2.2 L'approche par les tâches préconisée par Vona et al. (2018) . . . 13–8
13.2.3 L'utilisation des emplois vacants . . . 13–9
13.2.4 Résumé relatif aux emplois verts aux États-Unis . . . 13–11
13.3 Quantification des emplois verts et bruns en Europe . . . 13–11
13.3.1 Les emplois verts en Europe : défis et essais de mise en oeuvre . . . 13–11
13.3.2 Résumé relatif aux emplois verts au sein de l'Union européenne . . . 13–16
13.3.3 Les emplois bruns en Europe . . . 13–16
13.4 Quantification des emplois verts et bruns au sein de l'OCDE . . . 13–18
13.5 Réflexions critiques . . . 13–21

14 L'économie circulaire 14–1
14.1 La situation de départ . . . 14–2
14.2 Mécanismes économiques . . . 14–4
14.3 Quantification des effets de l'économie circulaire sur l'emploi et sa structure 14–6
14.4 Résumé . . . 14–10

15 La réallocation des emplois et des travailleurs 15–1
15.1 Changement climatique, migrations et réallocation des travailleurs . . . 15–3
15.1.1 Changement climatique et migrations inter-régionales et internationales 15–3
15.1.2 Variations de température ou de climat ? . . . 15–5

15.2 Politiques environnementales sources de réallocation des emplois 15–7
15.2.1 Cadre théorique 15–8
15.2.2 Effets de la régulation environnementale 15–9
15.2.3 Effets des politiques visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre 15–12
15.2.4 L'impact du déclin d'activités intensives en carbone sur les travailleurs et sur leur région 15–20
15.3 La faible mobilité des travailleurs issus de l'économie intensive en carbone . 15–27
15.4 Quels sont les freins à la mobilité professionnelle des travailleurs issus de l'économie intensive en carbone ? 15–30
15.4.1 Une attractivité relative des emplois verts insuffisante ? 15–31
15.4.2 Un mismatch géographique ? 15–40
15.4.3 Un mismatch de "qualification" ? 15–46
15.4.4 Les freins à la mobilité des travailleurs issus de l'économie intensive en carbone : résumé 15–61

16 La disponibilité globale en main d'oeuvre, frein à la décarbonation des économies avancées ? 16–1
16.1 Baisse du chômage et augmentation des tensions sur le marché du travail . . 16–2
16.2 La disponibilité globale en main d'oeuvre freine-t-elle la décarbonation des économies occidentales ? 16–3

III Conclusion 16–11

17 Conclusion 17–1

Table des figures

3.1 Variation de l'emploi du temps en travail, en loisirs extérieur (Outdoor) et intérieur (Indoor) en fonction de la température la plus élevée le même jour, l'effet étant normalisé à zéro sur la plage 24-27 degrés celsius. Source : Connolly (2018) au départ de la figure 3 de Graff Zivin et Neidell (2014). . . . 3–4

4.1 Test PISA standardisé en mathématiques (parmi les élèves de 15 ans en 2012) et température moyenne sur la période 2009-2013 en degrés Fahrenheit. Source : Park et al. (2020). 4–2

5.1 Impact d'une baisse du volume de travail sur la production et sur la productivité moyenne du travail. Panel A : technologie à un seul facteur de production, L. Panel B : cette même technologie affectée par un paramètre climatique T. 5–2

7.1 Dénombrement des désastres liés au climat et désastres de nature géophysiques accompagnés d'une estimation du coût annuel des premiers : niveau mondial. Source : Figure 1 de Ferreira (2024). 7–2

7.2 Le degré d'exposition des comtés de Porto Rico à l'ouragan Maria en septembre 2017 (S_{ct} dans l'encadré d'approfondissement 1). Source : Figure 1 de Barattieri et al. (2023). 7–5

7.3 Effets sur l'emploi et sur les rémunérations (hebdomadaires) d'un ouragan d'intensité historique moyenne survenu en un moment normalisé à 0 sur l'axe horizontal qui mesure le nombre de mois après le sinistre. L'axe vertical mesure l'écart en %. La ligne bleue représente l'effet estimé et la zone grise est l'intervalle de confiance de cet effet à 95%. Source : Figure 3 de Barattieri et al. (2023). 7–7

7.4 Effets sur l'emploi sectoriel d'un ouragan d'intensité historique moyenne survenu en un moment normalisé à 0 sur l'axe horizontal qui mesure le nombre de mois après le sinistre. L'axe vertical mesure l'écart en %. La ligne bleue représente l'effet estimé et la zone grise est l'intervalle de confiance de cet effet à 95%. Source : Figure 4 de Barattieri et al. (2023). 7–8

11.1 Parts cumulées des émissions de CO_2 et de l'emploi sectoriels au sein de l'Union européenne. Source : Figure 2.1 de Borgonovi et al. (2023). 11–3

11.2 Scénarios produisant la baisse de 55% des émissions comparé à un scénario de référence : impact relatif sur l'emploi en 2030 au sein de l'UE des 27 pays utilisant 3 modèles différents (JRC-GEM-E3, E3ME, E-QUEST). Sources : European Commission (2020) et Asikainen et al. (2021). 11–9

11.3 Scénarios produisant la baisse de 55% des émissions en 2030 comparé à un scénario de référence réalisant une baisse de 40% : intervalles d'impacts relatifs sur l'emploi sectoriel en 2030 au sein de l'UE des 27 pays, simulés par le modèle JRC-GEM-E3. Sources : tableau 23 de European Commission (2020) et Asikainen et al. (2021). 11–11

11.4 Variation de l'emploi mondial par secteur : écart en % par rapport au niveau de l'emploi dans le scénario de référence. Source : Figure 6 de Jaumotte et al. (2021). 11–14

13.1 Part des emplois dans les "environmental goods and services" (part dans l'emploi total en % en 2014 et en 2019 ou 2020). Source : Figure 2 de Vandeplas et al. (2022) sur base des données en lignes ENV_AC_EGSS1 d'Eurostat. 13–4

13.2 Exemples de professions "Green Enhanced Skills" et "Green Increased Demand" par degré de Greenness. Source : Tableau 1 de Vona et al. (2018) s'appuyant sur des données américaines d'O*NET. 13–8

13.3 Part des emplois GNE, GES et GID dans l'emploi total de divers pays d'Europe en 2019. Source : Valero et al. (2021). 13–13

13.4 Part, en %, des emplois "verts" dans l'emploi total par pays d'Europe en 2014 (en vert) et durant la dernière année disponible (période 2021-23, en bleu) quand on recourt aux données d'O*NET ou d'ESCO en retenant un seuil respectivement de greenness de 10% ou de 10% de de compétences et connaissances "vertes". Source : Figure 5 de Maldonado et al. (2024). 13–15

13.5 Part des emplois bruns selon les pays de l'Union européenne des 27 en 2008 et 2021). Source : Figure 5 de Vandeplas et al. (2022). 13–17

13.6 Part des emplois verts dans les pays de l'OCDE (2017–2019) par application de la formule (13.1) de Vona et al. (2018). Source : Figure 3 de Tyros et al. (2023). 13–19

13.7 Part des emplois dans les secteurs à haute émission de GES en 2019 et part de ces secteurs dans les émissions de GES. Source : Figure 3.2 de OECD (2024). 13–20
13.8 Green Employment Index des pays de l'Union européenne en 2022. Source : Ounnas (2025). 13–23

14.1 Parts cumulées de matériaux utilisés et d'emploi au niveau mondial en 2011. Source : Figure 2 de Laubinger et al. (2020). 14–3
14.2 Par de l'emploi se situant dans le secteur du recyclage, le secteur de la réparation et de la réutilisation et le secteur de la location et du leasing (ou crédit-bail) : comparaison entre 2014 (première observation) et 2023 (%). Source : Eurostat à l'adresse `https://doi.org/10.2908/CEI_CIE011`. 14–4
14.3 Créations et Destructions brutes d'emplois par région en 2040 : impact régional relatif du scénario de "réforme fiscale matérielle" par rapport au scénario de référence (en %). Source : Figure 7 de Château et Mavroeidi (2020). 14–8

15.1 Impact du licenciement parmi les travailleurs de la mine sur les rémunérations hebdomadaires au Royaume-Uni. Source : Figure 2 de Rud et al. (2024). 15–24
15.2 Probabilité de transition depuis un emploi "sale" vers un emploi vert en fonction du nombre de trimestres écoulés depuis que la personne a quitté l'emploi "sale". Source : Figure 3 de Curtis et al. (2024). 15–29
15.3 Ecart de rémunération offerte entre les emplois vacants génériques et soit les emplois vacants bas-carbone, soit les emplois vacants intensifs en carbone par groupe de professions et par période. Source : Figure 4 de Saussay et al. (2024). 15–38
15.4 Distribution spatiale de l'intensité d'offres d'emploi à faible intensité de carbone et d'emplois à forte intensité de carbone au sein des professions manuelles : moyenne sur la période 2010–2019 aux États-Unis. Source : Figure 6 de Saussay et al. (2024). 15–43
15.5 Part des professions vertes, déduction faite des professions à forte intensité de GES, et des professions à forte intensité de GES au niveau régional/de l'État, en écart par rapport à la moyenne nationale, points de pourcentage, moyenne 2015–19. Source : Figure 2.7 de OECD (2024). 15–45
15.6 Fonction de densité de probabilité de la mesure de proximité appelée "indice de Jaccard" (15.5) obtenue quand on compare les métiers de l'extraction des combustibles fossiles ("FF") aux professions vertes (FF-Green, en vert) et aux autres professions (FF-Others, en gris). Source : Figure 1 A de Lim et al. (2023). 15–53
15.7 Moyenne de l'intensité des catégories de compétences générales vertes (GGS) "Ingénieries et compétences techniques" et "Science" au sein des groupes de professions incluant des emplois bruns aux États-Unis. Source : Tableau 6 de Vona et al. (2018). 15–56

16.1 Taux de chômage trimestriel au sein de la population d'au moins 15 ans entre les premiers trimestres de 2000 et de 2026. Source : OECD Infra-annual labour statistics. 16–3
16.2 Part nationale des travailleurs exerçant une profession qualifiée à "haut potentiel" d'exercer des tâches vertes en 2016 (notion introduite dans l'encadré 25) : niveau national ("Total") et moyenne par grand secteur. Source : Figure 1 de Lobsiger et Rutzer (2021b). 16–6
16.3 Comparaison de l'indice "SSI" de risque de pénurie de main d'oeuvre pour les professions à "haut potentiel" d'exercer des tâches vertes et celles qui ne le sont pas : pays de l'Union européenne en 2016. Source : Figure 4 de Lobsiger et Rutzer (2021b). 16–8

Chapitre 1

Introduction

Les écosystèmes (les organismes vivants et leur biotope) ou encore, plus prosaïquement, "la nature", bénéficient directement aux humains via leurs dimensions esthétique, récréative, spirituelle, religieuse, etc. Les écosystèmes produisent aussi des biens et services fort variés, nécessaires à la vie sur terre et à l'activité économique (oxygène de l'air, biomasse, matières premières, sources d'énergie, filtration de l'eau, pollinisation, régulation des inondations, régulation du climat, etc.). On parle de bien ou de service environnemental ou encore de bien ou de service écosystémique. La nature est également le réceptacle d'un ensemble de rejets de l'activité économique (eaux usées, gaz à effets de serre[2] – dont l'acronyme sera GES –, polluants de toutes sortes, etc.). Or, la régénération et la capacité d'absorption de la nature sont limitées et l'économie est insérée, encastrée, dans la nature.

Dans ce contexte, les dérèglements climatiques sont une source de préoccupations croissantes pour l'humanité[3]. La manifestation la plus connue de ces dérèglements est la hausse généralisée des températures atmosphériques moyennes, induite par l'accumulation de GES. A cette hausse des températures moyennes sont associées une ampleur et une fréquence inégalées de phénomènes climatiques dommageables : sécheresses, pluies abondantes, ouragans, fonte des glaces et montée du niveau des mers, etc.

Ces dérèglements climatiques sont à placer dans un contexte plus large de l'atteinte et du dépassement d'un éventail de limites physiques de la planète (voir Steffen et al., 2015, Richardson et al., 2023, et Barbier, 2025). Au-delà d'une mise en contexte, le dépassement de ces limites produit des interactions ou encore des complémentarités :

> "Currently, anthropogenic perturbations of the global environment are primarily addressed as if they were separate issues, e.g., climate change, biodiversity loss, or pollution. This approach, however, ignores these perturbations' nonlinear interactions and resulting aggregate effects on the overall state of Earth

2. Un éventail de gaz dont les plus connus sont le CO_2 et le méthane.

3. Le propos assumé adopte ici une posture anthropocentrée car l'analyse économique, qui est le propos de ce texte, s'intéresse aux implications de décisions très diverses sur les humains.

> system. Planetary boundaries bring a scientific understanding of anthropogenic global environmental impacts into a framework that calls for considering the state of Earth system as a whole". (Richardson et al., 2023)

De tout temps, l'impact humain (ou anthropogénique) sur le changement climatique a été mis en doute par certains. Même si les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et d'auteurs comme Richardson et al. (2023) permettent de réfuter de tels discours, ils continuent à se répandre chez certains et ils prennent même de l'ampleur. En particulier dans le contexte européen, on parle de green (deal) backlash. Chez d'autres, un sentiment d'impuissance nourrit l'inaction et une forme de fatalisme. Chez d'autres encore, l'importance du défi climatique est reconnue mais d'autres préoccupations ont acquis un (plus) grand poids : la menace de conflits internationaux à grande échelle, la perte de compétitivité internationale de leur nation, la crainte d'une dépendance économique vis-à-vis de certains pays jugés menaçants, la pauvreté et les inégalités sociales. Certaines de ces préoccupations peuvent être prises en considération dans la formulation des réponses au défi climatique. Mais, les réponses à ces "autres préoccupations" peuvent aussi entrer en concurrence avec l'adoption de réponses appropriées au changement climatique.

Au départ de cette lecture de la réalité, l'ambition de ce livre est modeste. Il part des manifestations du changement climatique et de l'existence de politiques publiques visant à corriger certaines facettes de ce changement. Dans un effort de synthèse de la littérature, *ce livre se limite aux effets de ces manifestations et de ces politiques sur la "sphère du travail"*. Ceci inclut l'emploi, les revenus du travail, leur pouvoir d'achat et les inégalités correspondantes. *Cette synthèse cherche à objectiver les peurs en ces domaines et à identifier les mesures d'accompagnement éventuelles pour les générations actuelles.* Cette démarche n'est pas nécessairement suffisante pour influencer les perceptions[4]. Elle est même inutile aux yeux de certains acteurs pour qui la recherche de la vérité n'a guère d'importance. Ce livre s'adresse aux personnes qui ne sont pas de ce bord-là.

Etant donné la littérature disponible, l'accent sera mis sur le réchauffement de la planète et ses multiples conséquences sur des événements climatiques extrêmes (ouragans, sécheresses et inondations). Les interactions multiples que notamment Richardson et al. (2023) identifient seront dans une très large mesure négligées car, à ma connaissance, la littérature compulsée ne traite pas explicitement du lien entre ces interactions complexes et la "sphère du travail"[5].

En raison de la place qu'occupe le déni des crises environnementales, il a paru important de ne pas commencer ce livre par les effets d'une transition environnementale volon-

4. Voir Dechezleprêtre et al. (2025).

5. Cela dit, quelques économistes étudient les effets économiques de ces interactions. Voir par exemple Giglio et al. (2025) et OECD (2025b).

tariste sur la sphère du travail mais par une synthèse des connaissances sur les effets avérés du changement climatique sur cette sphère. L'enjeu des premiers chapitres n'est donc pas tant la question de l'adaptation au changement climatique que celle des conséquences de ce changement. L'approche de ces sections rejoint un objectif majeur du livre pédagogique de Park (2024).

En raison de cette organisation des thèmes abordés, ce livre se structure de la manière suivante. Il commence par quelques considérations de nature méthodologique. Ensuite, une première partie traitera du lien entre le changement climatique, compris comme la hausse des températures, et l'usage du temps par les individus, le développement du capital humain, la productivité du travail et la santé et la sécurité des travailleurs. Un chapitre ultérieur traitera des effets sur la sphère du travail d'autres phénomènes associés au changement climatique, tels les cyclones. Une seconde partie traitera des effets sur la sphère du travail de la transition environnementale comprise pour l'essentiel – et c'est clairement réducteur – comme une tentative de réponse au réchauffement planétaire.

Les ouvrages de référence de Barrage et Hsiang (2024) et Barrage et Hsiang (2026) abordent de très nombreuses questions liées au changement climatique mais ils ne contiennent pas un chapitre centré sur la problématique de l'emploi. L'article de Bilal et Stock (2025) propose une synthèse des analyses macroéconomiques du changement climatique. Le chapitre 26 de Hindriks et Myles (2013) et Barrage (2025) couvrent cette problématique sous l'angle de l'économie publique. Quelques textes portent spécifiquement sur la sphère du travail. Feriga et al. (2025) offrent une courte synthèse centrée sur les pays dits en développement. Le rapport de l'OECD (2024) couvre plusieurs thèmes abordés par ce livre. Deschenes (2014), Deschenes (2018), Connolly (2018) et Pestel (2019) résument également la littérature relative à certains thèmes abordés dans ce livre. Il sera régulièrement fait référence à ces textes. La problématique de l'adaptation au changement climatique est, elle, notamment couverte par Lai et al. (2023), Burke et al. (2024), Carleton et al. (2024), Ferreira (2024), Grover et Kahn (2025) et Bilal et Stock (2025). Signalons aussi l'ouvrage interdisciplinaire coordonné par Carr et Stein (Eds.) (2025).

Ce texte est produit par un économiste et il s'appuie largement mais non exclusivement sur la littérature en science économique. Disposer d'une formation de base en microéconomie et en économétrie (l'application de la statistique à l'analyse de données économiques) est un atout. Une introduction à l'économie du travail est une aide supplémentaire [6]. Ce ne sont cependant pas des prérequis. Grâce au rappel de définitions, à des notes de bas de page et à la présence d'encadrés, un maximum est fait pour permettre une compréhension même si l'on ne maîtrise pas ces acquis de base. La plupart des encadrés sont des approfondissements facultatifs.

6. Un manuel d'économie du travail en accès libre est disponible à l'adresse `https://oer.uclouvain.be/jspui/handle/20.500.12279/1127`.

Chapitre 2

Préambule méthodologique

Ce préambule aborde deux thèmes. Après avoir cerné la notion de climat, il discutera d'abord de la nature des mécanismes susceptibles de faire face à la dégradation climatique en cours. Ensuite ce chapitre se demandera comment il est possible de quantifier l'impact du changement climatique. Bien qu'il requiert des bases en statistiques, l'aperçu méthodologique proposé dans ce second temps sera plus intuitif que technique.

2.1 Le réchauffement planétaire, externalité globale

Avant d'évoquer le réchauffement planétaire, demandons-nous ce qu'est le climat pour un économiste.

> "Climate can be viewed as a public amenity : it is non-rival (a single person's consumption of climate does not reduce the amount of climate available to anyone else) and non-excludable (no person can be prevented from consuming climate), and although individuals can alter their local climates at home and at work, the outdoor ambient temperature is determined by factors outside of their control." (Baylis, 2020, p. 3)[7]

Le réchauffement planétaire et les phénomènes qu'il induit sont la dégradation du climat la plus immédiatement visible. Il s'agit d'une **externalité négative globale**[8]. L'effort

7. Le climat se distingue donc de l'eau, des poissons dans les océans, des énergies non-renouvelables, par exemple, car ces derniers sont des biens rivaux. En effet, leur consommation est privée au sens où l'eau, les poissons, les énergies non-renouvelables consommés par l'un ne sont pas disponibles pour quelqu'un d'autre. Sur la gestion des ressources communes, voir les travaux d'Elinor Ostrom.

8. Hindriks et Myles (2013) définissent une externalité de la manière suivante : "An externality is present whenever some economic agent's welfare (utility or profit) is 'directly' affected by the action of another agent (consumer or producer) in the economy. By 'directly' we exclude any effects that are mediated by prices" (p. 224).

(non) réalisé par un acteur économique quelconque pour limiter les effets délétères du réchauffement bénéficie (nuit) à tous alors que cet acteur en supporte seul le coût ou le désagrément (le bénéfice du coût évité). En présence d'externalités, il est bien connu que les mécanismes de marché ne sont pas à eux seuls capables d'engendrer une "bonne" allocation des ressources disponibles [9]. Néanmoins, s'appuyant sur le théorème de Coase (1960), on pourrait avancer que, moyennant une précision des droits de propriété, la négociation entre les parties impliquées permettrait une bonne allocation des ressources. Deryugina et al. (2021) résument cette vision et identifient quelques cas où elle a été mise en oeuvre dans la résolution de problèmes environnementaux n'impliquant pas beaucoup de parties. Pour Dasgupta (2021), cette manière de procéder ne se généralise pas :

> "Human activities give rise to externalities because *property rights* to large segments of the biosphere are either weakly defined or inadequately enforced. And a common reason for the latter is that Nature is *mobile* : the wind blows, rivers flow, fish swim, the oceans circulate, and insects and birds fly. One consequence of this is that no one can contain the atmosphere they befoul, the soil they contaminate, the rivers they pollute. Moreover, the harm they cause is *non-excludable*, meaning that it is not possible for the person or agency to whose action the harm is traceable to pick and choose those who are affected." (Dasgupta, 2021, p. 48)

En accord avec Dasgupta, l'approche de Coase (1960) est donc inapplicable à la plupart des cas pertinents lorsqu'il s'agit de changement climatique (et de la sauvegarde de la biodiversité). Adhérant à cette argument, la suite de ce texte considère que l'intervention des autorités publiques se justifie [10]. Encore faut-il disposer d'institutions internationales ayant l'autorité nécessaire ou de mécanismes internationaux appropriés. Or, le multilatéralisme dans le domaine climatique est actuellement affaibli, menacé. De nouvelles priorités géopolitiques cherchent en effet à prendre le pas sur le multilatéralisme.

Que ce soit en raison des limites des processus internationaux et nationaux publics ou pour d'autres raisons, il existe un courant de pensée alternatif qui ne se situe ni dans le déni, ni dans le fatalisme, mais qui considère que les défis environnementaux sont si profonds qu'ils ne peuvent trouver une réponse satisfaisante sans un changement profond de paradigme socio-économique [11]. Plutôt que de prendre d'emblée une position tranchée

9. Cette affirmation et la suite de cette sous-section présupposent des acteurs économiques mus par leur seul intérêt personnel. En langage économique, par bonne, il faut comprendre efficiente, où l'efficience consiste à ne pas pouvoir augmenter le bien-être d'un acteur économique sans réduire celle d'un autre, où en termes techniques le bien-être est capté par la fonction d'utilité.

10. Notons que l'intervention publique est ici justifiée par une défaillance des mécanismes de marché et le caractère rarement applicable du théorème de Coase (1960). Cet argumentaire est fort standard en économie mais ce n'est pas la seule manière possible de justifier le rôle de l'État. Or, Mazzucato et Ryan-Collins (2022) et Mazzucato (2023) argumentent que les pouvoirs publics façonnent et co-créent les marchés et ont pour rôle de définir des objectifs collectifs, en particulier dans le contexte des crises environnementales actuelles.

11. Ce courant peut être associé notamment à Meadows et al. (1972), Jackson (2009) et Parrique et al. (2019).

vis-à-vis de ce courant de pensée, ce texte évoquera son interpellation à certains moments.

2.2 Comment quantifier l'impact du changement climatique ?

Cette introduction aux questions de mesure privilégiera une facette du climat, à savoir la température, mais la généralisation à d'autres dimensions sera assez immédiate. Elle s'inspire en particulier des articles de Hsiang (2016), Kolstad et Moore (2020), Bento et al. (2023), Hogan et Schlenker (2024), Carleton et al. (2024), Traeger (2025) et Lemoine et al. (2026), qui approfondissent la méthodologie bien au-delà de ce qui peut être fait ici. Même si une autre approche sera aussi évoquée en fin de la section, l'accent sera mis sur les méthodes statistiques (économétriques) exploitant des données historiques sans postuler une théorie particulière [12].

Le "temps qu'il fait" est une notion complexe qui varie bien évidemment avec le "temps calendrier" et la localisation. Appréhender complètement cette notion est en pratique hors d'atteinte. Il est cependant généralement suffisant de décrire le "temps qu'il fait" par une série d'indicateurs synthétiques comme, bien entendu, la température et les précipitations, mais aussi la vitesse et la direction des vents, l'humidité relative, la couverture nuageuse, l'intensité du rayonnement ultraviolet émis par le soleil, etc. Ces indicateurs météorologiques ont une composante aléatoire. Leur observation en un lieu et un moment peut donc être vue comme un tirage aléatoire dans une distribution de probabilité. Le *climat* s'interprète comme la distribution de probabilité jointe du vecteur formé de tous ces indicateurs météorologiques. Même si par la suite il sera beaucoup question de température, la corrélation entre ces divers indicateurs a toute son importance : ignorer les autres indicateurs risque donc de biaiser l'analyse de l'impact de la température. Enfin, le *changement climatique* est compris comme une variation de cette distribution de probabilité jointe d'une époque à une autre. Le changement de climat au cours du temps peut être instantané, mais il est généralement graduel. Il se manifeste par des modifications dans les conditions météorologiques qui vont au-delà de la variabilité naturelle de ces conditions (où, par naturelle, on veut dire à distribution de probabilité inchangée). Détecter le changement climatique n'a dont rien d'immédiat ou d'évident, ni pour les professionnels du climat, ni a fortiori pour les acteurs économiques [13].

Le paragraphe précédent a de nombreuses conséquences sur la mesure de l'impact du changement climatique. Si, par exemple, la réalisation de la variable aléatoire "tempéra-

12. En termes techniques, on parle d'approches ou d'analyses en "forme réduite". Dans le contexte qui nous occupe, l'analyse cherche à identifier un lien entre la température et un phénomène d'intérêt sans développer les divers mécanismes à l'œuvre. Signalons que l'expression analyse en "forme réduite" s'utilise aussi dans un autre sens. Ayant un modèle qui explicite ces divers mécanismes en fonction de facteurs exogènes observés et de variables inobservées, la forme réduite est la solution obtenue à partir du modèle où les variables endogènes du modèle sont exprimées en fonction uniquement des facteurs exogènes et de variables inobservées.

13. Voir par exemple Newman et Noy (2023).

ture" se met à dépasser "la normale", les comportements vont s'ajuster dans les limites de ce qui est possible et rentable à court terme (étant donné les stocks de bâtiments, de capital productif, etc.). On peut interpréter cet ajustement comme une *adaptation ex-post* (c'est à dire en réaction à des changements réalisés) [14]. Si cette élévation de température est récurrente, il vient un moment où l'on s'attend à ce qu'elle perdure : la perception d'un changement climatique prend forme. Or, les attentes sont essentielles dans toutes les prises de décision d'investissement. Cette perception d'un changement durable va induire un processus d'*adaptation ex ante* en vue d'en atténuer l'impact compte tenu des attentes sur le climat à venir. Cette adaptation va modifier progressivement les stocks de bâtiments, de capital productif, etc., là où les coûts de l'adaptation sont plus faibles que les bénéfices attendus. D'autres formes d'adaptation qui incluent une dimension d'investissement sont la réallocation géographique d'activités économiques et la migration des personnes. La mesure dans laquelle les études parviennent à prendre en compte l'adaptation est donc très importante [15]. Or, la capacité d'adaptation est notamment tributaire du développement des technologies. En raison du progrès technique, la capacité future d'adaptation est potentiellement supérieure à celle du passé. On serait donc tenté d'en conclure que les études économétriques (qui exploitent nécessairement des observations du passé) ne peuvent qu'être pessimistes sur l'impact de l'évolution du climat à l'avenir. C'est cependant aller trop vite en besogne. Il peut, en effet, y avoir des comportements adaptatifs accessibles actuellement qui ne le seront plus à l'avenir [16].

Voyons à présent les implications de ce qui précède sur le travail d'identification des impacts du "changement climatique", où les guillemets rappellent la difficulté de mesurer celui-ci. Les conditions météorologiques ont un caractère aléatoire. Mais, le climat n'est pas sujet à des expériences contrôlées par les chercheurs. On peut certes en laboratoire soumettre des individus à des conditions différentes en termes de température et d'humidité, par exemple, et en mesurer les effets sur des "indicateurs d'intérêt" (encore appelés "résultats d'intérêt" ou "variables de résultat") comme la performance dans l'exécution d'une tâche. Mais, en dehors des expériences en laboratoire, cette possibilité de manipulation aléatoire est inaccessible. Il faut donc s'y prendre autrement.

Avant d'esquisser diverses approches, discutons très brièvement d'autres difficultés qui ont trait à la mesure des phénomènes météorologiques. Les conditions météorologiques sont mesurées par des stations munies d'équipement appropriés. La localisation de celles-

14. Par exemple, en présence d'une vague de chaleur, consommer davantage d'électricité pour améliorer la ventilation ou le conditionnement de l'air à l'aide d'équipements déjà disponibles.

15. A ce propos, voir Lai et al. (2023), Burke et al. (2024), Carleton et al. (2024), Ferreira (2024), Grover et Kahn (2025) et Bilal et Stock (2025).

16. Par exemple, face à une sécheresse, il peut y avoir eu des réserves d'eau dans les nappes phréatiques qui ne seront plus disponibles à l'avenir si les épisodes de sécheresse se répètent. De même, lorsque les techniques nécessaires à l'adaptation sont intensives en matières premières spécifiques, leur raréfaction à venir peut accroître le coût de l'adaptation et donc la rendre moins accessible.

ci et celle des objets de l'observation (individus, entreprises, etc.) diffèrent. Les conditions météorologiques expérimentées par ces objets sont donc nécessairement le fruit d'un travail de construction. En outre, les variables climatiques portent sur les conditions à l'extérieur du lieu où se mesure le phénomène d'intérêt (productivité du travail, formation du capital humain, etc.). Bien des études ne disposent pas d'informations sur les dispositifs installés pour atténuer les effets des conditions extérieures. "They investigate whether the physiological effect materializes despite defense investments, and they represent a lower bound of the societal costs of extreme temperatures, excluding the costs of adaptive behavior" (Krebs, 2024, p. 2038).

Une autre difficulté porte sur la mesure même de la température. Se contente-t-on de la moyenne sur une période d'intérêt ? Ajoute-t-on la variance ? Ou faut-il une information plus riche sur la distribution de la température ? Plusieurs études distinguent le nombre cumulé de jours (sur la période d'intérêt) où la température se situe au sein d'une succession d'intervalles. Lorsque la période d'intérêt est l'année, d'autres analyses distinguent les températures par saison. D'autres encore distinguent la mesure de la température au cours des heures ou des jours ouvrés et celle mesurée aux autres moments. La littérature économique est difficile à résumer notamment parce que la manière de mesurer le phénomène "température" n'est pas standardisée. Une source supplémentaire de difficulté est l'hétérogénéité des informations disponibles sur les autres facteurs météorologiques, dont certains sont corrélés avec la température et, potentiellement au moins, avec les indicateurs économiques d'intérêt (humidité, etc.)[17]. Ceci clôt l'évocation des questions de mesure. La suite introduira diverses manières d'identifier l'impact du "changement climatique".

2.2.1 L'exploitation de données en coupe instantanée

Bien des études exploitent des données "en coupe instantanée" (en Anglais, en "cross-section"). Il s'agit donc d'un échantillon (ou, plus rarement, de la population totale[18]) observé en un moment du temps. Comme la suite l'illustrera, plusieurs coupes instantanées peuvent être regroupées. On se limite ici à une seule. Par exemple, des régions[19] sont observées une année donnée. Elles sont soumises à des conditions climatiques différentes et on se demande si et en quoi ces conditions influencent des indicateurs d'intérêt (ou encore de résultat) comme la production économique, le taux de migration sortante, l'emploi, les émissions de GES, etc. durant cette même année. Cette approche permet que les conditions

17. En ergonomie, il semble qu'un consensus existe sur une mesure. Quand cette science s'intéresse au lien entre la température et l'activité professionnelle, la température est mesurée dans des conditions spécifiques : la "Wet-bulb globe temperature", qui est un indice composite tenant compte de la température, de l'humidité, de l'ensoleillement et du vent. La vidéo disponible à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=jstHHkm_6vQ propose une introduction à cet indice.

18. Par exemple, toutes les régions d'un pays.

19. L'énoncé qui suit se transpose à d'autres unités d'observations comme, par exemple, l'individu, le ménage ou l'entreprise.

climatiques soient un résumé de conditions météorologiques historiques observées sur une période potentiellement longue. Lorsqu'il en est ainsi, on a des raisons de penser que les différences observées d'indicateurs d'intérêt incorporent des comportements d'adaptation (ex ante et ex post) aux différences de conditions climatiques. Toutefois, en raison de la présence fréquente de caractéristiques pertinentes inobservées [20], il est difficile de défendre l'hypothèse selon laquelle des régions différentes se comporteraient, en moyenne, de manière identique si elles étaient soumises aux mêmes conditions climatiques. Ceci demeure généralement vrai même si l'on est capable de prendre en compte les caractéristiques géographiques et socio-démographiques de ces régions. Autrement dit, en raison de caractéristiques pertinentes *inobservées*, l'analyse de données en coupe instantanée a de la peine à convaincre que les effets estimés du climat ne sont pas des corrélations mais un lien de **causalité** entre des indicateurs de conditions climatiques et des variables de résultat. On craint en effet que l'effet soit biaisé. On parle de "biais de la variable omise".

Une variante de cette approche consiste à comparer deux époques éloignées l'une de l'autre. L'écart de la variable de résultat est mis en relation avec une constante et l'écart de températures, les deux écarts étant mesurés entre ces deux époques. On parle de "long-differences strategy" : elle exploite les variations régionales longues de températures et de la variable de résultat autour d'une moyenne. Hsiang (2016) et Kolstad et Moore (2020), notamment, évoquent des études procédant de la sorte [21]. En soi, il s'agit d'une approche en coupe instantanée mais les variables présentes dans la relation sont des différences. Toute variable manquante corrélée avec les variations longues engendre à nouveau un biais de la variable omise.

2.2.2 L'exploitation de données en panel

Une alternative consiste à observer les mêmes régions au fil du temps et à étudier l'association entre les conditions météorologiques observées et des variables de résultat (les deux étant dépendantes du temps). Les conditions météorologiques ont un caractère aléatoire qui aide à l'identification d'un lien de causalité [22]. Formalisons la chose en suivant Bento et al. (2023). Simplifions à l'extrême : disposant d'observations sur I régions pendant T périodes successives, désignons par y_{it} une variable de résultat mesurée au temps $t \in \{1, ..., T\}$ dans la région $i \in \{1, ..., I\}$; faisons abstraction de tous les autres déterminants de y pour ne prendre en compte que la température x_{it} ; admettons pour la simplicité que la

20. Pour qu'elles soient pertinentes et sources de préoccupation, ces caractéristiques doivent à la fois influencer les indicateurs d'intérêt et l'exposition aux conditions climatiques.

21. Par exemple, Burke et Emerick (2016).

22. Les prévisions météorologiques à court, moyen ou long terme viennent nuancer le caractère imprévisible du changement de temps. Si les comportements s'ajustent en réponse à ces prévisions, l'ignorance de ces ajustements peut être une source de biais (Lemoine, 2024).

relation soit linéaire[23]. L'approche en panel consiste à spécifier la relation suivante :

$$y_{it} = \beta_{FE}\, x_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}, \tag{2.1}$$

où μ_i est un effet fixe de région (captant les variables omises constantes spécifiques à l'unité d'observation i en ce compris des facteurs environnementaux constants[24]), λ_t un effet temporel (captant les effets temporels communs à toutes les entités i) et ε_{it} une variable aléatoire de moyenne nulle résumant tous les déterminants non observés. En soustrayant de (2.1), cette même relation évaluée au niveau moyen des variables, on obtient

$$y_{it} - \bar{y}_i = \beta_{FE}\ (x_{it} - \bar{x}_i) + \lambda_t - \bar{\lambda} + \varepsilon_{it} - \bar{\varepsilon}_i, \tag{2.2}$$

où les symboles surmonté d'une barre désignent la moyenne temporelle de la variable correspondante propre à chaque région i. Cette écriture montre que le paramètre β_{FE} est identifié à partir de chocs de température compris comme l'écart entre la température observée (une réalisation particulière du climat) et la valeur moyenne historique. L'impact d'un écart dû à une réalisation particulière en un moment quelconque est-il le même que l'effet d'un écart égal de conditions climatiques ? C'est l'hypothèse faite lorsqu'on exploite ce type d'approche. Elle n'a rien d'évident. Si les conditions climatiques changent, les attentes sont affectées. Il n'y a pas de raison qu'il en soit de même si la température s'écarte de sa moyenne. Aussi, est-il communément admis que le paramètre β_{FE} capte un effet de court terme de chocs de température (en ce compris, une adaptation ex post). S'il existe des marges d'adaptation ex ante, ce paramètre ne capte pas les effets d'un changement du climat[25].

Cependant, rien jusqu'ici ne précise ce qu'est l'unité de temps. Alors que certaines études utilisent l'année, d'autres auteurs préfèrent utiliser une période bien plus longue, par exemple, la décennie (voir, par exemple, Burke et Emerick, 2016, Boustan et al., 2020,

23. L'impact de la température est en réalité non linéaire. Pour en tenir compte, les auteurs partitionnent fréquemment l'éventail des températures en un ensemble d'intervalles. A chaque intervalle est associée une variable binaire qui vaut 1 si l'indicateur de température retenu se situe dans cet intervalle et zéro sinon. Dans les spécifications économétriques, à chaque intervalle est associé un paramètre propre qu'il y a lieu d'estimer. Cette approche présente des variantes. Voir par exemple Neidell et al. (2021). Notons qu'en présence de non linéarité, l'espérance de l'effet d'une élévation de la température dépend de la distribution de celles-ci.

24. Cette approche évite donc le problème de biais de la variable omise pour autant que celle-ci ne varie pas avec le temps. Pour autant qu'ils soient observables, la spécification (2.1) peut être enrichie par l'addition de facteurs exogènes temporels corrélés avec la variable y_{it}. Si des facteurs non constants sont ignorés et corrélées avec x_{it}, un biais de la variable omise resurgit.

25. Hsiang (2016) and Carleton et al. (2024) expliquent que cette affirmation n'est pas toujours correcte lorsque l'indicateur d'intérêt fait l'objet d'une optimisation en continu. Pour une discussion formelle, on peut aussi se référer à par exemple Mérel et Gammans (2021) et Lemoine (2024). Par ailleurs, si l'approche en coupe instantanée incorpore le phénomène d'adaptation et que l'approche en panel ne capte que l'effet à court terme, on peut songer à identifier l'ampleur de l'adaptation par l'écart entre les paramètres estimés dans chaque spécification. Bento et al. (2023) résument les écueils de cette manière de procéder (voir p. 4).

Liu et al., 2023)[26]. Dans ce contexte, les variables de résultat et les indicateurs météorologiques utilisées sont un résumé (souvent une moyenne) sur l'unité de temps retenue. Dans le cas de variables météorologiques, on capte de la sorte une "tendance" au sein de chaque époque. Si d'une époque à l'autre la valeur de la tendance change, on interprète cela comme un changement climatique (et non comme une différence due à l'inévitable variabilité d'échantillonnage)[27]. On considère que sur une telle unité de temps les attentes et les comportements d'adaptation ont le temps de former. Malheureusement, toute variable omise corrélée avec ces tendances et avec la variable de résultat biaisera l'estimateur de l'effet du climat.

2.2.3 Les "variations partitionnées"

Dans l'égalité (2.1), $\bar{x}_i$ est un estimateur de l'espérance mathématique de la température. Cette moyenne $\bar{x}_i$ contient donc de l'information sur la composante du *climat* qu'est la température. En plus de l'impact (à court terme) de $x_{it} - \bar{x}_i$, on ne peut cependant identifier l'effet sur y_{it} du *niveau* de $\bar{x}_i$ puisqu'il y a une colinéarité parfaite entre μ_i et $\bar{x}_i$.

L'approche dite des "variations partitionnées" (en anglais, "Partitioning Variation") contourne cette impossibilité d'identification de la manière suivante (Bento et al., 2023). On retire l'effet fixe μ_i de la spécification, on collecte un vecteur de caractéristiques (fixes) caractérisant l'entité i, noté ci-dessous c_i, et enfin on adopte une spécification telle que

$$y_{it} = f\left(x_{it} - \bar{x}_i\right) + g\left(\bar{x}_i\right) + c_i\,\gamma + \varepsilon_{it}, \tag{2.3}$$

où la fonction $f(\cdot)$ capte l'effet de court terme d'écarts inter-annuels de température par rapport à la moyenne[28] et la fonction $g(\cdot)$ capte l'effet de long-terme de la température moyenne incluant les comportements d'adaptation ex ante[29]. Cette spécification peut être généralisée (par exemple par l'introduction d'effets fixes spécifiques à des *groupes* de régions ayant des caractéristiques communes). Parmi d'autres, Moore et Lobell (2014) présentent une illustration de cette approche. Au sein de (2.3), l'impact à long-terme du climat est cependant estimé en exploitant la variation en coupe. Ceci signifie qu'un risque de biais dû à une variable omise du vecteur c_i demeure. Mérel et Gammans (2021) et Bento et al. (2023) présentent des alternatives originales à (2.3) qui offrent une réponse à cette préoccupation.

26. Un cas opposé n'est pas approfondi ici : lorsqu'il y a un changement météorologique abrupt et que la collecte de données est réalisée à haute fréquence, certains auteurs utilisent l'approche dite de "discontinuité de la régression dans le temps" (en Anglais, "Regression Discontinuity in Time"). Hausman et Rapson (2018) expliquent les défis rencontrés par cette approche et formulent des suggestions aux personnes qui souhaitent l'utiliser.
27. Cette observation s'applique aussi à la "long-differences strategy" évoquée plus haut.
28. Par exemple $f(\cdot) = \beta_0\,(\cdot)^2$.
29. Par exemple $g(\cdot) = \beta_1 + \beta_2\,(\cdot) + \beta_3\,(\cdot)^2$.

2.2.4 La simulation de modèles mathématiques

A côté de travaux d'estimation économétrique évoqués jusqu'ici, une autre approche consiste à simuler un modèle mathématique de l'économie où un accent est mis sur l'énergie et où une certaine place est accordée à l'environnement. La construction de tout modèle requiert des hypothèses simplificatrices. Ses propriétés sont tributaires des choix d'hypothèses retenus. Le modèle peut produire des propriétés analytiques mais son exploitation requiert le plus souvent que ses paramètres aient pris une valeur. Ceci s'obtient soit par calibration du modèle [30] soit à la suite d'un travail d'estimation économétrique (sur base, donc, de séries statistiques historiques). Cela étant fait, le modèle est simulé dans un scénario dit de base ("benchmark"), qui capture par exemple l'inaction climatique ou les politiques climatiques menées par le passé. L'évolution obtenue est ensuite comparée à la simulation de variantes où des réformes sont introduites en vue de (davantage) répondre aux défis climatiques. La suite (en particulier les chapitres 11 et 15) illustrera le recours aux modèles mathématiques.

30. L'approche par calibration consiste, en très bref, à fixer les valeurs des paramètres du modèle soit à des niveaux trouvés dans la littérature soit de manière à s'approcher au mieux d'indicateurs statistiques (par exemple, le modèle simulé doit reproduire un taux de chômage moyen ou un niveau d'émissions de GES observé sur une période).

Première partie

Les travailleurs face aux manifestations du changement climatique

Cette première partie traitera du lien entre le changement climatique, compris comme la hausse (généralisée, persistante et anticipée) des températures, et l'usage du temps par les individus (que sont l'emploi et le loisir), le développement du capital humain, la productivité du travail ainsi que la santé et la sécurité des travailleurs. Le dernier chapitre de cette première partie traitera des effets sur les travailleurs d'autres phénomènes associés au changement climatique : ouragans et cyclones, sécheresse et inondations.

Chapitre 3

Réchauffement climatique, allocation du temps et emploi

Les canaux de réactions du volume de travail à des variations climatiques sont multiples. Si l'on se limite à l'élévation des températures, un stress thermique survient lorsque le corps humain n'arrive plus à maintenir sa température à un niveau normal. Les températures qui engendrent un tel stress dépendent de divers facteurs, dont la nature du travail exercé. Mais les conséquences *directes* sont une modification de la quantité et de la qualité d'exécution des tâches exécutées par les travailleurs[31], une désutilité accrue de l'effort ou de la durée passée en emploi, et au-delà d'un seuil une dégradation de la santé du travailleur. Les conséquences *induites* sont potentiellement multi-dimensionnelles : la productivité du travail[32] et donc la demande de main d'oeuvre, les heures de travail offertes, les efforts d'adaptation au réchauffement sont autant de dimensions susceptibles de s'ajuster, induisant le cas échéant des modifications de salaires. Si un lien de causalité est établi entre le niveau des températures et le volume d'heures de travail observé, n'y voir qu'un ajustement de l'offre de travail (c'est à dire des décisions prises par la population en âge de travailler) ne va pas de soi. Le pas est néanmoins franchi par plusieurs articles portant sur le lien entre la température et l'allocation du temps. Il est plus prudent d'interpréter les ajustements observés comme une interaction entre l'offre de travail, la demande

31. Phénomènes mis en évidence par la littérature en médecine (voir notamment les références citées par Heal et Park, 2013, 2016). L'ergonomie et la physiologie ont produit de nombreuses analyses portant sur le stress que la température (élevée mais aussi basse) exerce sur le corps humain, notamment lors d'une activité de travail. L'endurance, la dextérité, la capacité de concentration etc. sont affectées. L'importance de ces effets tend à varier d'un individu à l'autre. Voir par exemple Hancock et al. (2007), Kjellstrom et al. (2016) et Cai et al. (2018) pour une synthèse des connaissances. Les études menées en laboratoire produisent des résultats dont la validité externe est incertaine car la désutilité de l'effort et de la concentration augmente probablement avec le stress thermique. Or, lors d'expériences en laboratoire, le degré de réalisation des tâches peut avoir moins d'implications, notamment financières, que dans la vie réelle.

32. Aspect abordé spécifiquement à la section 5.

de travail des entreprises et les mécanismes de fixation des salaires (et, plus largement, des conditions de travail)

3.1 Études exploitant des données en coupe instantanée

Graff Zivin et Neidell (2014) est l'article de base de cette littérature. Ces auteurs exploitent les enquêtes sur l'emploi du temps aux États-Unis. Il s'agit de données en coupe instantanée collectées annuellement au cours des années 2003 à 2006. Les auteurs regroupent les données de toutes ces années. Neidell et al. (2021) prolongent cette étude sur base des mêmes enquêtes mais en couvrant les années 2003 à 2018. Ils regroupent les activités en trois sous-périodes : 2003-2007, 2008-2014 (incluant la Grande Récession) et 2015-2018. Les participants à cette enquête sur l'emploi du temps fournissent la chronologie de leur emploi du temps sur une période de 24 heures d'un jour précis non choisi. Graff Zivin et Neidell (2014) regroupent les diverses occupations en trois durées journalières : le temps de travail professionnel [33], le temps consacré à du loisir à l'extérieur et celui consacré à du loisir à l'intérieur [34]. Prudents, les auteurs indiquent (p. 4) que tant les déterminants de l'offre que ceux de la demande de travail codéterminent leurs observations. La population est divisée en trois groupes : les travailleurs "exposés aux variables climatiques" [35] (en bref, les travailleurs exposés), les travailleurs "abrités" [36] et les personnes sans emploi. Disposant d'informations concernant le lieu de résidence et la date de la collecte de données d'emploi du temps, les auteurs y associent une série d'informations sur les conditions météorologiques locales *du moment* (températures maximale et minimale, niveau des précipitations, nature des précipitations, degré d'humidité, moments du lever et du coucher du soleil). Ils disposent aussi d'informations individuelles socio-démographiques.

Les trois durées évoquées ci-dessus sont analysées simultanément à l'aide de régressions économétriques. La spécification retenue par les auteurs permet que l'effet de la température maximale locale varie par intervalle de 5°F. En raison d'une normalisation, les impacts évoqués par la suite doivent être compris comme étant évalués en comparaison avec l'impact observé lorsque la température se situe entre 24 et 27°C (76–80°F). Cet effet relatif est estimé conditionnellement aux autres caractéristiques météorologiques locales déjà évoquées, aux caractéristiques socio-démographiques, à un ensemble de variables bi-

33. Les auteurs somment les minutes où l'activité déclarée de la personne se situe sur son lieu de travail (p. 3 et 4 de l'article). Ceci ne devrait donc pas inclure les temps de déplacement entre le domicile et le lieu de travail mais bien les temps de pause sur ce lieu.

34. Le temps de sommeil n'apparaissant pas affecté par la température, l'étude ne s'intéresse pas à cette dimension.

35. Il s'agit des travailleurs des secteurs de l'agriculture, de la sylviculture, de la pêche et de la chasse, de la construction, des industries extractives, du transport, de l'industrie manufacturière et des services publics (hors administration). Les auteurs vérifient la sensibilité de leurs résultats au retrait de certains secteurs de cette liste.

36. Ceux occupés dans les secteurs absents de la note précédente.

naires (“dummy variables”) relatives au jour de la semaine, au mois et à l’année ainsi qu’à un effet fixe propre au comté de résidence. Par la présence d’un effet fixe du comté, le modèle identifie la réaction comportementale *à court terme* à la température locale.

Les effets de la température maximale contemporaine ne se marquent clairement que pour les travailleurs exposés. La figure 3.1 se limite donc à ce groupe. Un effet négatif de la température sur le temps consacré au travail et, en miroir, un impact positif sur les activités de loisir en intérieur se manifestent au-delà d’environ 30°C (86°F). Au-delà de 38°C (100°F), la réduction d’une heure de temps de travail est significative sur le plan statistique [37]. Parmi les personnes sans emploi, un effet de substitution se marque assez nettement entre activités extérieures et intérieures à mesure que la température maximale devient fort élevée. Se centrant sur les travailleurs exposés, Neidell et al. (2021) concluent que *chaque* °F au-delà du seuil de 32°C (90°F) engendre une diminution statistiquement significative [38] du temps de travail quotidien de 2,6 minutes durant les périodes d’expansion économique [39]. En revanche, cet impact baisse quelque peu et cesse d’être statistiquement significatif entre les années 2008 et 2014. Les conditions économiques du moment paraissent donc interagir avec la relation entre la température et l’allocation du temps des travailleurs [40].

Graff Zivin et Neidell (2014) estiment aussi séparément le modèle pour des comtés historiquement plus chauds et plus froids. Les réactions comportementales sont moindres dans les premiers. Bien que l’écart ne soit pas statistiquement significatif, ceci suggère une adaptation de la population dans les zones plus chaudes.

La spécification statique évoquée jusqu’ici ne rend pas compte d’un ensemble de substitutions potentiellement présentes : à l’intérieur d’une journée, les activités peuvent glisser vers des heures plus fraîches de la journée ou être reportées vers d’autres journées plus fraîches. En outre, les individus peuvent s’accommoder à la hausse des températures en s’adaptant sur le plan physiologique ou en acquérant des équipements (par exemple, des ventilateurs ou l’air conditionné). Graff Zivin et Neidell (2014) étendent leur analyse afin de prendre en compte certains de ces aspects dans le cas des travailleurs exposés [41]. Ils étudient séparément la réponse des travailleurs exposés à la température durant les deux heures qui

37. Au seuil de 5%. Autrement dit, la probabilité que la réduction du temps de travail soit en réalité obtenue par hasard est de 5%.

38. Ce résultat se confirme lorsque l’industrie manufacturière est exclue de la catégorie à haut risque, lorsque des variables de contrôle sectorielles sont incluses et lorsque le modèle est estimé sans caractéristiques individuelles.

39. Passer de 90 à 100°F, soit d’environ 32 à 38°C, réduirait la durée quotidienne de travail de 26 minutes.

40. La longueur de la période observée par Neidell et al. (2021) conduit les auteurs à reconnaître que les décisions de migration pourraient être influencées par les changements météorologiques. Par conséquent, les échantillons observés d’année en année pourraient être endogènes et biaiser les conclusions si les personnes qui migrent entre comtés et les personnes sédentaires répondent différemment aux variations météorologiques. La présence d’un effet fixe géographique atténue quelque peu cette préoccupation dans la mesure où les effets estimés exploitent des variations de température et d’allocation du temps à l’intérieur d’un comté.

41. Et des personnes sans emploi, groupe dont il n’est plus question ici.

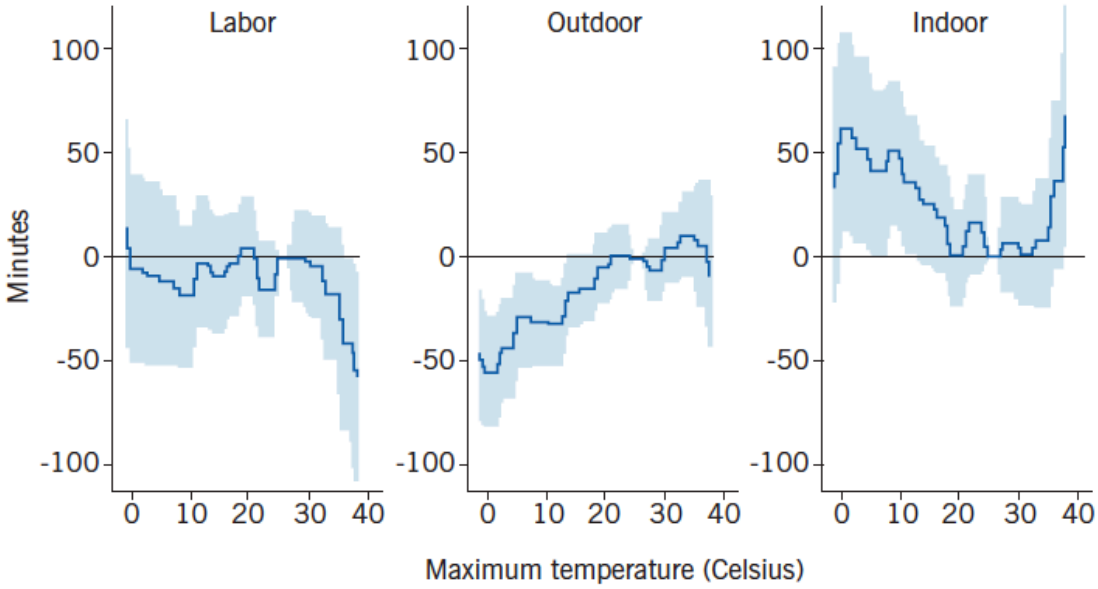


FIGURE 3.1 – Variation de l'emploi du temps en travail, en loisirs extérieur (Outdoor) et intérieur (Indoor) en fonction de la température la plus élevée le même jour, l'effet étant normalisé à zéro sur la plage 24-27 degrés celsius. Source : Connolly (2018) au départ de la figure 3 de Graff Zivin et Neidell (2014).

La fourchette de températures pertinentes est divisée en intervalles de 5°F. Un paramètre est estimé pour chaque intervalle, avec une normalisation à zéro sur l'intervalle 76-80 °F. Les caractéristiques individuelles prises en compte sont un ensemble de caractéristiques démographiques, les revenus annuels du travail, le revenu total de la famille. Parmi les variables de contrôle figurent aussi les autres indicateurs météorologiques. Pour plus de détails, voir les légendes des figures de l'article de Graff Zivin et Neidell (2014).

suivent le lever du soleil et à celle observée les deux heures avant son coucher d'une part (ci-dessous, les "extrêmes") et aux températures le reste d'une journée ouvrable d'autre part (c'est à dire durant les heures ouvrables "standards"). La durée consacrée au travail répond nettement plus aux variations de température quand on s'intéresse aux extrêmes de la journée que lorsqu'on considère les heures ouvrables standards. Ceci suggère que les travailleurs n'ont guère de latitude d'ajuster leur durée du travail durant les heures ouvrables standards. Graff Zivin et Neidell (2014) ne détectent pas de possibilité de substituer l'usage du temps des travailleurs exposés entre des journées différentes. Comme l'indique les auteurs, ceci n'exclut pas une capacité d'adaptation plus forte quand le changement de température s'opère sur la longue période, phénomène que les données disponibles ne permettent pas d'observer. L'article de Cosaert et al. (2023) en est une illustration. Avec les mêmes données américaines que Graff Zivin et Neidell (2014), mais en couvrant les années

2004 - 2019, Cosaert et al. (2023) concluent que les travailleurs réduisent le temps travaillé le matin et en début d'après-midi et accroissent leur temps de travail après 20 heures lorsque les températures sont élevées (à partir de 30°C, 86°F). Cet effet nocturne se retrouve tant sous la forme du travail à distance ("working from home") que dans le cas du travail sur le site de l'employeur. L'effet s'observe pour les travailleurs "abrités" comme parmi ceux qui sont "exposés" mais l'effet se marque plus chez ces derniers. Au cours des années 2006 à 2014, Dillender (2021) conclut que les travailleurs exposés (travaillant à l'extérieur) réduisent davantage leurs heures de travail en réponse aux températures élevées dans les parties des États-Unis où le climat est en moyenne plus frais.

Utilisant l'enquête sur l'emploi du temps en Allemagne de 2001-2002, Krüger et Neugart (2018) s'inspirent de l'article de Graff Zivin et Neidell (2014) en distinguant des métiers où l'allocation du temps de travail est flexible ou non. Ils concluent que peu importe le type de travailleur la faculté de substituer la durée de travail dans le temps en réponse à des variations de température est faible.

D'autres recherches exploitent des données moins fines que l'allocation du temps au sein d'une semaine de référence. Abou-Ali et al. (2023) étudient le rôle des conditions météorologiques sur la durée hebdomadaire du travail en Egypte, en Jordanie et en Tunisie en s'inspirant également de l'approche de Graff Zivin et Neidell (2014). Ils obtiennent que la relation entre la durée hebdomadaire du travail et la température maximale moyenne hebdomadaire décrit un U inversé. Pour les travailleurs exposés uniquement, ils mettent aussi en évidence que la durée de travail décroit avec l'indicateur d'humidité relative.

3.2 Études exploitant des données de panel

Quelques études basées sur des enquêtes longitudinales auprès de ménages ou des données de panel de régions ou de pays nous renseignent sur l'effet (non-linéaire) de variations inter-annuelles de température sur la marge extensive (travailler ou non) ou sur la marge intensive (le volume annuel d'heures travaillées parmi les personnes en emploi). L'accent n'est donc plus ici sur l'allocation du temps au sein d'une courte période (une journée par exemple). Si le phénomène d'attrition [42] est aléatoire, le recours à des données de panel évite les risques de changement de composition de l'échantillon en fonction de facteurs climatiques.

S'intéressant aux zones rurales du Mexique sur la période 1980-2007, Jessoe et al. (2018) disposent de réponses rétrospectives à une enquête auprès d'un échantillon de ménages portant sur le fait d'avoir ou non travaillé une année donnée et sur le type d'emploi exercé [43]. Les auteurs s'intéressent à toute la population en âge de travailler et disposent

42. C'est à dire la disparition de ménages ou d'individus de l'échantillon au cours de la période d'observation.

43. Deux enquêtes seulement ont été réalisées (une en 2008 et l'autre en 2003). Par conséquent, l'information

d'un échantillon d'environ 8000 individus. Vu le caractère rural de l'échantillon les auteurs limitent l'échantillon de données météorologiques à la saison de croissance de la culture dominante (le maïs). Ils exploitent les variations inter-annuelles de température et de précipitations locales conditionnellement à un effet fixe individuel et un effet temporel propre à chaque État du Mexique [44]. Une variable explicative, dénommée HDD, émerge de l'analyse. HDD, est la somme (sur toute la saison de croissance) des écarts entre la température moyenne quotidienne [45] et 32°C (90°F). La probabilité d'être en emploi [46] baisse significativement (au seuil d'1%) de 0,05 points de pourcentage (p.p.) par unité additionnelle de HDD (par exemple, une journée où la température moyenne passe de 32,5 à 33,5°C). Un supplément d'un écart-type de la distribution de HDD (soit 36,5 unités supplémentaires) ferait chuter la probabilité d'être en emploi de 47,8 à 45,9% (une baisse d'1,9 p.p.). L'effet d'une unité supplémentaire de HDD réduit de 0,04 p.p. (respectivement, 0,03 p.p.) la probabilité d'être occupé dans un emploi non agricole (respectivement, un emploi salarié). La baisse dans l'emploi agricole (de 0,01 p.p.) n'est, étrangement, pas statistiquement significative. Selon les auteurs, ces résultats suggèrent une forte imbrication entre les secteurs. Jessoe et al. (2018) identifient également un effet de la température sur la probabilité de migrer des zones rurales vers les villes et vers les États-Unis.

Li et Pan (2021) suivent des individus âgés de 16 à 60 ans dans un échantillon de provinces rurales en Chine au cours de la période 1989 - 2011 [47]. Li et Pan (2021) exploitent eux aussi les variations inter-annuelles de température [48]. Ils conditionnent leur estimation principale à une mesure de l'intensité des précipitations annuelles, à des caractéristiques socio-démographiques individuelles [49] et de la communauté locale, à des effets fixes de ménage et du mois de l'enquête ainsi qu'à un effet temporel. La conclusion de leur analyse économétrique confirme le caractère non-linéaire de l'effet de la température mais aussi des précipitations : en moyenne, un jour supplémentaire extrêmement chaud ($\geq$ 30°C) réduit le volume annuel d'heures de travail de 0,42%, et un jour supplémentaire de fortes précipitations ($\geq$ 30mm/jour) diminue ce même volume de 0,38% [50]. De plus, en moyenne, un jour supplémentaire extrêmement chaud réduit les revenus annuels du travail de 1,03%. Ces ef-

rétrospective relative à une si longue période risque d'être entachée d'erreurs de mesure.

44. L'effet fixe individuel capture l'impact de caractéristiques propres à l'individu stables au cours de la période d'observation. L'effet temporel capture l'impact de l'éventail des facteurs commun à un État tout au long de cette même période (qu'il s'agisse, par exemple, de la conjoncture économique, de facteurs environnementaux ou de politiques publiques pertinentes qui, tous, sont spécifiques à cet État).

45. Obtenue en prenant la moyenne des températures maximum et minimum du jour dans le village.

46. Agricole ou non, salarié ou indépendant.

47. Sur cette période, dix enquêtes ont été réalisées espacées de 2 à 4 années. Pour plus de détails, voir https://www.cpc.unc.edu/projects/china/about/design/sample.

48. Le nombre annuel de jours où la température moyenne journalière locale se situe dans un des 17 intervalles considérés. Un de ces intervalles englobe les températures d'au moins 30°C (86 °F).

49. L'âge et son carré, les années de scolarité, le statut marital, le genre, le fait d'élever ou non des enfants âgés de moins de six ans et la taille du ménage.

50. En moyenne, par année, on observe 4,3 jours extrêmement chaud et 7,7 jours de fortes précipitations.

fets, statistiquement significatifs au seuil d'1%, sont considérables. Ces résultats tous types de travailleurs confondus sont ensuite ventilés selon que les travailleurs appartiennent ou non au secteur agricole[51]. L'effet de températures extrêmes sur le volume d'heures travaillées est significativement négatif dans le secteur agricole mais pas dans le secteur non agricole. En Chine, les travailleurs du secteur agricole sont essentiellement des indépendants. En revanche, les travailleurs du secteur non agricole sont typiquement des salariés au temps de travail fixe. Les auteurs détectent un effet négatif bien perceptible de la température sur les salaires annuels hors du secteur agricole. Cet effet est négatif mais n'est pas significatif dans le secteur agricole. Les auteurs explique cela par la petite taille de l'échantillon (les indépendants ne déclarant généralement pas de salaire). L'effet sur la probabilité d'être en emploi dans ces zones rurales est faiblement négatif mais il n'est pas statistiquement significatif. Ces derniers résultats contrastent avec ceux de l'étude précédente relative aux zones rurales au Mexique. Concernant le risque d'attrition endogène, Li et Pan (2021) concluent qu'il y a une faible corrélation positive entre la probabilité de ne plus apparaître lors de l'enquête suivante et les températures extrêmement élevées durant l'année en cours.

En résumé, dans les zones rurales mexicaines et chinoises, une dégradation des conditions météorologiques a des effets de court terme défavorables sur des indicateurs individuels d'emploi ou de volumes de travail à condition que la dégradation soit suffisamment marquée. La mesure dans laquelle ces effets gagnent ou non les secteurs non agricoles diffère d'un pays à l'autre.

D'autres études exploitent cette fois des panels de régions. Colmer (2021) s'intéresse aux effets de la température et des précipitations sur l'emploi des personnes entre 14 et 65 ans vivant en Inde entre 2003 et 2008. L'unité de temps est ici aussi l'année. Le secteur agricole concentre en moyenne 55% de la force de travail. Il s'agit pour l'essentiel de travailleurs sans terre employés dans le cadre de contrats journaliers. Colmer (2021) exploite un panel de districts[52]. Conditionnellement à la pluviosité annuelle, un effet fixe de district, un effet temporel et une tendance propre à État, des températures plus élevées[53] sont associées à une réduction significative de la part de l'emploi agricole au sein du district (-7,1 points de pourcentage/1 °C), une augmentation des parts de l'emploi dans l'industrie manufacturière (2,0 points de pourcentage / 1 °C) et dans les services services (3,4 points de pourcentage/1 °C). La part de l'emploi dans la construction n'est, elle, pas modifiée.

L'étude suivante porte sur un panel d'États aux États-Unis. Les indicateurs sont des moyennes annuelles de température et de précipitation. Plus précisément, Kahn et al. (2019) étudient l'effet d'écarts de température et de précipitation par rapport à une norme histo-

51. Le secteur agricole inclut les agriculteurs, les pêcheurs et les chasseurs. Le secteur non-agricole regroupe les autres professions.

52. Le district est une subdivision des États. Il y a 28 États et plus de 700 districts en Inde.

53. Les résultats principaux exploitent la moyenne annuelle de la température journalière moyenne. Des annexes autorisent l'effet de la température à être non linéaire.

rique[54] sur le niveau annuel moyen de l'emploi[55] aux États-Unis. L'unité d'observation est un des 48 États. La spécification permet que l'effet d'un écart à la norme historique puisse être différent selon son signe. Mais, à signe donné, l'effet est linéaire. L'étude porte sur la période allant de 1976 à 2016. La spécification est dynamique[56]. La suite résume les effets à long terme. Un écart (positif ou négatif) de précipitation a un effet estimé défavorable sur l'emploi qui est statistiquement significatif mais petit. Un écart (positif ou négatif) de température a un effet lui aussi défavorable sur l'emploi. Il est statistiquement significatif et plus élevé en valeur absolue lorsque l'écart est négatif[57].

A l'aide de données macroéconomiques d'un panel formé des 1160 régions de l'Union européenne des 27[58] et couvrant les années 1995 à 2022, Usman et al. (2025) concluent qu'une vague de chaleur estivale[59] réduit en moyenne l'emploi et le volume des heures travaillées. Quatre ans plus tard, la baisse avoisine 1%[60]. Cette diminution est statistiquement significative au seuil de 10%.

L'impact de la température sur l'allocation du temps et l'offre de travail peut varier selon le genre. Peu d'études nous éclairent à ce sujet. Lee et al. (2021) résument la maigre littérature en ces termes : "The existing evidence shows that women's vulnerability to climatic shocks are driven mostly by their limited access to and control over productive resources (e.g., land and credit) and reliance on climate-sensitive activities (e.g., collection of water and fuelwood)" (p. 733). Lee et al. (2021) développent aussi leur propre analyse en s'intéressant aux effets d'une vague de chaleur (températures supérieures à 29°C) durant la saison de croissance du maïs en Tanzanie. Ils concluent que "heat stress reduces male family labor irrespective of activity type but has largely no effect on female family labor" (p. 733). Dans les zones rurales de Chine, Li et Pan (2021) aboutissent à une conclusion différente : "the decline in working hours after additional extremely hot days is mainly

54. Obtenue à l'aide d'une moyenne mobile basée sur les valeurs prises au cours des 20, 30 ou 40 années précédant l'année courante. Peu importe la durée retenue, les effets sur l'emploi décrits ci-dessous se maintiennent en termes de signes et d'ordre de grandeur. Sur la période 1963-2016, la température moyenne annuelle d'un État a crû de 0,026 degrés Celsius par an.

55. Au sein de la population civile de 16 ans au moins résidant au sein des ménages privés. Ceci exclut les personnes vivant dans des institutions (résidences pour personnes âgées, prisons, etc.) ou des ménages collectifs (institutions religieuses, etc.).

56. Plus précisément, il s'agit d'une spécification autorégressive à retards échelonnés ou distribués (en Anglais, "Autoregressive distributed lag specification").

57. Les auteurs n'ont pas testé si l'effet estimé varie dans le temps. Pour l'indicateur de produit intérieur brut de l'Etat où la série temporelle est plus longue, les auteurs font une telle vérification et concluent que la valeur absolue des effets estimés croît avec le temps.

58. Les définitions régionales sont celles de la nomenclature européenne appelée NUTS-3. A propos de cette nomenclature, on peut consulter la page `https://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts`.

59. Mesurée par une variable binaire valant 1 si la température moyenne du trimestre dépasse la moyenne historique (mesurée sur la période 1991-2020) d'au moins 1,5°C et zéro sinon.

60. Il ne semble toutefois pas que cette étude se préoccupe de l'autocorrélation spatiale. Celle-ci signifie que les unités d'observations ne sont pas statistiquement indépendantes.

driven by the decrease in female working hours" (p. 2283). De même, l'étude de Jessoe et al. (2018) relative aux zones rural mexicaines conclut que la baisse des heures de travail induite par des journées extrêmement chaudes supplémentaires est principalement due à la diminution des heures de travail des femmes. Des différences dans la nature des tâches exécutées et la division du travail pourraient expliquer ces conclusions opposées.

3.3 Résumé et élargissement de la perspective

L'éventail d'études résumées ci-dessus a porté sur l'effet d'indicateurs météorologiques (ou de variations de ceux-ci) sur l'allocation du temps au sein d'une journée, l'emploi, le volume d'heures travaillées et, parfois, les rémunérations. Les études exploitant des coupes instantanées ont parfois tenté de nous convaincre que le risque de biais de la variable omise et celui de l'endogénéité des échantillons de population sont faibles. Mais, ces risques ne sont pas pour autant évacués. Les études exploitant des panels nous ont informés de réponses à des variations aléatoires de température. Comme la section méthodologique l'a expliqué, il n'est cependant pas acquis que toutes ces études, au demeurant bien intéressantes en elles-mêmes, nous aient appris beaucoup sur l'impact du changement climatique. Ceci et l'hétérogénéité des indicateurs de résultat compliquent la comparaison entre des études.

En résumé, ces études, qui couvrent les deux hémisphères de la planète, ont assez souvent indiqué que les effets des conditions météorologiques varient selon le type de profession ou encore le secteur. L'effet de la température se marque au-delà d'un seuil situé à environ 32°C (90°F) dans les professions et les secteurs davantage exposés à la chaleur. L'impact négatif se marque en termes de volume d'heures de travail ou de probabilité d'être en emploi. Sur les autres professions et secteurs, les effets négatifs de fortes températures ne se marquent pas systématiquement. En outre, la littérature n'a pas atteint de consensus sur le point de savoir si les femmes subissent davantage les effets de températures élevées que les hommes. Des effets négatifs de températures élevées sur les rémunérations ont été trouvés en Chine.

Des estimations évoquées ci-dessus, certains auteurs, comme Jessoe et al. (2018) et Neidell et al. (2021), sont tentés de déduire des prédictions basées sur des scénarios d'évolution des conditions météorologiques à moyen ou long terme, et donc de changement climatique. L'exercice apparaît périlleux. Le rapport de l'International Labour Office (2019), se risque même à une prédiction au niveau mondial en ces termes [61] :

> "Projections based on a global temperature rise of 1.5°C by the end of the twenty-first century, and also on labour force trends, suggest that, in 2030, 2.2

61. L'annexe 1 du rapport explique brièvement la méthodologie utilisée. Elle exploite des modèles climatiques. Les réactions au stress de chaleur et à d'autres facteurs se basent sur des études épidémiologiques et ergonomiques (p. 90).

> per cent of total working hours worldwide will be lost to high temperatures – a (...) loss equivalent to 80 million full-time jobs." (International Labour Office, 2019, p. 13)

Les effets attendus par International Labour Office (2019) varient toutefois fortement d'une région du monde à l'autre. Ils se marquent surtout dans l'hémisphère sud et plus particulièrement encore en Afrique (figure 2.5 du rapport).

Chapitre 4

Réchauffement climatique et développement du capital humain

Les conditions climatiques sont susceptibles d'influencer le processus d'acquisition de capital humain[62] tout au long de la vie : in utero, pendant les périodes pré-scolaire et scolaire et ensuite durant la vie professionnelle (on-the-job learning et lifelong learning). La littérature portant sur le lien entre les conditions climatiques et le capital humain a surtout porté sur des individus durant leur scolarité.

Les conditions climatiques peuvent influencer directement l'acquisition des compétences dans les établissements scolaires (via un effet sur les enseignants ou sur les élèves) et au domicile. Une influence de ces mêmes conditions sur la santé et la nutrition aurait un effet induit sur l'acquisition des compétences. Un ensemble d'autres effets induits existent potentiellement aussi : lorsque les conditions climatiques affectent les prix et la capacité à générer des revenus, on s'attend à un effet induit sur la nutrition et la santé. Un effet induit (de la santé, des revenus et des prix) sur les finances publiques peut à son tour se répercuter sur la qualité des infrastructures (accessibilité des écoles, bâtiments scolaires, etc.). Ici comme ailleurs, des comportements d'atténuation des effets de la chaleur sont susceptibles d'être à l'oeuvre. Caruso et al. (2024) proposent une synthèse de cette littérature.

La littérature évoquée ci-dessous ne cherche pas à identifier séparément les divers mécanismes esquissés à l'instant. Elle met l'accent sur le rôle de la température en conditionnant, le plus souvent, cet effet à la présence d'une série de facteurs explicatifs alternatifs, parmi lesquels figurent les autres conditions climatiques. La littérature porte sur les effets de la chaleur extérieure au moment où se mesurent les indicateurs de capital humain. En complément à cette quantification des effets à court terme de la température, une partie de la littérature tente aussi de mesurer les effets du changement de climat.

62. Ce terme désigne désigne le stock de compétences (cognitives, sociales, émotionnelles, ...) utiles dans la vie professionnelle et incarnées dans un travailleur donné.

Pour quantifier la notion de capital humain, cette littérature s'intéresse aux résultats à des tests réalisés au cours d'enquêtes, à des jeux en ligne d'entraînement à des calculs mentaux de la vie courante, à des épreuves d'admission et des évaluations académiques. Ces tests et épreuves se différencient notamment par leur enjeu et par le caractère familier ou non des tâches à accomplir. Un test ou une épreuve ne révèle pas automatiquement et sans interférence le capital humain acquis. Les conditions météorologiques peuvent rendre plus complexe la gestion du stress que les tests à enjeu provoque généralement. Ce facteur complique la compréhension du lien entre la température et la performance à de telles épreuves. A contrario, lorsque l'enjeu de tests est faible, des températures élevées risquent d'entraîner une baisse de l'effort, un problème que l'on devrait moins rencontrer dans le cas des épreuves à enjeu. Chaque type d'enjeu apporte donc son lot de complication lorsque l'on cherche à interpréter les résultats obtenus. En outre, un biais peut s'observer si les évaluateurs manipulent sélectivement les notes en cas de forte chaleur lors du test.

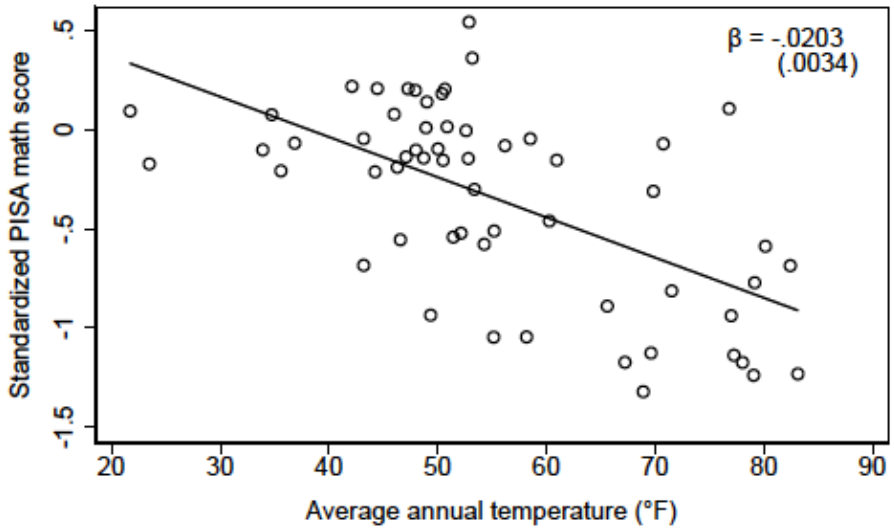


FIGURE 4.1 – Test PISA standardisé en mathématiques (parmi les élèves de 15 ans en 2012) et température moyenne sur la période 2009-2013 en degrés Fahrenheit. Source : Park et al. (2020).

Chaque point désigne un pays. La droite de la régression du score Pisa sur la température moyenne est dessinée et sa pente β fournie avec son écart type.

Commençons par une analyse descriptive. Si l'on trace un graphe a deux dimensions avec sur l'axe vertical le test de mathématiques du "Programme for International Student Assessment" (PISA) de l'OCDE [63] et sur l'axe horizontal la température moyenne du pays

63. Ces épreuves uniformisées testent les compétences formelles des élèves de 15 ans en lecture, mathéma-

correspondant, on obtient une corrélation négative marquée (voir la figure 4.1), mais y a-t-il un lien de causalité entre ce type de variables ? Park et al. (2021a), qui exploitent les données PISA de 58 pays sur la période allant de 2000 à 2015, répondent par l'affirmative. Afin d'identifier l'effet des températures sur le score moyen [64] au test tri-annuel PISA d'un pays, ils exploitent la variation inter-annuelle du nombre de jours où la température dépasse le seuil de 26,7°C (80°F) dans ce pays au cours des trois années précédant chaque test [65]. Quand ils distinguent les journées scolarisées et les autres, ce sont les températures élevées durant les premières qui nuisent aux scores des élèves. Quand ils étudient l'effet séparément parmi les pays au revenu par tête inférieur à la moyenne (en 1995) et parmi les autres, l'impact est beaucoup plus marqué parmi les premiers. La suite se penchera sur des études exploitant des données individuelles d'un pays particulier.

4.1 Tests à faible enjeu

Poursuivons en considérant quelques études portant sur des tests cognitifs sans grand enjeu pour la population car ils n'ont pas d'implication sur le devenir des participants [66]. Parmi les premiers à s'attaquer à cette question, Graff Zivin et al. (2018) étudient les effets à court et à long termes de la température (et d'autres indicateurs comme le degré d'humidité, par exemple) sur les résultats de tests standardisés visant à évaluer les acquis cognitifs en mathématiques et en lecture aux États-Unis. L'analyse a porté sur environ 8000 enfants [67] observés sur la période 1988-2006. La date du test était arrêtée indépendamment de la réalisation des conditions climatiques du jour concerné. Comme ces tests ont eu lieu dans des comtés et à des moments différents et que le lieu de résidence est connu, les chercheurs ont pu associer de l'information sur les conditions climatiques locales et datées aux résultats de ceux-ci.

L'analyse des effets *à court terme* étudie la relation entre les résultats à un test donné et la température locale *mesurée au même moment*, conditionnellement à un ensemble de variables de contrôle [68]. Au terme des estimations et de plusieurs analyses de robustesse,

tique et sciences dans de 85 pays. Pour plus de détails, voir `https://www.oecd.org/pisa/`.

64. Il s'agit de la moyenne des résultats standardisés en lecture, mathématique et sciences.

65. Cette analyse est conditionnelle à notamment un effet fixe de pays et à des effets temporels, à des tendances temporelles propres à chaque continent et à de l'information sur les précipitations.

66. Les tests réalisés lors d'enquêtes ne sont pas les seules manières de mesurer des compétences via un procédé sans sérieux stress pour les participants. Krebs (2024), par exemple, exploite les performances à un jeu d'entraînement à des calculs mentaux simples de la vie courante (Raindrops).

67. Ils exploitent un panel qui suit dans le temps 12000 personnes âgées de 14 à 22 ans en 1979 (voir `https://www.nlsinfo.org/content/cohorts/nlsy79`). A partir de 1986, des tests standardisés ont été administrés au domicile de tous les enfants (de 5 ans au moins) des femmes de l'échantillon de 1979.

68. L'âge de l'enfant, d'autres variables météorologiques pertinentes, le mois et le jour de la semaine du test, une tendance non linéaire propre à chaque État - qui mesure notamment des comportements d'adaptation au climat communs aux résidents de l'État concerné - et une caractéristique fixe propre à l'enfant.

les auteurs concluent qu'à court terme et au-delà d'un seuil d'environ 26°C, l'élévation de la température nuit significativement aux performances en mathématiques mais pas en lecture. Cette différence qualitative d'impact interpelle. Les auteurs l'expliquent à partir des connaissances neurologiques sur le fonctionnement du cerveau [69].

Comme ces effets instantanés ne nous informent pas de ceux du changement climatique lorsque des comportements d'adaptation sont possibles, Graff Zivin et al. (2018) développent deux approches pour mesurer un effet *de long terme* de la température sur les performances en mathématiques. Tout d'abord, ils cherchent à expliquer, pour un enfant donné, l'écart de résultat entre deux tests consécutifs (distants en moyenne de 2,2 années). Dans ce cas, l'indicateur de température devient, par exemple, la proportion du temps écoulé à une température supérieure à un seuil au cours de la période séparant les deux tests. Des indicateurs analogues de cumul sont créés et pris en compte pour les autres facteurs climatiques (précipitations, etc.). La spécification retenue cherche donc ici à expliquer l'écart de résultat au test par l'information cumulée de température conditionnellement à un ensemble de variables (essentiellement, l'écart d'âge, les autres indicateurs cumulés de facteurs météorologiques et une tendance non linéaire propre à chaque État). La seconde approche consiste à exploiter des données en coupe instantanée. Le résultat à un test en un point donné du temps est expliqué par des indicateurs de température (et d'autres facteurs climatiques), mesurés localement et cumulés depuis la naissance de l'enfant. Le risque de biais de la variable omise est ici plus grand [70].

Au terme de l'estimation de spécifications relevant des deux approches et après diverses analyses de robustesse, Graff Zivin et al. (2018) concluent qu'on ne peut rejeter l'hypothèse que les effets de la température sont nuls en longue période. Ceci suggère donc que sur la période 1988-2006 les possibilités d'adaptation ont été importantes. Couvrant des années plus récentes (2009-2015), Park et al. (2021a) aboutissent à une conclusion différente. Ils exploitent les données de tests annuels obligatoires en mathématiques et en anglais réalisés dans les écoles publiques aux États-Unis au niveau du district. Les États américains ont l'obligation de rendre publics les scores mesurés à un niveau suffisamment agrégé pour garantir la confidentialité. Comme les tests PISA, ceux-ci visent à mesurer les acquis d'ap-

69. Il faut savoir que la part de chaleur émise par le cerveau est environ dix fois supérieure à la part qu'il représente dans notre corps. Quand la température augmente, l'élimination de cette chaleur est de suite plus difficile et le fonctionnement du cerveau en pâtit. Différentes parties du cerveau sont particulièrement actives en fonction de l'activité menée. Les activités de type mathématique (et plus largement la résolution de problèmes) sont dans une large mesure réalisées dans le cortex préfrontal. Or, indiquent les auteurs, cette région est particulièrement sensible à des écarts de température.

70. Par exemple, le lieu où réside l'enfant peut être révélateur de caractéristiques familiales associées à l'acquisition de capital humain : des parents dotés d'un plus grand capital humain peuvent avoir plus de moyens financiers pour résider dans un comté plus agréable sur la plan climatique. Or, des études ont établi un lien entre des indicateurs de capital humain des parents et ceux de leurs enfants. Pour limiter ce risque, les auteurs ajoutent à la spécification retenue un ensemble d'informations disponibles sur les parents et les grands-parents des enfants.

prentissage accumulés au fil du temps. Les élèves concernés par ces tests suivent l'enseignement primaire ou le début du secondaire. L'unité d'observation est ici le niveau moyen de résultat par district, par matière et par niveau de scolarité. Au cours de l'année précédant le test, chaque journée scolarisée où la température dépasse 26,7°C (80°F) diminue les scores moyens obtenus de 0,07% d'un écart-type. L'effet est très significatif et nettement plus marqué en mathématiques qu'en Anglais. Aucun effet significatif n'apparaît dans le cas des journées chaudes non scolarisées. Il est à noter que l'effet n'est pas significatif parmi les élèves blancs alors qu'il se marque nettement parmi ceux d'origines hispanique et afro-américaine. Quand l'effet est mesuré séparément au sein des districts plus pauvres et plus riches, un effet négatif significatif ne se marque que parmi les premiers.

Ballatore et al. (2015) s'intéressent aux effets instantanés de la température sur les compétences en langue (italienne) et en mathématiques mesurées via des tests nationaux sans enjeu auprès d'élèves de l'enseignement primaire et secondaire en Italie. Les auteurs concluent : "the impact of temperature on scores starts at a lower temperature threshold (23°C-26°C), reaching a peak reduction of approximately 0.08 s.d. [standard deviation] between 27°C and 30°C (...), and it remains relatively stable afterwards" (p 3).

Considérons à présent des pays du sud de la planète. Garg et al. (2020) exploitent notamment des données en coupe réalisées dans les zones rurales en Inde au cours la période 2006-2014. Les tests sont réalisés au domicile d'élèves des enseignements primaire et secondaire. Ces auteurs se centrent sur l'effet de long terme de la température. Garg et al. (2020) concluent que dix journées supplémentaires à une température moyenne supérieure à 29°C (85°F) durant la saison des cultures précédant les tests en mathématiques et en lecture abaissent les résultats obtenus respectivement de 0,1 et 0,06 écart-type (la référence étant la plage de température 15-17°C). Les températures extrêmes en dehors de cette saison ont en revanche des effets négligeables. En outre, la participation au "National Rural Employment Guarantee Scheme", qui garantit 100 jours de travail rémunéré par an aux ménages ruraux en Inde, atténue fortement l'impact des températures extrêmes sur les résultats des tests. En raison de ce dernier résultat mais aussi de la distinction d'effet selon les saisons, cette étude suggère donc clairement que dans les districts ruraux en Inde, l'effet de long terme des conditions climatiques sur l'acquisition de capital humain dépend de l'accès des populations au revenu (et donc à la nutrition, aux médicaments, etc.)[71].

Akesaka et Shigeoka (2025) exploitent des données individuelles d'un échantillon représentatif au Japon entre 2007 et 2019. Des tests obligatoires y sont administrés à une date fixe en début d'année scolaire pour les élèves en fin d'études primaires et d'études secondaires.

71. Dans leur analyse relative à 58 pays, Park et al. (2021a) s'intéressent aussi à la possibilité que le lien entre la température et les performances aux tests s'explique par une corrélation entre la première variable et les rendements agricoles. Après prise en compte de ces derniers, leur analyse suggère que les effets des températures élevées ne sont pas uniquement dus à des chocs corrélés affectant la nutrition ou les incitations à poursuivre la scolarité. Il est donc plausible que les résultats de Garg et al. (2020) relatifs à l'Inde ne se généralisent pas à d'autres pays.

Ils mesurent les acquis scolaires des années précédentes. L'analyse vise à comparer l'impact de la température passée selon le niveau socio-économique des enfants au sein d'une école donnée. Le message essentiel est que "heat exposure exacerbates pre-existing socioeconomic disparities among children" mais que "air conditioning in schools significantly mitigates these adverse effects across all achievement levels, with particularly pronounced benefits for lower-performing students" (p. 1).

En Chine, Yi et al. (2021) exploitent les données de panel relatives aux personnes de 40 ans au moins, observées à deux reprises (en 2013 et en 2015). Les tests, réalisés au domicile, portent sur la mémoire et sur le calcul (des soustractions). Le score obtenu aux tests est expliqué par des caractéristiques individuelles, temporelles et géographique et par le stress thermique. Ce dernier est défini comme le cumul des dépassements de la température moyenne journalière par rapport au seuil de 25°C au cours d'une période précédant le jour du test (six jours au maximum). Le recul temporel choisi est donc nettement plus court que celui de l'étude de Garg et al. (2020). Une augmentation d'un écart-type de stress thermique (c'est à dire une hausse de 2,4°C) fait baisser les résultats des tests de mathématiques de 0,024 point, soit 2,2% du score moyen en mathématiques (ou encore 0,06 écart-type)[72]. De manière peut-être surprenante, Yi et al. (2021) ajoutent que la présence d'air conditionné n'atténue pas les pertes de capacité cognitive. Zhang et al. (2024) étudient l'effet instantané de la température sur le score obtenu à des tests réalisés par enquête au domicile de la population chinoise entre 2010 et 2018. Les performances en mathématiques chutent lorsque les personnes sont exposées à une température supérieure à 32°C. L'effet se marque plus nettement parmi les individus plus âgés et moins scolarisés. L'effet négatif au-delà de 32°C n'est statistiquement significatif que parmi les individus dont le domicile n'est pas pourvu d'air conditionné. Toutefois, la différence d'impact n'est pas statistiquement significative selon que l'air conditionné est présent ou non. Enfin, l'accroissement de la durée d'une canicule au cours du mois précédant le test nuit également au score en mathématiques.

Du suivi d'individus participant à des tests à faible enjeu se dégagent les conclusions suivantes. L'effet de court terme de températures au-delà d'un seuil est significativement défavorable aux États-Unis et en Chine (le seuil variant selon les études de 25 à 32°C). Les effets de long terme, qui cherchent à capter un impact du changement climatique, sont un peu moins clairs. La chaleur apparait significativement défavorable dans les zones rurales en Inde et, dans une étude mais pas dans l'autre, aux États-Unis. Une étude souligne l'importance du mécanisme qui lie les températures trop élevées (à des moments clés pour l'activité agricole) à l'accès au revenu dans les zones rurales en Inde. Une analyse au Japon conclut à une forte corrélation entre les effets négatifs de la chaleur et la position socio-économique.

72. Les effets sur la mémoire sont aussi négatifs.

4.2 Test à (très) gros enjeu

Considérons à présent les épreuves présentant un réel enjeu pour les participants. Park et al. (2020) exploitent les résultats de tests standardisés "PSAT" passés par environ 10 millions d'élèves de l'enseignement secondaire aux États-Unis[73]. Ces tests, auxquels l'élève doit s'inscrire à l'avance, mesurent une fois par an, à une date donnée, les connaissances acquises. Cette étude couvre la période 2001 - 2014. L'étude porte sur les élèves qui participent plus d'une fois aux tests. Les auteurs disposent de caractéristiques individuelles de l'élève. Sur base de la localisation géographique de l'école, ils mesurent deux indicateurs d'exposition de l'élève à la chaleur : d'une part la moyenne de la température maximale diurne pendant les jours d'école au cours de l'année qui a précédé le test et d'autre part le nombre de jours sur la même période où la température a excédé une série de seuils de température. A propos du premier indicateur, l'étude conclut qu'une hausse de cette moyenne d'un degré Fahrenheit abaisse d'un peu moins d'1% les acquis scolaires moyens d'une année d'étude. Les journées d'école où la température atteint des valeurs très élevées sont plus particulièrement dommageables. Chaque journée de l'année scolaire où la température dépasse environ 32°C (90°F) réduit d'un sixième de pour-cent les acquis scolaires moyens d'une année d'étude. L'effet grandit de 50% à partir de 38°C (100°F). Différentes analyses de sensibilité confirment la robustesse de ces résultats. L'étude montre aussi que ces effets sont persistants en ce sens que des journées d'école chaudes survenues deux, trois ou même quatre années avant le moment du test abaissent aussi le résultat du test. Ceci suggère que les actions mises en place après des pics de chaleur n'en compensent pas pleinement les effets. Pour l'élève moyen, une hausse *persistante* de 2°C réduit d'approximativement 7% les acquis scolaires moyens d'une année scolaire. Ce dernier résultat est sans doute le plus informatif dans le contexte d'un réchauffement durable de la planète. L'étude de Park et al. (2020) montre en outre que les écoles qui ont investi dans des équipements, comme l'air conditionné, parviennent à contenir les effets négatifs des fortes chaleurs sur les apprentissages. A côté de cette source d'hétérogénéité il y en a bien entendu d'autres. Au total, l'étude de Park et al. (2020) estime que les apprentissages des élèves d'origines afro-américaine et hispanique sont pénalisés trois fois plus par la hausse des températures que ceux des élèves blancs.

Jusqu'ici les tests considérés mesuraient les connaissances acquises par les élèves, mais ils ne déterminaient pas l'accès à un niveau d'étude supérieur. Passons à présent à des tests à gros enjeu, comme des examens d'entrée à l'université, des examens de fin de cycle

73. Ce test est par exemple décrit à l'adresse `https://satsuite.collegeboard.org/`. Contrairement à l'objet d'études évoquées plus loin (Park, 2022, Graff Zivin et al., 2022), le test PSAT n'est pas utilisé par le processus d'admission aux études supérieures. Cependant, moyennant certaines conditions complémentaires, s'inscrire au test PSAT conduit à participer à un concours académique de reconnaissance et de bourses organisé par la National Merit Scholarship Corporation.

scolaire ou encore des tests à l'embauche. Le succès ou l'échec à de telles épreuves a des conséquences marquées sur la suite de leur existence. L'accent est donc à présent mis sur l'impact éventuel des conditions climatiques *lors* d'un test à gros enjeu sur la trajectoire étudiante et professionnelle.

Park (2022) exploite le score obtenu à une succession de tests standardisés par un million d'élèves en fin d'études secondaires à New-York. Le calendrier de ces épreuves successives est très rigide. Les résultats obtenus à ces tests déterminent l'obtention du diplôme d'études secondaires. Ils influencent également le processus de sélection des étudiants par les établissements locaux d'enseignement supérieur. L'unité d'observation est une épreuve d'un individu réalisé dans une école à un moment du temps. Rejoignant l'étude de Park et al. (2020), Park (2022) conclut qu'une température plus élevée nuit au score obtenu. Cet effet, en soi transitoire ou de court terme, peut avoir des implications durables si repasser les tests échoués est compliqué, voire stigmatisant, ou si le score obtenu est utilisé comme un *signal* lors d'étapes ultérieures du cursus de l'étudiant. En l'occurrence, l'auteur met en évidence un lien causal défavorable à l'obtention du diplôme de fin d'études secondaires. Cet effet persistant s'observe malgré que les enseignants manipulent sélectivement les notes à la hausse pour les élèves ayant passé des examens pendant des périodes de forte chaleur[74].

Graff Zivin et al. (2020) étudient le rôle des conditions climatiques du moment sur l'examen annuel d'entrée dans l'enseignement supérieur en Chine (le 'National College Entrance Examination' ou NCEE). Cet examen, qui concerne annuellement environ 9 millions d'étudiants, se déroule uniquement sur deux journées consécutives, fixées à l'avance, au cours du mois de juin. Sur la période étudiée (2005 - 2011), les candidats n'avaient pas le choix du lieu de l'examen. Les locaux d'examen n'avaient pas de climatisation. La cote obtenue détermine le type d'établissement d'enseignement accessible (les établissements étant classés officiellement par niveau de qualité ou de prestige). Le NCEE est donc un examen à gros enjeu[75]. Les auteurs disposent des données exhaustives relatives aux étudiants admis aux études supérieures[76] dans plus de deux mille entités géographiques différentes. A ce niveau de désagrégation, les auteurs disposent aussi d'un éventail d'indicateurs climatiques. Ils mettent en évidence un effet défavorable de la température lors de l'examen. Cet effet est robuste à la prise en compte d'autres facteurs explicatifs potentiels.

74. Ballatore et al. (2015) mettent ce même phénomène en évidence dans une étude relative à l'Italie incluant le phénomène de tricherie par les élèves.

75. L'article cite une étude selon laquelle, toutes choses étant égales par ailleurs, le travailleur chinois diplômé d'une université du plus haut niveau peut espérer des rémunérations 40% plus élevées que quelqu'un diplômé d'une université moins bien classée.

76. Ceux-ci ne sont donc pas un échantillon représentatif de la population qui s'est présentée aux tests. Par ailleurs, les données n'informent hélas pas des caractéristiques démographiques, ni du curriculum des étudiants durant leurs études secondaires. Un même individu n'est en outre pas suivi au cours du temps. On dispose donc bien ici de données en coupe instantanée répétées annuellement entre 2005 et 2011. Le risque de biais de la variable omise est bien présent.

Une hausse de température de 2°C lors de l'examen (ce qui équivaut à un écart-type de la température mesurée à l'échelle géographique utilisée par cette étude), abaisse le score obtenu de 0,7% (ce qui équivaut à 6% d'un écart-type de ce score).

4.3 Résumé

En conclusion, qu'il s'agisse de tests à enjeu limité ou à gros enjeu, les températures élevées apparaissent nuire à des indicateurs d'acquis d'apprentissage parmi les enfants et les jeunes. Un effet négatif instantané de la température le jour du test émerge à chaque fois conditionnellement à d'autres facteurs climatiques (humidité de l'air etc.). Le conditionnement d'air atténue les effets de la chaleur dans la plupart des études. Un effet de la température mesurée sur une période longue n'émerge pas systématiquement mais est mis en évidence par plusieurs auteurs. Extrapoler ces conclusions au réchauffement en cours de la planète n'est pas immédiat dans la mesure où des mécanismes d'adaptation ont davantage de temps pour se mettre en place. Néanmoins, si le changement climatique nuit à l'acquisition des compétences, la productivité du travail, objet de la section suivante, s'en ressentira.

Un autre acquis, non surprenant, est l'hétérogénéité de l'effet de la température. Dans un premier sens du terme, il apparaît que l'impact de la température est non linéaire et se marque plus nettement au-delà de seuils entre 25 et 30°C (77-86°F). Dans un autre sens du terme, toutes les personnes ne sont pas affectées de la même manière par des températures élevées. La capacité financière différente des pays, des écoles et des familles à investir dans des dispositifs d'atténuation de l'effet de la chaleur sont ici notamment en jeu.

Le canal par lequel l'effet de la température se manifeste n'est pas encore totalement clair. A côté d'explications relatives au lien physiologique entre la température et le fonctionnement des diverses zones du cerveau des apprenants, il se peut aussi que la chaleur influence leur patience ou leur motivation, le coût d'opportunité de se rendre à l'école, leur faculté à coopérer lors des apprentissages ou plus généralement les relations sociales dans les lieux d'apprentissage. Ce qui vient d'être dit se généralise aux enseignants.

Chapitre 5

Réchauffement climatique et productivité du travail

Le chapitre 3 a indiqué qu'au-delà d'un seuil, la température affecte négativement la durée de travail des travailleurs exposés. On peut donc s'attendre à ce que leur productivité moyenne du travail soit aussi influencée. Sous l'hypothèse d'un processus de production à un seul input (le travail) et sous l'hypothèse standard de concavité de la fonction de production, la diminution du volume de travail devrait entraîner une *augmentation* de la productivité moyenne du travail. La panel A de la figure 5.1 illustre cela. Si L désigne le volume de travail d'une entreprise et $F(L)$, la quantité de biens ou de services qu'elle produit, le passage d'un volume L_0 à un volume plus petit, L_1, réduit certes la production mais la productivité moyenne du travail augmente : $F(L_1)/L_1 > F(L_0)/L_0$ [77]. Si les études empiriques montrent qu'au contraire la productivité moyenne du travail diminue, il faut nécessairement que d'autres mécanismes soient à l'oeuvre. Du fait de températures trop élevées, un absentéisme accru peut désorganiser le processus de production, le nombre de tâches exécutées au cours de chaque unité de temps de travail peut baisser, etc. Ces aspects échappent à la simple relation concave du panel A de la figure 5.1. Une prise en compte élémentaire de tels facteurs consiste à indiquer que la fonction de production peut se déplacer en fonction d'un paramètre climatique (disons, T), qui s'impose à l'entreprise. La fonction de production s'écrit alors non plus $F(L)$ mais bien $F(L, T)$. Par conséquent, toute la relation entre le volume de travail L et l'output peut se déplacer avec T. Supposons qu'une augmentation de T engendre une contraction de la production pour tout niveau de L. La panel B de la figure 5.1 illustre cela. Si le paramètre climatique se dégrade ($T_1 > T_0$), la contraction de la production a chaque niveau possible de L peut engendrer une chute de la productivité moyenne du travail. C'est le cas au panel B de cette figure où on constate

77. L'angle α_1 est en effet supérieur à l'angle α_0. Dans chaque cas, l'angle α est tel que sa tangente mesure $F(L)/L$.

que $F(L_1, T_1)/L_1 < F(L_0, T_0)/L_0$. Cela dit, les employeurs peuvent mettre en place des dispositifs permettant d'atténuer, voire d'éliminer, l'effet de températures élevées sur leurs travailleurs (songeons au conditionnement d'air). Néanmoins, elles ne peuvent empêcher que ceux-ci souffrent de la chaleur ou d'un autre phénomène climatique en dehors de l'enceinte de l'entreprise, ce qui entraînerait notamment davantage d'absentéisme au travail. De plus, les conditions climatiques peuvent aussi affecter la contribution des autres inputs à la production : le fonctionnement des machines peut par exemple dépendre des conditions climatiques et dès lors modifier la relation entre le travail et le niveau de production. Lai et al. (2023) développent notamment une analyse théorique de ces formes d'ajustement. Le changement climatique est aussi à l'origine d'un accroissement des incertitudes qui est susceptible d'affecter les choix de facteurs de production et le processus d'innovation (voir par exemple le rapport édité par Bijnens, 2024).

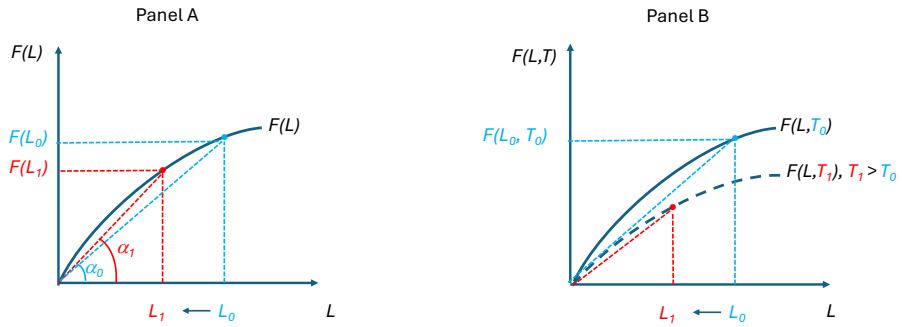


FIGURE 5.1 – Impact d'une baisse du volume de travail sur la production et sur la productivité moyenne du travail. Panel A : technologie à un seul facteur de production, L. Panel B : cette même technologie affectée par un paramètre climatique T.

Les études empiriques portant sur la relation entre les conditions climatiques et le volume de production ou la productivité du travail sont assez nombreuses. On se limitera ici au lien entre la température et la productivité du travail. Heal et Park (2016), Deschenes (2023) et Lai et al. (2023) proposent une synthèse de la littérature[78]. Le rapport coordonné par Bijnens (2024) contient aussi des éléments de synthèse de la littérature internationale. Comme il y a des liens entre le changement climatique et la pollution de l'air, signalons que Neidell et Pestel (2023) résument la littérature portant sur les liens entre cette pollution et la productivité du travail.

78. Ces articles couvrent également la littérature exploitant des données macroéconomiques, qui s'intéresse principalement aux effets sur la production et la croissance économique.

Les études évoquées ci-dessous exploitent le plus souvent des données individuelles d'entreprises (parfois, d'établissements, ce qui est préférable). Elles ont en commun de mettre en relation une mesure de la productivité moyenne du travail et des indicateurs de température en tenant compte d'autres conditions météorologiques et des caractéristiques observables de l'entreprise (son secteur d'appartenance par exemple). Les questions méthodologiques soulevées au chapitre 2 se posent bien entendu ici aussi. A celles-ci s'ajoute le fait que la productivité du travail ne dépend pas que de l'impact physiologique de l'environnement dans lequel le travailleur exécute ses tâches. Cet environnement peut aussi influencer la productivité des équipements de production et les chaînes d'approvisionnement en énergie et en inputs intermédiaires. Si la hausse des températures entraîne une baisse plus prononcée de la productivité du travail que de celle des autres facteurs de production, on s'attend en outre, tôt ou tard, à des substitutions entre ces divers facteurs. Lorsqu'un réchauffement climatique est perceptible, les innovations technologiques (Acemoglu et al., 2012) et les politiques publiques environnementales (régulation, taxation du carbone[79], etc.) modifient les conditions de fonctionnement des entreprises. Leurs décisions (d'investissement, de recrutement, etc.) se modifient alors aussi. Tous ces ajustements influencent en retour la productivité du travail. Par conséquent, les analyses évoquées ci-dessous captent potentiellement de nombreux mécanismes reliant la température à la productivité du travail. Lorsque l'analyse économétrique inclut des déterminants de la productivité autres que la température, l'interprétation des effets estimés devient plus claire.

5.1 Résultats relatifs aux pays du sud de la planète

Cai et al. (2018) disposent de données quotidiennes relatives à une entreprise chinoise productrice de gobelets en carton au cours de la période 2012–2014. Elle ne dispose pas de la climatisation. L'intérêt de l'étude n'est évidemment pas sa validité externe mais le degré de finesse des informations disponibles. Le travail, essentiellement individuel, consiste à manipuler des machines de moulage qui scellent le corps du gobelet à son fond, puis des machines d'emballage. La rémunération est étroitement liée à l'output individuel du travailleur (exprimé en nombre de gobelets). Pour des raisons d'équité, chaque travailleur change aléatoirement et quotidiennement d'équipe et de machine. Ceci a l'avantage d'éliminer le rôle de bien des facteurs pouvant être corrélés avec la température et la productivité du travail (par exemple, travailler avec une machine aux performances plus sensibles à la température qu'une autre). En résumé, les auteurs concluent à une relation en U inversé entre la température maximum du jour et la productivité du travailleur mesurée le même jour[80] : comparé à l'intervalle de température 24–26,5°C (75–80°F), la productivité diminue

79. Thème abordé au chapitre 10.
80. Les auteurs ne mettent pas en évidence un effet propre de la température des jours passés.

de 8,5% au-delà de 35°C (95°F). Cette baisse de productivité n'est pas due à l'absentéisme accru ni à une baisse de la durée du travail parmi les personnes au travail. L'effet biologique de la chaleur apparaît donc déterminant. Constat inattendu mais intéressant, il n'y a pas de différence significative entre hommes et femmes, jeunes et vieux, travailleurs locaux et migrants.

Les articles de Zhang et al. (2018) et de Chen et Yang (2019) exploitent le même panel de firmes de l'industrie manufacturière chinoise au cours des années 1998 à 2007. Dans la mesure où seuls les seconds s'intéressent à la productivité annuelle moyenne des travailleurs (la valeur ajoutée par travailleur), la suite se limitera à cette étude [81]. Les résultats où l'effet de la température peut varier par intervalle apparaissent les plus intéressants. L'indicateur de température est alors le nombre annuel de jours (ou de jours ouvrables) où la température moyenne journalière est observée dans l'intervalle considéré. La productivité annuelle moyenne du travail augmente avec la température jusqu'à l'intervalle 21–24°C (70–75°F), puis elle décroit rapidement. Un jour supplémentaire à plus de 30°C (86°F) fait baisser la productivité annuelle moyenne d'environ 0,2% et cet effet est statistiquement significatif au seuil de 5%. De plus, les effets négatifs des températures élevées des deux années précédentes peuvent se reporter sur les années suivantes. Les effets varient beaucoup d'un secteur à l'autre de l'industrie manufacturière chinoise [82]. Enfin, ces effets négatifs se marquent beaucoup plus dans le nord de la Chine (où les températures moyennes sont plus basses) que dans le sud.

L'impact de la température sur la productivité du travail a aussi été étudié dans d'autres pays. Dans le secteur indien de l'habillement au cours de la période 2014–2015, Adhvaryu et al. (2020) ont identifié une relation négative et non linéaire entre la température et la productivité. Ils ont au passage aussi mis en évidence que les entreprises qui ont remplacé leur éclairage traditionnel par des LEDs ont un gain relatif de productivité les jours où les températures sont élevées. S'intéressant à l'industrie manufacturière en Inde, Somanathan et al. (2021) exploitent des données de travailleurs et d'établissements ainsi que d'autres données mesurées au niveau des districts [83] pour établir un ensemble de résultats (sur des périodes variées selon les sources). Si l'effet de la température passe par un stress biologique, l'effet doit émerger rapidement. Ils confirment cette propriété : l'output par travailleur diminue et l'absentéisme augmente les jours de chaleur et durant les semaines où il y a davantage de journées chaudes. Le conditionnement d'air sur le lieu de travail élimine la baisse de productivité mais pas l'absentéisme (les travailleurs demeurant probablement soumis aux températures élevées hors de l'entreprise) [84]. Les auteurs montrent que l'effet détecté de

81. Zhang et al. (2018) montrent notamment que la relation entre la température et la productivité totale des facteurs a la forme d'un U inversé.

82. L'extraction de métaux ferreux, le bois et le caoutchouc sont les trois industries les plus touchées par la hausse des températures.

83. Voir la note de bas de page numéro 52.

84. Voir Lai et al. (2023) pour une discussion plus approfondie des mécanismes d'adaptation au réchauf-

la température n'est pas dû à d'autres phénomènes comme les inondations, les coupures de courant électrique, les conflits sociaux ou une hausse des prix des biens agricoles. Ils soulignent aussi que les effets micro-économiques de la température sur la productivité du travail et l'output des entreprises sont voisins de ceux obtenus à des niveaux plus agrégés.

LoPalo (2023) étudie l'effet de la température sur la productivité du métier d'enquêteur dans 46 pays dits en développement. Elle conclut que le nombre d'interviews complétés par heure baisse de de 13,6% les jours les plus chauds et les plus humides. Leur niveau d'output (à savoir le nombre d'enquêtes réalisées sur le terrain) est cependant inchangé car, les jours de chaleur, ces enquêteurs commencent leur journée de travail plus tôt et passent plus de temps à réaliser chaque enquête.

5.2 Résultats relatifs aux États-Unis et à l'Europe

Addoum et al. (2020) s'intéressent aux effets de la température sur le chiffre des ventes et la productivité moyenne du travail [85] des entreprises américaines cotées en bourse sur la période 1990–2015. Ils disposent de données d'établissement ce qui est essentiel pour détecter un effet de la température locale. La plupart des autres études exploitent des données d'entreprises. Lorsque celles-ci ont plusieurs établissements dispersés géographiquement, des erreurs de mesure apparaissent inévitables. Les indicateurs d'activité économique de Addoum et al. (2020) sont mesurés sur une année fiscale. Les indicateurs de températures (mesurés à un niveau géographique très fin) sont la température moyenne, le nombre de jours où la température dépasse 30°C ou encore 86°F (respectivement, est négative) [86]. Leurs spécifications contiennent des effets fixes d'établissement et des effets temporels propres à chaque secteur. Ils concluent que l'effet de la température sur la productivité n'est pas statistiquement significatif. Ils soulignent que ceci n'est pas dû à de grands écarts-types : l'effet est petit et mesuré précisément. Ces résultats se maintiennent lorsque l'on distingue les secteurs jugés sensibles et non-sensibles à la température. Addoum et al. (2020) notent toutefois que la population des entreprises cotées est spécifique. Ils avancent que celles-ci disposent de moyens financiers leur permettant de prémunir leurs entreprises des effets de la chaleur. Leurs conclusions ne se généralisent donc pas nécessairement à l'ensemble des États-Unis [87].

fement. Outre le recours à des équipements, ces auteurs considèrent aussi l'adaptation physiologique des travailleurs à des températures accrues.

85. Obtenue en divisant le chiffre des ventes par le nombre d'employés.

86. Comme la notion pertinente de température élevée (respectivement, basse) peut varier d'un lieu à l'autre, ils utilisent aussi le nombre de jours où la température est au-dessus du 90$^{\text{ème}}$, puis du 95$^{\text{ème}}$ percentile (sous le 10$^{\text{ème}}$, puis le 5$^{\text{ème}}$, percentile) de la distribution des températures mesurée au niveau local.

87. Deryugina et Hsiang (2014) mettent en évidence un effet négatif de la température sur le revenu moyen par tête dans les comtés de ce pays : un jour de semaine à plus de 30°C (86°F) coûte en moyenne 20 dollars par personne sur la période 1969–2011. Concernant l'agriculture aux États-Unis, Schlenker et Roberts (2009) concluent que les rendements augmentent avec la température jusqu'à 29°C pour le maïs, 30°C pour le soja

Gagliardi et al. (2024) exploitent des données annuelles issues des bilans d'un échantillon d'entreprises européennes n'ayant qu'un seul établissement [88]. L'étude couvre la période allant de 2013 à 2020. L'indicateur de température et les autres facteurs météorologiques pris en compte proviennent notamment de données satellitaires [89]. L'indicateur de réchauffement local retenu est l'écart entre la moyenne annuelle des températures maximales journalières et la tendance historique de cette même grandeur (à savoir, sa moyenne observée entre 1980 et 2010), chacune des grandeurs étant mesurée en °C au niveau de la région au sens de la nomenclature NUTS-3 [90]. Ce choix d'indicateur se distingue assez nettement de ceux retenus par les études menées à l'étranger, dont il a été question ci-dessus [91]. Les auteurs postulent une relation linéaire entre le logarithme de la productivité du travail [92] d'une part et cet indicateur de réchauffement local, les autres facteurs météorologiques et une série de variables binaires de contrôle d'autre part [93]. La productivité moyenne du travail baisse d'1,2% par degré de l'indicateur de réchauffement. L'effet est significatif au seuil de 5%. La même analyse menée pour la productivité du capital montre que celle-ci n'est pas affectée par le réchauffement. L'impact sur la productivité du travail est hétérogène. Parmi les pays au climat tempéré (voir la note de bas de page 88), la baisse s'élève à 2,4% et parmi les pays méditerranéens à 1,2%. Ailleurs, les effets ne sont pas significatifs ou ils le sont faiblement. Comme le suggère l'intuition, l'impact se manifeste plus fortement dans les secteurs d'activités les plus exposés aux variations météorologiques (-3,5% par degré dans l'agriculture, -2,1% pour le secteur de la construction).

Au niveau macro-économique, le rapport édité par Bijnens (2024) relie la variation annuelle de la productivité moyenne horaire d'un pays européen [94] à la température annuelle

et 32°C pour le coton mais que les températures supérieures à ces seuils sont très nocives. D'un effet sur le rendement agricole on ne déduit cependant pas automatiquement celui sur la productivité du travail agricole mais cette étude est indicative d'une non linéarité qui rappelle celles évoquées ci-dessus. Considérant le secteur non agricole, on peut aussi consulter Behrer et Park (2017).

88. Les pays couverts sont de cinq types sur le plan climatique : tempéré (la Belgique, la Tchéquie, l'Estonie, la Hongrie, la Roumanie et la Slovaquie), froid (la Finlande), méditerranéen (l'Espagne, l'Italie et le Portugal), intermédiaire entre tempéré et froid (la Suède), intermédiaire entre tempéré et méditerranéen (la Bulgarie, la Croatie et la Slovénie).

89. E-Obs. Voir la page `https://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php`. Les autres facteurs météorologiques exploités par Gagliardi et al. (2024) sont les précipitation, l'humidité relative et, provenant de l'Agence Européenne de l'Environnement, un indicateur de qualité de l'air.

90. A propos de cette nomenclature, on peut consulter la page `https://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts`.

91. Les auteurs argumentent que mesurer un écart par rapport à une tendance historique perçoit mieux les anomalies de température que le niveau des températures observées.

92. Mesurée comme la valeur ajoutée annuelle de l'entreprise divisée par une mesure du nombre de ses travailleurs occupés durant l'année.

93. Un effet fixe d'entreprise, quatre classes de tailles, un effet fixe de région, un effet fixe de secteur et des variables d'interaction entre l'année et la taille, l'année et la région et l'année et le secteur afin de prendre en compte des tendances différentes selon ces dimensions.

94. L'étude couvre l'Union européenne des 27, l'Islande, la Norvège, le Royaume-Uni et la Suisse sur la période allant de 1963 à 2019.

moyenne de ce pays, à cette même grandeur au carré, au niveau annuel moyen des précipitations, à un effet fixe de pays et à un effet temporel commun à tous les pays. La température annuelle moyenne véhicule une information bien différente de celle exploitée dans les études micro-économiques évoquées précédemment. Les paramètres estimés de la température et de son carré sont tous deux significatifs au seuil de 5%. La relation par rapport à la température présente ici aussi la forme d'un U inversé. Au-delà d'une température annuelle moyenne de 14°C (57°F), soit celle de l'Italie, l'effet de cette température sur la croissance de la productivité est négatif.

5.3 Résumé

En résumé, la relation entre la température et la productivité du travail est non linéaire (elle a la forme d'un U inversé) et elle devient négative au-delà d'un seuil qui se situe au voisinage de 30°C (86 °F). Il apparaît parfois possible de neutraliser l'impact négatif des températures élevées sur la productivité du travail en déplaçant ou en allongeant le temps de travail (LoPalo, 2023), en recourant à des procédés de production qui dégagent moins de chaleur (Adhvaryu et al., 2020), ou en recourant au conditionnement d'air (Somanathan et al., 2021). Un lien entre chaleur et absentéisme des travailleurs demeure cependant dans l'étude de Somanathan et al. (2021) relative à l'Inde. Enfin, les études couvrant une diversité de secteurs mettent en évidence une hétérogénéité de l'impact : sans surprise, les secteurs les plus exposés aux conditions climatiques connaissent des baisses de productivité plus marquées suite au réchauffement ou aux vagues de chaleur. Qu'elle exploite des données mesurées à une fréquence annuelle ou infra-annuelle, la littérature passée ici en revue nous renseigne toutefois davantage sur les effets de court terme de la température que sur les effets du changement climatique.

Chapitre 6

Réchauffement climatique, sécurité et santé au travail

La littérature scientifique nous a appris que les températures extrêmes affectent la longévité humaine[95], la santé mentale et le taux de suicide[96]. Deschenes (2014) résume la littérature de l'époque sur les effets de températures extrêmes sur la santé et les comportements d'adaptation en ces termes :

> "The main conclusion that emerges from the literature is that despite the wide variety of data sets and settings most studies find that temperature extremes lead to significant reductions in health, generally measured with excess mortality. Regarding the role of adaptation in mitigating the effects of extreme temperature on health, the available knowledge is limited, in part due to the few real-world data sets on adaptation behaviors" (Deschenes, 2014, p. 606).

Ici, on se centrera sur l'état de santé des travailleurs. En raison du changement climatique, cet état de santé préoccupe différentes instances internationales (voir par exemple le rapport de l'International Labour Office, 2019). En effet, à mesure que la température atmosphérique augmente, le corps humain a de plus en plus de peine à maintenir sa propre température à un niveau tolérable. Il s'en suit divers effets délétères.

En outre, la sécurité et la santé au travail sont des facteurs non-monétaires influençant la valeur qu'un travailleur accorde à un emploi. Par conséquent, s'ils sont observables, les niveaux de sécurité et de santé associés à un emploi (ou à une offre d'emploi) jouent un rôle dans les choix d'offre de travail (ou dans les décisions de recherche d'emploi). Un effet induit sur les rémunérations en est attendu si les mécanismes de formation des salaires permettent l'apparition de différences compensatrices[97]. Par le mécanisme de différences

95. Voir par exemple Deschenes et Greenstone (2011) et Lee et Li (2021).
96. Voir par exemple Mullins et White (2019) et Burke et al. (2018).
97. En présence de telles différences, si le marché du travail fonctionne en concurrence parfaite, les emplois

compensatrices et en raison des effets de températures élevées sur la productivité du travailleur, les employeurs ont un certain intérêt à investir dans des dispositifs d'atténuation des effets de la température sur leurs travailleurs et ce, même lorsque le sort de ceux-ci n'entre pas directement en ligne de compte dans leurs décisions.

La littérature couverte ci-dessous vérifie l'existence d'un lien de causalité entre la température et les accidents du travail. Elle essaie aussi de préciser les mécanismes à l'oeuvre. Elle ne traite cependant pas des effets induits sur les rémunérations.

6.1 Les températures extrêmes causent un surcroît d'accidents du travail

Quelques recherches scientifiques récentes ont cherché à établir s'il y a un lien de causalité entre la température et les accidents du travail ou sur le chemin du travail [98]. Elles exploitent des fluctuations exogènes de température à court terme [99] au sein d'unités spatiales fines contenant le lieu d'occupation du travailleur. La qualité de la mesure des incidents de santé liés à l'exercice de la profession est naturellement déterminante. Il s'agit d'avoir un enregistrement (quasi) exhaustif de ces incidents de santé. Le caractère obligatoire de cet enregistrement et son contrôle aident à respecter cette exigence (tout au moins, dans l'économie formelle). Lee et al. (2022) et Dasgupta et al. (2024) présentent une synthèse de la littérature récente.

La relation entre la fréquence des accidents du travail et la température est a priori non linéaire. La notion même de température élevée varie aussi d'un lieu à l'autre. La fréquence des accidents du travail peut également dépendre du cycle économique et varier systématiquement d'une saison à l'autre et d'un jour de la semaine à l'autre. Tous ces facteurs et le rôle d'autres déterminants météorologiques (songeons aux précipitations) doivent être soigneusement pris en compte. Par ailleurs, lorsque les découpes temporelle et géographique sont fines, l'observation fréquente de valeurs nulles (du nombre d'accidents du travail) et les corrélations temporelles et spatiales (des facteurs explicatifs inobservés) requièrent une attention particulière sur le plan statistique.

En Californie, selon Park et al. (2021b), au cours d'une journée où les températures

de moindre qualité sur le plan de la sécurité et de la santé offriraient, toutes choses étant égales par ailleurs, des rémunérations supérieures pour attirer les travailleurs et inversement dans le cas des emplois de haute qualité. Les études empiriques valident partiellement les prédictions de l'approche des différences compensatrices (Lavetti, 2023, et Maestas et al., 2023). Nekoei (2023) étend cette littérature à la présence d'asymétrie d'information.

98. Voir Dillender (2021) au Texas et dans le cas du secteur minier aux États-Unis ; Park et al. (2021b), en Californie ; Ireland et al. (2023) dans l'État de Victoria en Australie ; Filomena et Picchio (2024) en Italie ; Bellés-Obrero et al. (2025) en Espagne ; Drescher et Janzen (2025) en Suisse.

99. La température du jour où les accidents du travail sont mesurés et parfois également la température des quelques jours précédents.

maximales se situent dans la fourchette allant de 85 à 90°F (29–32°C), le taux d'accidents du travail s'accroît de 5 à 6% en comparaison avec une journée où ces mêmes températures se situent entre 60 et 65 °F (15,5 et 18°C). Entre 100 et 105 °F (38–50,5°C), l'accroissement atteint une fourchette de valeurs entre 7 et 9%. Ces effets sont significatifs au seuil de 4%. Ils sont plus marqués dans les secteurs où le travail est typiquement exécuté à l'extérieur mais ils s'observent aussi lorsque le travail se fait majoritairement dans un bâtiment (industrie manufacturière, commerce de gros,...). Park et al. (2021b) ajoutent

> "Due to the fact that lower wage workers are more likely to work in dangerous occupations, more likely to live and work in places with greater heat exposure, and experience larger marginal increases in risk on hotter days, the net effect on injuries is far greater for low income groups." (p. 4) [100]

Enfin, au cours de la période 2001–2018, Park et al. (2021b) notent un affaiblissement des effets de températures élevées. Ceci suggère une capacité d'adaptation non négligeable. Sans pouvoir identifier un lien causal, les auteurs notent que cette atténuation pourrait être induite par une norme obligatoire de prévention des maladies liées à la chaleur introduite en Californie en 2005 lorsque le lieu de travail est à l'extérieur et les températures dépassent 35°C.

En Italie, sur la période 2008–2021, Filomena et Picchio (2024) adoptent une méthodologie analogue à celle de Dillender (2021) et de Park et al. (2021b). Filomena et Picchio (2024) concluent notamment que les températures élevées accroissent la fréquence d'accidents du travail, en particulier parmi les hommes et parmi les travailleurs de l'industrie manufacturière et des services. Par exemple, lorsque les températures moyennes journalières sont supérieures à 28°C, ce qui caractérise 1% des jours de l'année en Italie sur la période, le taux quotidien d'accidents (respectivement, d'accidents mortels) pour 100000 travailleurs est supérieur de 0,43 point (respectivement, de 0,004 point) par rapport au niveau de référence (correspondant à la plage de températures allant de 10 à 12°C). Rapporté au taux moyen d'accidents (respectivement, mortels) mesuré à ce niveau de référence, l'effet représente un impact à la hausse de 7,8% [101] (respectivement, de 40%). Tous les secteurs connaissent une hausse du taux d'accidents sur le lieu du travail mais l'effet est le plus marqué dans l'agriculture, puis dans l'industrie. L'effet se marque aussi davantage chez les hommes. L'explication la plus plausible est la plus grande présence masculine dans les professions accomplies à l'extérieur (comme l'agriculture ou la construction par exemple). Enfin, l'effet de la température sur le taux d'accidents du travail est moins marqué au-delà de 55 ans. Contrairement à Park et al. (2021b), Filomena et Picchio (2024) ne détectent pas

100. Notons que les résultats de Ireland et al. (2023) pour l'Australie ne sont pas en accord avec cette dernière conclusion.

101. Lorsque les auteurs considèrent les accidents sur le lieu de travail (faisant donc abstraction de ceux lors de déplacements entre le domicile et le lieu de travail), l'effet relatif atteint 10%. Les auteurs notent que l'ordre de grandeur de cet effet est voisin ou supérieur à celui trouvé par Dillender (2021), Park et al. (2021b) et Ireland et al. (2023).

d'affaiblissement des effets de températures élevées sur la fréquence d'accidents du travail au cours de la période 2008–2021. Couvrant la période 1985–2020, Ireland et al. (2023) concluent quant à eux que les effets les plus forts de la température sur les accidents du travail s'observent durant les années 2015–2020. Le faculté d'adaptation demeure donc un sujet controversé.

Au cours de la période 1996–2019, Drescher et Janzen (2025) comparent les déclarations d'accidents du travail et des informations quotidiennes sur la température, les précipitations, le rayonnement solaire et la vitesse du vent à partir des relevés des stations météorologiques suisses réparties dans tout le pays. Le nombre de sinistres rapportés augmente de 7.4% par journée où la température s'élève à au moins 30°C. Ces auteurs ne trouvent pas de différences selon le genre, l'âge, les revenus, la nationalité ou le secteur d'activité.

6.2 Les mécanismes à l'oeuvre

Les mécanismes sous-jacents au lien entre la température et les accidents du travail sont potentiellement nombreux. Certaines études disposent d'informations permettant jusqu'à un certain point de vérifier que de fortes chaleurs n'engendrent pas que des coups de chaleur ou des insolations. Aux États-Unis, les données dont disposent Park et al. (2021b) renseignent la cause du préjudice corporel subi par le travailleur et les parties du corps blessées. Les auteurs regroupent ces informations en deux sous-ensembles mutuellement exclusifs : les blessures classées comme étant causées par des températures extrêmes et toutes les autres. Sur la période 2001–2018, on recense 850 accidents par an du premier type en Californie et 618000 du second. Concernant les premières, une journée où la température maximale se situe entre 90 et 95°F (32 et 35°C) augmente la fréquence des demandes d'indemnisation d'environ 276% par rapport à la moyenne et une journée où la température est supérieure à 105°F (40,5°C), d'environ 760%. Lorsqu'on considère toutes les autres demandes d'indemnisation, l'effet est moindre mais il demeure statistiquement significatif (en l'occurence, au seuil de 5%) : une journée où la température maximale se situe entre 90 et 95°F (32 et 35°C) augmente la fréquence de ces demandes d'indemnisation d'environ 4,5%. Cette augmentation est une première indication que les hautes températures affectent d'autres accidents professionnels que ceux où ces températures sont une cause évidente. Lorsque Park et al. (2021b) distinguent les blessures et les maladies qui touchent les organes principaux du corps et celles qui touchent ses extrémités, les effets positifs de températures élevées sur le nombre d'accidents du travail sont analogues dans les deux cas. Les auteurs y voient une autre indication que les fortes chaleurs affectent l'attention et les capacités mentales. La citation suivante, relative à l'Australie, va dans le même sens :

> "Subsequent analyses reveal that the impact of high temperature is not limited to heat stress and sunburn, with various health events, such as lacerations and other injuries, occurring more frequently on hot days. This suggests that re-

> duced concentration and psychomotor performance are drivers of the reported effects. In addition, we find that the risk of accidents caused by environmental agents, such as hazardous chemicals and substances, is also heightened on hot days." (Ireland et al., 2023, p. 2)

Une enquête suisse, exploitée par Drescher et Janzen (2025), suggère que l'insomnie en raison de la chaleur est un mécanisme explicatif de l'accroissement du nombre d'accidents du travail.

6.3 Résumé et élargissement

En résumé, dans les quelques pays occidentaux considérés ci-dessus, des températures élevées ont instantanément des effets délétères sur la santé des travailleurs. La conclusion se généralise à d'autres pays (voir par exemple les synthèses de Lee et al., 2022, et de Dasgupta et al., 2024). Ces effets sont non linéaires, se marquant nettement au-delà de certains seuils de températures. Le lien entre la température et les accidents du travail met aussi en évidence que l'effet se marque plus parmi des travailleurs à bas salaires, sans doute en raison de la nature de leur profession. Les mécanismes à l'oeuvre sont potentiellement multiples. Ils ne se limitent en tout cas pas à des coups de chaleur ou des insolations. Puisque ces études exploitent des variations de court terme, leurs conclusions ne nous informent pas nécessairement de l'impact du changement climatique qui est graduel et anticipé. Cette affirmation, qu'on a déjà pu lire dans les chapitres précédents, s'explique par une capacité d'adaptation sans doute différente selon qu'il s'agisse d'une variation météorologique à court terme ou d'un changement graduel et anticipé. A ce propos, on a vu ci-dessus qu'il n'y a pas de consensus sur l'atténuation éventuelle des effets de températures élevées au fil des années. En outre, quand ils distinguent trois zones climatiques différentes en Italie, Filomena et Picchio (2024) concluent que les températures extrêmement élevées ne jouent un rôle que là où les climats sont les plus chauds et les plus humides. Ce résultat n'est donc pas le signe d'une adaptation. L'ampleur de la faculté d'adaptation demeure donc très incertaine.

Klauber et al. (2025) ne se limitent pas aux accidents du travail. Ils disposent de données administratives de l'assurance-maladie obligatoire relatives à la population allemande de 25 à 59 ans entre 2007 et 2020. Ces informations exhaustives sont liées à la mesure de vagues de chaleur au niveau géographique fin [102]. Chez tous les travailleurs, une vague de chaleur (d'au moins trois jours) accroît les absences pour raison de santé. Ici, certains groupes sont plus exposés que d'autres [103]. A côté de ces effets de court terme, Klauber

102. Un jour appartenant à une vague de chaleur est un jour où la température maximale est d'au moins 30°C. La surface géographique est divisée selon une grille avec une résolution latitude-longitude d'environ 0,1°× 0,1°.

103. "Especially those with lower income, more physically demanding tasks, and less flexibility to schedule and adjust working hours" (p. 38).

et al. (2025) mettent aussi en évidence que les effets de vagues de chaleur (d'au moins trois jours) entraînent une augmentation soutenue des dépenses liées aux congés de maladie et aux consultations médicales au cours des quatre années suivant l'exposition.

Cette section s'est limitée aux effets mesurés sur les travailleurs en activité. Une littérature existe aussi sur les effets à long terme d'une exposition précoce aux (effets du) changement climatique. Par précoce, on entend ici in utero et durant l'enfance (voir par exemple, Maccini et Yang, 2009, Fishman et al., 2019 et la synthèse de la littérature proposée par Lai et al., 2023). Enfin, d'autres phénomènes comme les incendies de forêt sont associés à des épisodes de températures élevées. Il n'en a pas été question ici. Cabral et Dillender (2024), par exemple, étudient le lien entre la pollution due à de tels incendies et la santé des travailleurs.

Chapitre 7

Impact d'autres phénomènes associés au changement climatique

Le changement climatique se manifeste par une plus grande fréquence ou une plus grande ampleur d'un ensemble de phénomènes : ouragans et cyclones, sécheresses, inondations, feux de brousse et incendies de forêts notamment. La figure 7.1 en offre une illustration. Elle fournit l'évolution sur plus de 40 années du nombre mondial de désastres liés au climat (la légende sous le graphique précise les critères utilisés pour ce recensement). Après une tendance à la hausse entre 1980 et 2000, le nombre de désastres fluctue ensuite sans tendance claire. Le coût estimé des désastres présente de grandes variations autour d'une tendance que l'on devine croissante. Les valeurs récentes de ces deux courbes se situent dans le haut de la distribution. De tels phénomènes sont observés depuis très longtemps. Mais, il est attendu qu'ils s'amplifient (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Les désastres naturels provoquent bien évidemment des dommages *directs* aux personnes (en termes de santé, de décès, d'emploi, de rémunérations, etc.), au capital productif des entreprises, aux infrastructures collectives, aux animaux, à l'environnement naturel et bien entendu à la production de biens et services. Mais, ces désastres ont aussi des effets *indirects* à court et à long termes, qu'il importe de quantifier : la détérioration des capacités de production et des infrastructures crée des ruptures dans les chaînes d'approvisionnement ; les infrastructures scolaires détériorées menace la formation des jeunes ; les prix de divers biens et services sont impactés ; la réparation des dommages stimule l'activité de certains secteurs d'activité et peut avoir des effets bénéfiques à moyen et à long terme ; les touristes évitent, parfois durablement, les zones sinistrées ; les finances publiques sont concernées par les dommages aux infrastructures collectives et les modifications induites de la base taxable ; etc. La perception d'un *risque* accru de désastre climatique dans une zone géographique peut également modifier la dynamique d'entrée et de sortie des firmes et des populations. Botzen et al. (2019) résument la littérature qui s'est développée pour mesurer tant les effets directs qu'indirects. De ces effets directs et indirects découlent les

effets nets sur l'emploi et sur les rémunérations des populations affectées par les désastres naturels. La suite se penchera exclusivement sur quelques études qui mesurent explicitement les conséquences de désastres climatiques (potentiellement liés au changement climatique [104]) sur des indicateurs du marché du travail [105]. Les paragraphes suivants traiteront successivement et de manière sélective de l'impact des ouragans (cyclones ou typhons), des sécheresses et des inondations [106]. D'autres phénomènes, comme les incendies de forêt ou la disponibilité d'eau potable, auraient aussi pu être abordés par ce chapitre.

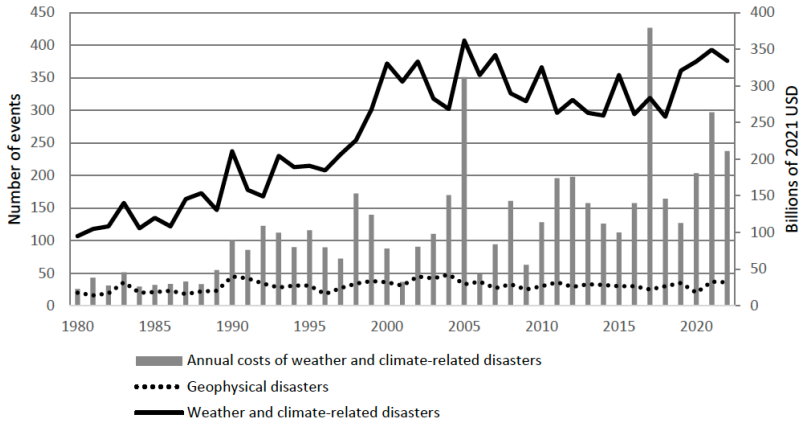


FIGURE 7.1 – Dénombrement des désastres liés au climat et désastres de nature géophysiques accompagnés d'une estimation du coût annuel des premiers : niveau mondial. Source : Figure 1 de Ferreira (2024).

Ce graphe se base sur les données collectées par le Centre for Research on the Epidemiology of Disasters de l'UCLouvain (`https://www.emdat.be/`). Cette source recense les désastres dont les effets vérifient au moins un des quatre critères suivants : au moins dix décès ; au moins 100 personnes touchées par le sinistre ; la déclaration de l'état d'urgence par les autorités publiques ; un appel des autorités à l'aide internationale. La notion de désastre lié au climat couvre les sécheresses, les incendies de forêt, les inondations, les glissements de terrain, les cyclones tropicaux, les fortes tempêtes et les températures extrêmes. La notion de désastre de nature géophysique couvre les tremblements de terre, les tsunamis et les éruptions volcaniques. Pour ces derniers, on n'observe pas de tendance à l'augmentation. Les coûts pris en compte incluent le montant des dommages causés aux biens, aux cultures et au bétail. Pour chaque catastrophe, le chiffre enregistré correspond à la valeur des dommages au moment de l'événement.

De tels phénomènes climatiques sont partiellement prévisibles mais ils conservent un caractère aléatoire. Par exemple, la puissance effective, la trajectoire exacte et le moment

104. L'établissement d'un lien probable avec le changement climatique est un travail scientifique en soi (voir, par exemple, Schiermeier, 2018). Développer ce sujet sort des limites de ce livre.

105. Budina et al. (2023) présentent une analyse systématique des effets sur les inégalités de revenus.

106. Les ouragans peuvent entraîner des inondations. Les sécheresses peuvent entraîner des incendies à grande échelle. Les évaluations mesurent alors généralement l'effet combiné de ces différents phénomènes.

de l'impact d'un cyclone ne peuvent être déterminés longtemps à l'avance. Ce caractère aléatoire est propice à une évaluation des impacts. La demande locale de travail se déplace suite aux désastres climatiques : l'événement lui-même réduit cette demande mais l'éventuelle réponse de l'aide d'urgence et la réparation des dommages agit en sens inverse, les secteurs concernés par ces deux mouvements pouvant être différents. Par ailleurs, en plus de faire des victimes, ces désastres peuvent provoquer des mouvements migratoires, temporaires ou non [107]. Dans ce cas, l'offre locale de travail se déplace. En présence de réponses migratoires, il y a lieu de distinguer les effets sur la trajectoire des victimes de ces tempêtes (quel que soit le lieu où elles vivent et travaillent) et les effets sur les indicateurs du marché du travail des zones sinistrées. Dans ce second cas, il importe aussi de s'intéresser aux effets dans les zones géographiques où se concentrent les personnes qui ont quitté la région sinistrée. A titre d'exemple, un effet positif de moyen terme sur les rémunérations dans cette région peut coexister avec une baisse dans les zones géographiques où les travailleurs déplacés aboutissent.

Ce chapitre privilégiera des études économétriques s'intéressant au marché du travail, qui exploitent des données individuelles de ménages ou de firmes, des données régionales ou nationales et qui bâtissent un contrefactuel à partir d'observations statistiques au sein de groupes bien choisis (voir le chapitre 2) [108]. A côté de ces études, il existe aussi des travaux scientifiques qui mesurent les impacts de désastres climatiques à l'aide de modèles mathématiques des économies (voir Marto et al., 2018, Botzen et al., 2019, Sieg et al., 2019, Cantelmo et al., 2023, et Bilal et Rossi-Hansberg, 2025). Parmi les thèmes qui ne seront pas abordés, Cuaresma (2010), Husted et al. (2022) et Paudel (2015) abordent les liens entre les désastres naturels et la formation de capital humain. Bilal et Rossi-Hansberg (2025) insistent sur le rôle des anticipations et de l'adaptation via les migrations et la localisation des investissements. Signalons aussi l'existence d'une littérature sur les liens entre les événements climatiques extrêmes et la santé mentale, en particulier parmi les travailleurs (pour un aperçu de cette littérature, voir par exemple Prieto et al., 2025).

7.1 Les ouragans

7.1.1 Que sait-on ?

Plusieurs études portent sur les effets des ouragans aux États-Unis. Belasen et Polachek (2008) et Belasen et Polachek (2009), par exemple, étudient les effets des ouragans qui ont atteint la Floride sur la période 1988–2005. L'unité d'observation est ici le comté.

107. Voir par exemple l'étude de Gröger et Zylberberg (2016) concernant un typhon au Vietnam.

108. Dans le cas de données individuelles, comme le désastre climatique est observé au niveau de zones géographiques, il n'est pas certain que l'individu ou la firme ait effectivement subi le désastre en question. Cette préoccupation concerne surtout les inondations qui peuvent être très locales. La suite reviendra sur cette préoccupation.

Ces auteurs concluent que l'emploi local baisse suite à un ouragan par comparaison avec des zones de contrôle (c'est à dire le contrefactuel formé de zones jugées comparables que l'ouragan n'a pas affectées). La chute de l'emploi est de l'ordre de 4%. L'impact sur les rémunérations est fluctuant mais paraît devenir légèrement positif après 7 trimestres. L'interprétation des auteurs est que la baisse de l'offre locale de travail est un phénomène majeur et que la demande de travail se modifie dans certains secteurs. Les auteurs notent aussi que les comtés voisins des zones touchées connaissent un choc positif d'offre de travail qui y entraîne une baisse des salaires.

Quelques études se sont penchées plus précisément sur les fameux ouragan Katrina et Rita survenus en 2005 à l'aide de données individuelles. Exploitant une enquête auprès des victimes, Elliott et Pais (2006) concluent que les afro-américains à bas revenus ont nettement plus souffert à court terme de l'ouragan Katrina. Sur base de données fiscales, Deryugina et al. (2018) confirment des pertes de revenus du travail en 2006 mais ces auteurs concluent que dès l'année 2008 les revenus du travail des victimes de Katrina dépassent ceux du groupe de contrôle constitué de villes similaires que l'ouragan n'a pas touchées. Parmi les mécanismes explicatifs possibles, les auteurs avancent que la dévastation a forcé bien des victimes à quitter une région peu porteuse sur le plan de l'emploi et à se relocaliser dans des régions plus favorables.

Groen et al. (2020) étudient l'impact des ouragans Katrina et Rita sur les rémunérations des salariés affectés à l'aide de données administratives. Ces auteurs suivent au cours du temps des travailleurs qui résidaient dans les zones sinistrées au troisième trimestre de 2005. Ils comparent l'évolution de leurs rémunérations avant et après les ouragans à celles de travailleurs résidant dans des comtés de contrôle bien choisis en termes de caractéristiques individuelles et de tendances des rémunérations et des conditions économiques avant le troisième trimestre de 2005. L'effet moyen est un déclin modeste des rémunérations trimestrielles [109] suivi d'une croissance de celles-ci entre 2006 et 2008 si bien qu'au-delà de 2008, les rémunérations des personnes en emploi au sein de la population touchée en 2005 deviennent supérieures à celles des individus de contrôle [110]. Une fois les premiers trimestres passés, l'effet sur les transitions de l'emploi vers le non emploi apparaît modeste. Derrière cette moyenne se cache toutefois une importante hétérogénéité. Les travailleurs du secteur de la construction connaissent des gains immédiatement après le passage des ouragans. Les pertes sont plus marquées dans des secteurs comme le tourisme ou les soins de santé. Les pertes se concentrent aussi parmi les travailleurs résidant en 2005 dans les comtés les plus dévastés par les ouragans.

Ces effets, dont le profil temporel peut surprendre, se produisent dans des régions particulièrement riches. Ils ne peuvent être naïvement extrapolés à d'autres contextes. Par

109. Durant les quatre trimestres suivant le troisième de 2005, la perte moyenne de rémunération s'élève à 298$ par trimestre (environ 3% du niveau de rémunération avant l'ouragan parmi les travailleurs touchés par celui-ci).

110. Le gain moyen trimestriel est de 343$ trois ans après l'ouragan.

sa situation géographique et ses caractéristiques économiques, l'exemple de Porto Rico peut être plus informatif que celui des États du sud des États-Unis [111]. Barattieri et al. (2023) ont récolté des données détaillées pour mesurer l'impact cumulé sur l'emploi des ouragans subis par Porto Rico au cours de la période 1995–2017. Cette île est régulièrement frappée par des ouragans mais leur intensité varie d'un comté à l'autre et d'un épisode à l'autre. Une mesure fine des vents au plan local permet aux auteurs de quantifier précisément l'exposition des zones géographiques aux ouragans successifs. La figure 7.2 illustre, pour un d'entre eux, sa trajectoire (partie gauche) et l'hétérogénéité de la force des vents parmi les 78 comtés de l'île (dans la partie droite, plus le comté est foncé plus il a été exposé à des vents violents). L'encadré 1 introduit la spécification utilisée pour estimer l'impact sur l'emploi et les rémunérations.

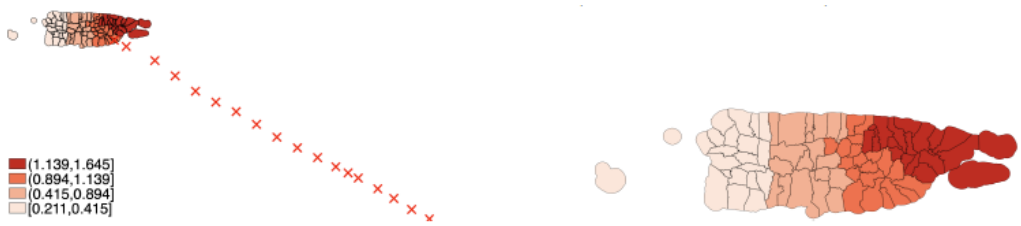


FIGURE 7.2 – Le degré d'exposition des comtés de Porto Rico à l'ouragan Maria en septembre 2017 (S_{ct} dans l'encadré d'approfondissement 1). Source : Figure 1 de Barattieri et al. (2023).

Dans la partie gauche, les croix représentent l'oeil du cyclone à six heures d'intervalle. La partie droite réalise un zoom sur l'île et décrit plus finement l'intensité de l'exposition.

111. Porto Rico est une île des Caraïbes indépendante mais associée aux États-Unis. Sa situation économique n'a cependant rien d'enviable. Le US Census Bureau indique que le revenu médian par ménage est sur la période 2017-2021 de l'ordre de 22 000$ à Porto Rico (69 000 en moyenne aux USA). Quant au taux de pauvreté (tel que mesuré aux USA), il y est d'environ 40% (11,5% en moyenne aux USA) sur la même période. Source : https://www.census.gov/quickfacts/PR.

Encadré 1 *Spécification retenue par Barattieri et al. (2023)*
Pour un comté c frappé le mois t par un ouragan d'intensité S_{ct}, Barattieri et al. (2023) mesurent la variation cumulée du logarithme de l'emploi ($E_{c,\tau}$) k périodes après la survenance de l'ouragan : $\Delta \ln E_{c,t+k} \equiv \ln E_{c,t+k} - \ln E_{c,t-1}$. Ils retiennent la spécification suivante :

$$\begin{aligned} \Delta \ln E_{c,t+k} &= \alpha^k + \gamma^k S_{ct} + \sum_p \beta_p \left(\ln E_{c,t-p} - \ln E_{c,t-p-1} \right) + \beta \, \Delta LF_{c,t+k} \\ &+ \delta_t + \eta_c + \varepsilon_{c,t+k}, \end{aligned} \tag{7.1}$$

où

- *S_{ct} mesure l'intensité de l'ouragan (plus de détails dans l'article),*
- *les paramètres γ^k captent la réponse de l'emploi cumulé mesurée k unités de temps après le sinistre survenu en t (effet à la marge commun à tout comté c),*
- *les termes $\ln E_{c,t-p} - \ln E_{c,t-p-1}$ permettent de prendre en compte les variations sur une période de l'emploi local au cours de périodes ayant précédé le moment t (de cette manière, les évolutions préalables de l'emploi spécifiques à chaque comté peuvent être prises en compte),*
- *les différences $\Delta LF_{c,t+k}$ mesurent la variation de la taille de la population active en c entre $t-1$ et $t+k$,*
- *les paramètres δ_t et η_c captent respectivement les effets du temps calendrier pour toute l'île et les effets fixes propres à chaque comté,*
- *la variable aléatoire $\varepsilon_{c,t+k}$ capte toute l'hétérogénéité non observée en c au temps $t+k$.*

Cette spécification est aussi utilisée pour étudier l'impact sur le niveau de l'offre de travail (cette variable disparaissant alors du membre de droite). Les auteurs concluent que l'impact sur cet indicateur est très petit et n'est jamais significativement différent de zéro. Ceci suggère que les mouvements migratoires ont joué un rôle négligeable.

La figure 7.3 présente les effets d'un ouragan d'intensité moyenne sur l'emploi et sur les rémunérations dans les comtés de l'île [112]. Notons que contrairement aux études de Deryugina et al. (2018) et de Groen et al. (2020), il ne s'agit pas ici d'un suivi des individus affectés par l'ouragan, où qu'ils se localisent, mais d'une analyse d'indicateurs du marché du travail des résidents de l'île. L'effet sur l'emploi n'est pas instantané. Six mois après le sinistre, la chute de l'emploi local est d'environ un demi pour-cent et elle est significativement différente de zéro pendant quelques mois. Cet effet est encore perceptible 24 mois après le sinistre mais il cesse rapidement d'être statistiquement significatif. Il apparaît donc difficile de mesurer avec précision l'effet sur l'emploi au-delà de quelques mois. L'effet sur les rémunérations devient légèrement positif après un trimestre mais il n'est quasi jamais significativement différent de zéro au cours des 24 mois consécutifs au sinistre. Derrière ces effets moyens se cache cependant à nouveau une importante hétérogénéité que Barattieri

112. Avec les notations de l'encadré 1, cette figure présente le produit $\gamma^k \ \overline{S_{ct}}$, où le second terme est la moyenne de S_{ct} conditionnelle à $S_{ct} > 0$.

et al. (2023) étudient. Dans un premier groupe de secteurs, comme la construction et le génie civil, l'emploi croît de 1 à 4,5 % six mois après que l'ouragan ait frappé l'île et un impact positif et statistiquement significatif demeure après 24 mois [113]. Certains secteurs de l'industrie manufacturière locale connaissent aussi une hausse persistante et significative de l'emploi mais celle-ci intervient plus tardivement [114]. Un second groupe de secteurs connait une chute sensible et statistiquement significative de leur emploi qui est encore parfois visible 24 mois après la survenance de l'ouragan. Il s'agit en particulier du secteur de l'hôtellerie et de la restauration et de certains secteurs de l'agriculture et de l'élevage. La figure 7.4 illustre cela en montrant l'écart de l'emploi dans deux secteurs de chacun des deux groupes. Dans leurs conclusions, Barattieri et al. (2023) soulignent dès lors l'enjeu de la *réallocation des travailleurs* après un ouragan entre secteurs durablement meurtris et d'autres qui tirent leur épingle du jeu.

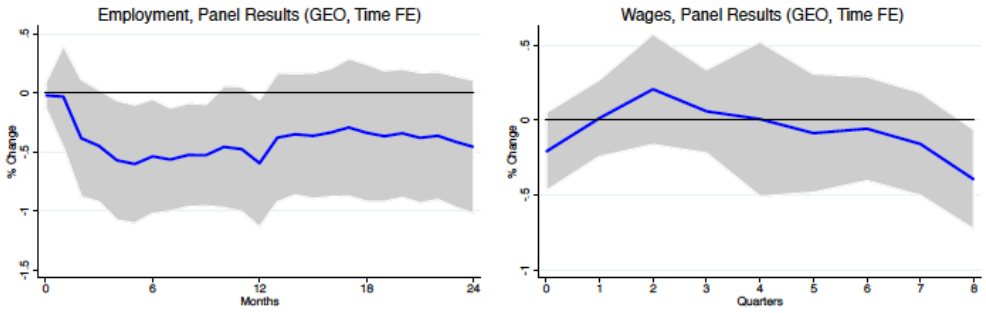
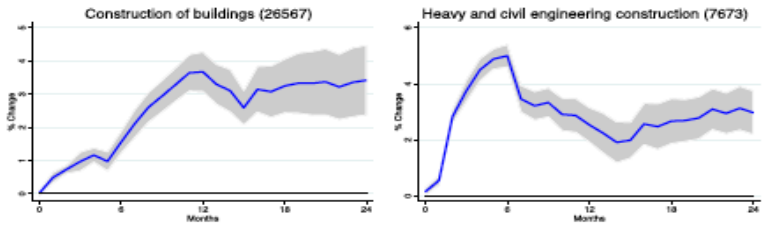


FIGURE 7.3 – Effets sur l'emploi et sur les rémunérations (hebdomadaires) d'un ouragan d'intensité historique moyenne survenu en un moment normalisé à 0 sur l'axe horizontal qui mesure le nombre de mois après le sinistre. L'axe vertical mesure l'écart en %. La ligne bleue représente l'effet estimé et la zone grise est l'intervalle de confiance de cet effet à 95%. Source : Figure 3 de Barattieri et al. (2023).

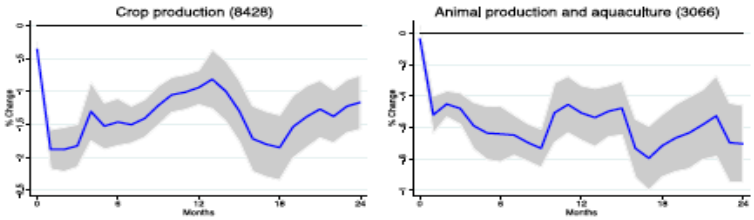
Les conclusions de cette étude de Barattieri et al. (2023) ne peuvent pas être extrapolées à d'autres régions du globe à revenu par tête faible ou moyen. Afin d'avoir une vision plus globale, il apparaît nécessaire de renoncer aux seuls indicateurs du marché du travail. Dans leur étude des effets sur la croissance économique nationale de plusieurs milliers

113. Les effets bénéfiques pour l'emploi de ces secteurs se retrouvent dans plusieurs autres études portant sur des sinistres similaires.

114. L'étude approfondit le lien entre ce phénomène et l'expansion des activités de (re)construction et de génie civile. L'hypothèse validée est que la reconstruction entraîne après un temps une demande accrue de biens produits par certaines entreprises manufacturières.



(a) Exemples de secteurs où l'emploi augmente.



(b) Exemples de secteurs où l'emploi décline

FIGURE 7.4 – Effets sur l'emploi sectoriel d'un ouragan d'intensité historique moyenne survenu en un moment normalisé à 0 sur l'axe horizontal qui mesure le nombre de mois après le sinistre. L'axe vertical mesure l'écart en %. La ligne bleue représente l'effet estimé et la zone grise est l'intervalle de confiance de cet effet à 95%. Source : Figure 4 de Barattieri et al. (2023).

de cyclones tropicaux sur la période 1950–2008, Hsiang et Jina (2014) synthétisent leurs résultats ainsi : "The data reject hypotheses that disasters stimulate growth or that short-run losses disappear following migrations or transfers of wealth. Instead, we find robust evidence that national incomes decline, relative to their pre-disaster trend, and do not recover within twenty years.". Cette conclusion s'appuie sur des données de pays aux revenus par habitant très divers.

7.1.2 Résumé

En résumé, les effets des ouragans et autres tempêtes tropicales diffèrent selon qu'on s'intéresse aux régions atteintes par ces phénomènes ou aux populations qui y résidaient au moment du désastre. Dans le premier cas, l'emploi apparaît se contracter significativement aux États-Unis et, en tout cas, dans certains secteurs à Porto-Rico. Mais l'effet sur l'emploi sectoriel est hétérogène dans la mesure où certains secteurs associés aux réparations des dommages et à la reconstruction connaissent une hausse de l'emploi. Par conséquent, les tempêtes tropicales entraînent une réallocation des emplois et des travailleurs. Un impact peut aussi être détecté sur des zones géographiques avoisinantes de celles frappées par l'ouragan. Ce phénomène entraîne en effet une émigration hors des zones sinistrées. La

hausse de l'offre de travail dans les régions avoisinantes peut y entraîner une baisse des salaires. Seules des études relatives aux États-Unis étudient la trajectoire professionnelle des victimes des ouragans (en particulier de ceux de 2005). Après une chute initiale des gains, on assiste à un redressement. Trois années après le sinistre, deux études détectent même un un effet causal positif sur les gains des travailleurs. Cela dit, l'effet sur les populations est lui aussi hétérogène. Les pertes de revenus se concentrent parmi les travailleurs résidant dans les zones les plus dévastées et parmi les populations afro-américaines à bas revenus.

7.2 Les sécheresses

7.2.1 Que sait-on ?

Les sécheresses sont un autre type de phénomène aux conséquences potentiellement importantes sur l'emploi, les conditions de travail et les rémunérations, tout particulièrement dans certains secteurs économiques comme l'agriculture. En Inde, Jayachandran (2006) montre que les chocs négatifs de productivité dus à la sécheresse font davantage baisser les rémunérations là où le système bancaire est moins développé [115] et les possibilités de migration moindres. Les résultats de Auffhammer et al. (2012) vont dans le même sens. La littérature résumée par Afridi et al. (2022) conclut que les sécheresses entraînent une chute des salaires journaliers dans le secteur agricole et ce davantage là où les opportunités d'emploi non agricole sont minces. Dans les pays dits en développement, les hommes tendent à être davantage mobiles que les femmes sur le plan géographique, ce qui leur permet de plus aisément trouver du travail dans les secteurs non agricoles en cas de sécheresse. Afridi et al. (2022) s'intéressent plus particulièrement aux réponses individuelles à une sécheresse au sein des ménages. Elles mènent leur analyse dans le cas de l'Inde, où environ 40% de la main d'oeuvre est occupée dans le secteur agricole. Ce pays a connu un accroissement de l'émergence, de la durée et de l'intensité des sécheresses au cours des cent dernières années (Figure 1 de Afridi et al., 2022). Ces auteurs utilisent une enquête en panel auprès de ménages de huit zones agricoles [116]. Leur but est de mesurer les effets de court terme d'une sécheresse. Suivant la littérature en Inde, une sécheresse est codifiée si le niveau des pluies du district (où se trouve le village), mesuré durant la mousson, se situe dans les deux déciles inférieurs de la distribution des 45 dernières années pour ce district [117]. La sécheresse dans un village au cours d'une année donnée, en termes techniques le "traitement", est donc ici une variable binaire qui prend la valeur 1 en cas

115. Ce qui complique les mécanismes d'auto-assurance via l'épargne.

116. Notons que si un ménage quitte définitivement son village de résidence, il disparaît du panel. Ceci n'empêche pas les auteurs de capter certaines formes de mobilité géographique n'impliquant pas l'entièreté du ménage.

117. 80% des précipitations annuelles est collecté durant cette période (située entre juin et septembre) dans les régions concernées. Concernant la notion de district, voir la note de bas de page numéro 52.

de sécheresse et 0 sinon. Les variables d'intérêt sont un éventail d'indicateurs du marché du travail pour un individu d'un ménage donné, au sein d'un village, mesurés par mois d'une saison et d'une année donnée (entre 2010 et 2014). La spécification retenue ne sera pas détaillée ici [118]. Une sécheresse accroît faiblement la probabilité d'être en emploi (la marge dite extensive) parmi les hommes mais l'effet n'est pas statistiquement significatif. Une sécheresse réduit cette probabilité d'1,2 point de pourcentage parmi femmes ; cet effet est significatif au seuil de 10% et représente une baisse de la probabilité d'emploi d'1,8%. Parmi les hommes, une sécheresse augmente peu et de manière non statistiquement significative le nombre de jours travaillés (la marge dite intensive qui somme les journées de travail agricole, de soins au bétail et de travail non agricole, que ce travail soit salarié ou non). Elle diminue ce même nombre de 15% chez les femmes et l'effet est significatif au seuil de 5%. Quand les auteurs distinguent diverses formes d'emploi, l'étude confirme que les femmes sont moins en mesure de réagir à une sécheresse par un accroissement de leur participation à l'emploi non agricole en raison d'une plus faible probabilité de migration [119]. Le salaire journalier des femmes dans le secteur agricole et celui des hommes dans le secteur non-agricole baissent significativement (effet respectivement de 11 et de 8%, statistiquement significatif au seuil d'1%).

En Europe, à l'aide de données régionales désagrégées au niveau NUTS-3 [120], Usman et al. (2025) concluent que les sécheresses [121] ont en moyenne des effets négatifs, non pas à court mais à moyen terme (quatre années plus tard), sur l'emploi et sur le volume d'heures travaillées (l'effet, compris entre -1 et -2%, étant statistiquement significatif au seuil de 10%). L'effet négatif de la sécheresse sur l'output régional est, lui, instantané et il s'amplifie quelque peu au cours du temps. L'éventuel effet favorable sur l'emploi de l'aide à la région sinistrée et des nécessaires réparations pourrait se combiner avec des coûts de licenciement pour expliquer le temps nécessaire à l'apparition d'un effet négatif faiblement significatif sur l'emploi.

7.2.2 Résumé

En résumé, les sécheresses entraînent une chute des rémunérations dans le secteur agricole et ce davantage là où les possibilités d'auto-assurance et les opportunités d'emploi non

118. Indiquons simplement que parmi les variables de contrôle figurent essentiellement des caractéristiques de l'individu et de son ménage variant dans le temps, un effet fixe individuel, des effets du temps calendrier et de la saison.

119. Afridi et al. (2022) concluent également que (1) peu d'effets clairs émergent sur le travail dans l'activité agricole familial ; (2) les hommes mais pas les femmes connaissent une réduction statistiquement significative du travail agricole salarié (au niveau des marges extensive et intensive) ; (3) les femmes et non les hommes réduisent de manière significative le travail de soin au bétail (idem).

120. A propos de cette nomenclature, on peut consulter la page `https://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts`.

121. L'épisode de sécheresse est une variable binaire qui prend la valeur 1 si, pendant trois mois consécutifs, une région enregistre une précipitation mensuelle totale inférieure à 50% de la moyenne historique des précipitations mensuelles entre 1991 et 2020.

agricole (via ou non la migration) sont minces. Du point de vue de ces opportunités, les hommes et les femmes n'apparaissent pas être égaux. En Inde, un effet défavorable de la sécheresse sur le fait d'être en emploi et sur le nombre de jours travaillés ne se marque que chez les femmes. En Europe, un effet négatif des sécheresses sur l'emploi et les heures travaillées apparaît au bout de quelques années.

7.3 Les inondations

7.3.1 Que sait-on ?

Leiter et al. (2009) étudient les effets à court terme d'inondations survenues en France, en Italie, en Espagne et au Royaume-Uni. Ils disposent de données annuelles issues des bilans d'un échantillon d'entreprises de l'industrie manufacturière [122]. Le choc subi (le "traitement") est ici une variable binaire valant 1 si la région où l'entreprise est localisée a été touchée par une inondation d'ampleur "suffisante" en l'an 2000 et valant 0 sinon [123]. Le niveau de désagrégation géographique n'est pas très fin puisqu'il est celui de la nomenclature NUTS-2 [124]. On peut par conséquent sans risque avancer que toutes les entreprises "traitées" n'ont pas en réalité directement subi une inondation [125]. Les auteurs constituent un groupe de contrôle formé de toutes les entreprises n'appartenant pas à une région inondée au sein des pays couverts. Ils exploitent en réalité deux observations : la moyenne sur les années 1997 à 1999 (respectivement, 2000 à 2002) constituent la période "avant" (respectivement, "après"). Le recours à la méthode de différence de différences (conditionnelle à quelques caractéristiques observées "avant") conduit à la conclusion que la croissance du nombre de personnes en emploi et celle de l'actif des entreprises sont *plus* fortes dans les entreprises des régions inondées alors que la valeur-ajoutée est, elle, affectée négativement. L'effet positif sur l'emploi et les actifs prédomine pour les entreprises ayant une part élevée d'actifs immatériels (qui incluent la recherche et le développement, les brevets, les logiciels, etc.). Cette étude présente cependant une faiblesse. L'absence de recul temporel empêche de vérifier si l'évolution des entreprises "traitées" et celles de contrôle sont parallèles avant 2000 en termes des indicateurs de résultat utilisés. Il n'y a par conséquent pas de vérification possible d'une hypothèse centrale requises pour appliquer la méthode de

122. Afin de pouvoir localiser le lieu de production, l'étude ne considère que les entreprises ayant un seul établissement.

123. La légende sous la figure 7.1 énumère les critères pour qu'un désastre soit recensé par le Centre for Resarch in Epidemiology of Disasters, qui est la source de Leiter et al., 2009. Trente régions d'Europe sur 268 ont subi une inondation en l'an 2000, qui furent "majeures" pour 20 d'entre elles.

124. A propos de cette nomenclature, on peut consulter la page `https://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts`. Le niveau NUTS-2 divise la France en 27 entités, l'Italie en 21, l'Espagne en 19 et le Royaume-Uni en 40.

125. L'impact éventuel est donc ce que la littérature appelle un "intention-to-treat effect" : on ne mesure pas l'impact que le fait d'être inondé a sur une entreprise mais bien l'effet d'être localisé dans une région touchée par les inondations.

différence-de-différences.

A l'aide de données macroéconomiques des régions d'Europe plus finement définies (en l'occurence, au niveau NUTS-3), Usman et al. (2025) concluent qu'une inondation [126] a en moyenne un impact positif sur les heures travaillées et, dans une moindre mesure, sur l'emploi, mais l'effet n'est pas statistiquement significatif (au seuil de 10%). Ils ajoutent toutefois que l'activité économique peut croître suite à une inondation mais seulement dans les régions riches d'Europe.

Exploitant des données locales aux États-Unis entre 1998 et 2018, Jia et al. (2025) sont en mesure de distinguer l'impact du risque d'inondation [127] et celui d'un événement d'inondation sur la dynamique des entreprises, la production et l'emploi. Un accroissement d'un écart-type (c'est à dire de 10 points de pourcentage) du risque d'inondation réduit à long terme la taille de la population locale d'1,3% et le niveau de l'emploi de 2 à 2,5% selon les spécifications. Ceci résulte d'une baisse du nombre d'entrées de firmes, d'une baisse moindre du nombre de sorties de firmes et d'une baisse marquée de la production. En revanche, un événement d'inondation n'a guère d'effet à court terme sur l'emploi, les entrées et les sorties de firmes. L'effet sur la population locale est très petit mais celui sur l'output est plus marqué.

Passons à présent à quelques études relatives aux pays du sud de la planète. L'étude de Pan et Qiu (2022) concerne la Chine entre 2003 et 2019 : en ce qui concerne l'emploi, elle aboutit à une conclusion opposée à celle de Leiter et al. (2009). Leur analyse relative à l'emploi porte sur 247 villes dont 4 municipalités au niveau provincial. L'indicateur de "traitement" est ici la part de la surface de la ville qui a été affectée par (au moins) une inondation durant l'année : sa moyenne est 0,003 et son écart-type 0,016. Une carte dans l'article montre qu'en moyenne sur la période 2003–2019, plus de 7% de certaines villes a été inondé. Le taux de croissance (entre l'année t et l'année $t+1$) du nombre de personnes en emploi dans la ville décroit significativement (au seuil de 5%) en fonction de cette part inondée (mesurée en t), conditionnellement à un effet fixe de la ville, à un effet temporel commun à toutes les villes et à quelques caractéristiques temporelles de la ville. Une ville où la part inondée passerait de la valeur moyenne à celle du $9^{\text{ème}}$ décile (0,007) connaîtrait une baisse de son taux de croissance de l'emploi de 0,35 points de pourcentage. Comme la valeur moyenne du taux de croissance annuel de l'emploi s'élève à 12,5%, la baisse relative de ce taux n'est que de 2,8%. Rapporté au taux de croissance médian de l'emploi (3,2%), l'effet relatif s'élève à 11%.

L'étude de Hickson et Marshan (2022) porte sur l'Australie au cours de la période 2002–2019. Les auteurs exploitent la variation exogène du moment et de la localisation des catastrophes au niveau statistique SA4 (qui divise ce pays en 108 entités géographiques).

126. Une inondation est un évènement conduisant à un indice de précipitations locales qui dépasse un seuil jugé extrême.

127. Sans entrer dans les détails, les compagnies d'assurance disposent de cartes où chaque zone géographique se voit assignée un risque d'inondation par an. Cette information est exploitée par Jia et al. (2025).

Les inondations sont recensées par un organisme australien [128]. L'indicateur de désastre est une variable valant 1 si l'individu réside dans une entité géographique sinistrée au cours de l'année considérée et 0 sinon [129]. La probabilité d'être en emploi augmente significativement d'1,3 (respectivement, 1,8) point de pourcentage l'année où une inondation survient (respectivement, l'année suivante) [130]. Une hausse significative ne se marque qu'avec un retard d'un an chez les femmes [131].

En Inde, au cours des années 1983–2011, Chowdhury et al. (2022) rejoignent le message qualitatif trouvé précédemment dans le cas des sécheresses : l'emploi agricole féminin souffre plus des inondations que son homologue masculin et les femmes ont plus difficilement accès à l'emploi non agricole en réponse à ces sinistres.

Vitellozzi et Giannelli (2024) constatent que l'allocation du temps des hommes et celle des femmes diffèrent particulièrement dans les pays à faible et moyen revenu. Elles se demandent d'abord si un désastre naturel peut entraîner un accroissement du temps consacré par les femmes à des activités rémunérées et plus généralement si un tel désastre peut modifier l'allocation du temps au sein des couples. Elles s'intéressent aux fortes inondations durant les périodes de mousson de l'année 2017 au Bangladesh. Elles exploitent une enquête en panel auprès des ménages ruraux en 2018 [132]. L'intensité de l'inondation est la part de surface inondée dans un cercle centré sur le lieu de résidence du ménage et de 5 kilomètres de rayon [133]. Tant pour les femmes que pour les hommes, l'intensité de l'inondation diminue le temps consacré au travail rémunéré (compris dans un sens large [134]) mais l'effet n'est pas statistiquement significatif. Le temps consacré aux tâches domestiques diminue chez les femmes et augmente chez les hommes. Le temps de loisir augmente aussi chez les femmes. Ces derniers effets sont statistiquement significatifs. Vitellozzi et Giannelli (2024) construisent également une variable binaire qui vaut 1 si une femme répond oui à la question "Êtes-vous actuellement impliquée dans un travail ou une entreprise qui génère des

128. Dénommé l'AIDR Emergency Management Knowledge Hub.

129. La spécification retenue contient un effet fixe individuel, l'âge de l'individu, un effet du temps, un effet fixe et une tendance temporelle propre à chaque État australien. Une variable binaire indiquant la présence d'incendies de brousse ("bushfires") est aussi présente dans la spécification. Comme dans le cas de l'étude de Leiter et al. (2009), on n'est pas sûr qu'un individu donné ait personnellement subi une inondation ou un incendie. On sait seulement qu'il demeure dans l'entité géographique où un tel événement s'est produit. On mesure donc ici aussi un "intention-to-treat effect".

130. L'article exploite encore d'autres types d'indicateurs d'impact.

131. Concernant les incendies de brousse ("bushfires"), ils nuisent à la probabilité d'emploi des femmes mais ils élèvent, avec retard, celle des hommes. Les États les plus exposés aux deux types de désastres sont différents notamment sous l'angle de la densité de population.

132. Il s'agit d'un panel formé de trois vagues d'enquête : en 2011, 2015 et 2018. L'échantillon exploité est formé des ménages présents aux trois enquêtes.

133. En moyenne 9% avec un maximum de 93%. Deux autres rayons, de 2 et de 10 kilomètres, sont aussi considérés.

134. Puisqu'il recouvre le travail salarié, le travail indépendant, la pêche, les travaux de construction et agricoles et les temps de déplacement.

revenus, fournit de la nourriture supplémentaire ou vous aide à constituer des actifs pour votre ménage ?" et zéro sinon. L'intensité de l'inondation augmente très significativement (au seuil d'1%) la probabilité d'une réponse positive à cette question. Cette même intensité augmente aussi l'indicateur composite d'autonomisation des femmes développé par Alkire et al. (2013) [135] (l'effet étant ici significatif au seuil de 10%).

Vitellozzi et Giannelli (2024) cherchent ensuite à savoir si les changements persistent. Lors des inondations de 2014, exploitant la vague d'enquête de 2015, Canessa et Giannelli (2021) ont mis en évidence des effets similaires à ceux indiqués ci-dessus. La question que se posent alors Vitellozzi et Giannelli (2024) est de savoir si les effets des inondations de 2017 sont différents au sein de deux sous-populations : les ménages ayant aussi subi les inondations de 2014 d'une part, ceux qui y ont échappé d'autre part. La réponse est que les effets sont nettement différents. Seules les femmes de la première sous-population réduisent significativement le temps consacré aux tâches domestiques (les autres l'augmentent significativement). L'accroissement de la probabilité d'une réponse positive à la question indiquée au paragraphe précédent est présente au sein des deux sous-populations mais cet effet n'est statistiquement significatif que parmi celles ayant subi aussi les inondations en 2014. Dans une société patriarcale, où la répartition des rôles au sein des ménages est bien marquée, le choc exogène initial (l'inondation de 2014) apparaît donc avoir un effet persistant. Toutefois, à côté d'un tel lien de causalité, un effet de composition n'est pas exclu (les femmes au sein des deux sous-populations peuvent avoir des caractéristiques inobservées différentes corrélées avec l'intensité des inondations de 2017 et avec les variables d'impact considérées).

La hausse du niveau des mers et des océans concerne énormément de parties du globe terrestre. Il s'agit d'un processus lent conduisant à l'inondation permanente de zones côtières souvent densément peuplées (en l'absence d'investissements fort importants de protection de ces côtes). Ceci entraînera une réallocation de l'activité économique que l'article de Desmet et al. (2021) tente de cerner. Les conséquences sur les populations sont considérables (voir par exemple Burzyński et al., 2022, en ce qui concerne les migrations).

7.3.2 Résumé

En raison du caractère parfois local des inondations, s'assurer qu'un individu, un ménage ou une entreprise a subi une inondation n'est pas chose aisée à partir d'informations sur les phénomènes naturels relevées au niveau de régions. Ceci explique peut-être que les résultats résumés ci-dessus ne convergent pas. En Australie, en Europe et aux USA, une inondation ne paraît pas nuire à l'emploi, que du contraire parfois. En Chine, en Inde et dans une certaine mesure au Bangladesh, l'effet est en revanche défavorable. Les hommes et les femmes n'apparaissent pas égaux car les premiers ont davantage d'opportunités de

135. Cet indicateur composite porte le nom suivant : "the Women's Empowerment in Agriculture Index".

diversification (travail non agricole, migration). Au Bangladesh, les inondations engendrent une diminution des tâches domestiques chez les femmes. Celles-ci orientent en effet davantage leur emploi du temps vers des activités productives comprises dans un sens large. Rien ne dit cependant que ceci perdure une fois le désastre passé.

Les études prises en compte ici exploitent des informations statistiques sur des phénomènes observés par le passé. Il importe à nouveau de ne pas naïvement extrapoler ces résultats pour l'avenir. Les raisons sont les mêmes que précédemment : des mesures d'adaptation au changement climatique peuvent se généraliser à mesure que les désastres naturels se répètent mais la dégradation de l'environnement peut élever l'intensité, la durée ou la fréquence de ces phénomènes, les rendant ainsi plus dommageables. Les formes que peut prendre l'adaptation sont multiples [136]. Dans une étude par comté aux États-Unis, Bilal et Rossi-Hansberg (2025) s'interrogent sur le rôle des anticipations au changement climatique. A l'aide d'un modèle mathématique, ils simulent les effets d'une croissance des températures atmosphériques moyennes de 3°C à l'horizon 2100 selon un profil temporel connu de tous les acteurs économiques. Cette élévation des températures et ses effets sur les phénomènes climatiques associés (vagues de chaleur et tempêtes violentes) a d'importants impacts malgré les possibilités d'adaptation (via la migration et la localisation de l'investissement aux sein du pays). La dégradation d'un indicateur de bien-être de la population est générale mais hétérogène d'un comté à l'autre. Ils ajoutent : "Finally, in the U.S., adaptation through migration reduces the losses from climate change for workers by more than a quarter. It leads to substantial reductions in the dispersion of worker losses, but to large increases in the dispersion of the losses for capitalists ; worker movements increase the losses in the value of capital at locations harmed by climate change" (p. 42).

136. "Technological improvements, changes in individual behavior, the ability of trade to insure against climate risk, movements of labor away from exposed areas, reallocation of capital, and climate-related insurance, all constitute forms of adaptation" (Bilal et Stock, 2025, p. 33).

Deuxième partie

Les travailleurs face à la transition environnementale

Les chapitre précédents ont montré que divers phénomènes, que le changement climatique d'une manière ou d'une autre renforce, ont eu des effets profonds mais hétérogènes sur l'allocation du temps des personnes, l'emploi, les rémunérations, la formation du capital humain, la productivité et la santé des travailleurs. Ce constat, centré sur les travailleurs, rejoint d'autres synthèses plus générales, portant sur le passé mais aussi sur l'avenir, comme celles de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (2022), de Park (2024), du World Economic Forum (2024), de Hsiang (2025) ou de la World Meteorogical Organization (2025) par exemple. Face aux conséquences de l'inaction, que certains de ces documents quantifient, la nécessité d'un changement est apparue indispensable, parfois depuis longtemps déjà. Ce changement urgent, que l'on désigne notamment par l'expression **transition environnementale**, a lui aussi des répercussions sur la sphère du travail et de l'emploi. Cette seconde partie est consacrée à ces répercussions.

Cette partie commencera par une clarification de la notion de transition environnementale. Nous verrons qu'elle englobe mais ne se résume pas à la réduction drastique des émissions de GES (encore appelée la décarbonation). Celle-ci est cependant au coeur de l'essentiel de la littérature économique. Comme la décarbonation de nos systèmes de production et de consommation d'énergie joue un grand rôle dans la transition environnementale, les prix des énergies occupent une place importante dans cette littérature. L'impact de ces prix sur l'emploi et les rémunérations sera dès lors un premier thème à investiguer. Les effets de la taxation du carbone et des mécanismes analogues seront un thème connexe à analyser dans la foulée. Ces deux étapes couvriront des études exploitant principalement des données microéconomiques (des données d'entreprises, par exemple) ou des observations mesurées au niveau des secteurs et des régions. L'usage de telles données permet d'analyser assez finement la réalité économique mais ces études ne peuvent procurer qu'une connaissance partielle des effets sur le marché du travail. Afin de bâtir un contrefactuel, elles supposent en effet qu'il existe des unités d'observation (entreprises, secteurs, régions) que les manifestations de la transition environnementale laissent intactes. Afin que cette hypothèse soit crédible, ces analyses doivent fréquemment étudier des situations particulières. On ne sait dès lors pas dans quelle mesure les résultats obtenus sont généralisables. Une compréhension plus complète, bien que moins fine, n'est donc possible qu'à l'aide d'un autre type d'approche. Celle-ci se base sur la simulation de modèles macro-économiques (distinguant souvent un éventail de secteurs, d'où l'appellation plus appropriée de modèles "macro-sectoriels"). Les prédictions d'une diversité d'outils complexes de modélisation, qu'il sera impossible de présenter en détail, seront évoquées dans cette partie. La synthèse se limitera à des études qui produisent explicitement de l'information à propos d'indicateurs du marché du travail. Les outils macro-économiques utilisés ont, eux aussi, leurs limites. Il importera donc de développer une critique des analyses de la décarbonation de nos économies reposant sur la simulation de tels modèles.

Par la suite, cette seconde partie s'écartera de la perspective macro-économique pour aborder successivement les notions d'emplois "verts" et "bruns", ainsi que leur mesure, et les effets de l'économie circulaire sur le marché du travail. Cette partie se poursuivra avec une discussion de la réallocation des emplois et des travailleurs induite par le changement climatique et par les politiques menées pour en limiter l'importance et les effets. Lorsque l'information disponible distingue les effets par type de travailleurs, il en sera fait mention. Un dernier temps sera consacré à la question : la disponibilité de main d'oeuvre freine-t-elle la décarbonation des économies ?

Chapitre 8

Transition environnementale : de quoi parle-t-on ?

L'introduction de ce livre a rappelé que l'économie est encastrée dans la nature et que celle-ci est notamment une source de biens et de services nécessaires à l'activité économique et le réceptacle d'un ensemble de rejets de l'activité économique. Schématiquement, la question de la transition environnementale se formule comme les changements requis afin
- soit de ramener la pression environnementale humaine *globale* sous un seuil jugé soutenable ; une concrétisation de ce principe consiste à ramener neuf processus biophysiques et biochimiques essentiels dans des limites garantissant la stabilité et de la résilience du système terrestre dans son ensemble (Richardson et al., 2023) ; la suite proposera une autre formulation basée sur le rapport de Dasgupta (2021) ;
- soit de limiter l'accumulation de GES à des niveaux compatibles avec un objectif de réchauffement maximum de l'atmosphère.
Cette seconde conception, qui est nettement plus étroite et plus communément admise, se limite donc à une composante des rejets de l'activité économique. Ajoutons qu'à côté d'une perspective de réduction (en Anglais, "abatement") ou d'atténuation (en Anglais "mitigation") de la pression environnementale globale ou des émissions de GES, cette notion de transition environnementale inclut aussi celles d'adaptation et de capacité de résilience face aux changements environnementaux en cours et à venir.

Quel que soit le sens donné à cette notion, la transition environnementale n'est pas un concept isolé. Elle peut d'abord être reliée au concept de soutenabilité. En termes généraux, "sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs" (Brundtland, 1987, Chapitre 2). La traduction de cette définition en des termes précis s'est révélée complexe (voir notamment Arrow et al., 2012, 2013, Fleurbaey, 2015, Pindyck, 2024). Le dé-

veloppement économique des derniers siècles, essentiellement situé dans les pays riches de l'OCDE, laisse un patrimoine naturel ou encore un « capital naturel » dégradé, notion que les Nations Unies définissent ainsi : "Natural capital refers to the stocks of environmental assets (including natural resources, ecosystems and a stable climate) that generate flows of goods and services into the economy." (United Nations, 2020, p. 6). Mais, ce développement économique passé laisse aussi aux générations futures un « capital construit » étendu (bâtiments, équipements et infrastructures diverses, systèmes de santé, etc.), un riche « capital intellectuel » (connaissances pour développer des remèdes contre les maladies, créer de nouveaux produits de nouvelles manières, concevoir de nouvelles réponses au changement climatique, etc.) ainsi qu'un ensemble de « mécanismes institutionnels » qui organisent les processus de décision (démocratie politique et dialogue social au plan national, organismes internationaux, par exemple). En plus des débats sur le concept même de soutenabilité, des discussions intenses portent sur la question suivante : ces capitaux construit et intellectuel et ces mécanismes institutionnels peuvent-ils sous certaines conditions suffire à compenser la dégradation patente du capital naturel ? La réponse dépend notamment de la mesure dans laquelle ces différentes formes de capital sont ou non des substituts [137], un thème qui reviendra au chapitre 12.

La transition environnementale peut ensuite être vue comme une dimension des objectifs du développement durable (ou soutenable ; en Anglais, "Sustainable Development Goals") adoptés en 2015 par 193 États des Nations Unies. L'Agenda 2030 pour le développement durable se présente sous la forme de 17 objectifs de développement durable, chaque objectif se déclinant en plusieurs cibles à atteindre en 2030 [138]. Le treizième objectif est en effet intitulé "Climate Action". Le rapport de l'United Nations Department of Economic and Social Affairs (2025) livre le message général suivant : "The 2025 progress assessment reveals that the world remains far off track from achieving the 2030 Agenda" (p. 4) [139]. Ce constat, que les rapports des années antérieures annonçaient déjà, alimente une remise en question de cet éventail de 17 objectifs (voir par exemple Benson et Craig, 2014). Certains auteurs estiment qu'il y a des contradictions entre les 17 objectifs (voir par exemple Reindl et Hollings, 2025).

Ces remises en question s'étendent également à la notion de transition environnementale. A côté des deux compréhensions de ces termes introduites précédemment et approfondies par la suite, certains auteurs préconisent d'autres contenus et d'autres appellations comme, par exemple, la « transition juste » (International Labour Organisation, 2015, Sabato et Mandelli, 2024) [140]. Il n'y a pas de consensus à propos de cette notion. Hernandez

137. S'ils le sont, on parle de soutenabilité faible et s'ils ne le sont pas de soutenablité forte.
138. Ces objectifs sont présentés à l'adresse `https://sdgs.un.org/goals`.
139. Dans la même lignée, Fanning et Raworth (2025) concluent que, sur la période 2000 – 2022, il n'a pas été globalement possible d'éliminer simultanément la précarité et les dépassements écologiques.
140. Voir aussi la poursuite de l'objectif consistant à répondre aux besoins minimaux de tous dans les limites de ce que la planète vivante peut supporter chez, par exemple, Fanning et Raworth (2025).

Carballo et al. (2025b) la définisse ainsi :

> "To date, 'just transition' remains a fluid concept with three core aspects : the creation of decent[141], new jobs ; minimizing negative impacts on workers and communities, particularly those that have been historically marginalized ; and ensuring fairness of procedures and inclusive engagement of stakeholders" (Hernandez Carballo et al., 2025b, p. 4)

Cette préoccupation de justice, qui est sous-jacente à la démarche de ce livre, conduit parfois à parler de transitions au pluriel[142].

Le terme « transformation » et celui de « transition » coexistent et sont pour certains auteurs des synonymes :

> "To designate the central object of studies, i.e., systemic and sustainable changes, the terms "transition" and "transformation" are commonly used by the scientific community. (...) However, the specificities of these concepts remain a source of confusion within the scientific community. This confusion is partially expressed and explained by the fact that both concepts are used both synonymously and distinctly by the scientific community." (Dalimier et al., 2026, p. 2)

La suite de ce texte continuera à parler de transition mais il est sans doute utile de savoir que le terme de transformation peut parfois avoir une connotation différente. Même si cette connotation peut varier d'une communauté scientifique à une autre, cette citation clarifie partiellement les choses :

> "Transition has been mainly employed to analyse changes in societal subsubsystems (e.g. energy, mobility, cities), focusing on social, technological and institutional interactions (Loorbach et al., 2017). Transformation is more commonly applied to refer to large-scale changes in whole societies, which can be global, national or local, and involve interacting human and biophysical system components (Brand 2014 ; Folke et al., 2010)." (Hölscher et al., 2018, p. 2)

8.1 Transition environnementale : la perspective englobante

Avant de traiter de la perspective étroite de limitation des émissions de GES, commençons par une vue plus globale. Nous le ferons en suivant le rapport d'un des économistes de l'environnement les plus reconnus : Partha Dasgupta. Le rapport de Dasgupta (2021) prend

141. "ILO defines decent work as involving 'productive employment that offers fair income, workplace security, social protection, opportunities for personal growth, social integration, freedom of expression, participation in decision-making, and equal treatment for all".

142. D'autres parties prenantes utilisent le pluriel pour d'autres raisons. On parle par exemple de « transitions écologique et numérique » pour désigner la simultanéité entre ces deux transitions.

au sérieux l'encastrement de l'économie mondiale dans la biosphère [143] (dont le capital naturel fait partie). Le capital naturel et son exploitation créent souvent des externalités [144].

Les pressions exercées par l'humanité sur la biosphère, c'est-à-dire son **empreinte écologique globale**, ont deux composantes : d'une part, ce que l'activité humaine absorbe comme biens et services produits par la biosphère [145] et d'autre part, les rejets de cette même activité dans la biosphère [146]. Par exemple, l'activité humaine extrait des combustibles fossiles, l'énergie chimique de ceux-ci peut se transformer en énergie thermique et en énergie rayonnante avec des rejets dans l'environnement, en particulier le rejet d'énergie thermique sous une forme dégradée. Si, comme le fait le chapitre 4 de Dasgupta (2021), on se limite à l'activité économique dans une perspective macroéconomique, la première composante peut s'écrire comme le rapport entre le PIB total (en volume), noté Y, et un paramètre moyen d'efficacité avec laquelle les biens et services de la biosphère sont convertis en PIB, noté α_X (c'est la dimension *source* en Anglais) ; la seconde composante peut, elle, s'écrire comme le rapport entre Y et la mesure dans laquelle la biosphère est transformée par les rejets de l'activité économique, noté α_Z (c'est la dimensions *sink* en Anglais). L'empreinte écologique globale, c'est à dire les sollicitations totales par unité de temps (en bref, le « taux de sollicitation »), sont donc la somme

$$Y/\alpha_X + Y/\alpha_Z.$$

A l'échelle planétaire, l'empreinte écologique globale dépasse depuis de nombreuses années le taux de régénération de la biosphère, noté G. Dasgupta (2021) explique qu'aucun des deux paramètres α ne peut croître indéfiniment et que le taux de régénération G est lui aussi fini [147]. Comme en moyenne période le taux de sollicitation et celui de régénération doivent être égaux, le PIB mondial Y ne peut croître indéfiniment. Si l'on écrit Y comme le produit de la taille de la population mondiale, N, par le PIB par tête, y, et si l'on admet que N tendra finalement vers un niveau plafond fini, y devra également demeurer fini. Parce que l'économie est encastrée dans son environnement naturel, la croissance économique infinie est donc un leurre [148]. Que la croissance économique infinie soit un leurre n'em-

143. On peut définir la biosphère comme l'ensemble des organismes vivants et leur milieu de développement sur la planète, c'est-à-dire dans l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère (la couche superficielle de l'écorce terrestre). Le rapport de Dasgupta (2021) a fait l'objet de divers commentaires. Voir, par exemple, Groom et Turk (2021).

144. A côté des externalités bien connues due à la combustion des énergies fossiles (GES, pollution de l'air), citons les impacts de l'activité économique sur les mangroves qui ont des rôles multiples y compris sur la pêche, sur les forêts qui absorbent les GES (l'exploitation minière et l'agriculture intensive souvent associées à la déforestation), etc.

145. Parmi les biens, citons par exemple la biomasse, les minerais, les sources d'énergie ; parmi les services, citons par exemple la filtration de l'eau, la pollinisation, la régulation des inondations.

146. GES, déchets plastiques et autres polluants.

147. Ces affirmations, essentielles, sont notamment étayées à la section 4.7 et au chapitre 4* de ce rapport.

148. On avance parfois que la croissance se dématérialise et s'affranchit ainsi des contraintes de l'environnement naturel. Le chapitre 14 insistera sur les limites à la dématérialisation.

pêche toutefois pas un processus de croissance sur un horizon de temps fini. Puisque la somme $Y/\alpha_X + Y/\alpha_Z$ a durablement dépassé G mais ne peut continuer à le faire, la transition environnementale posée en ces termes signifie que l'empreinte écologique globale, $Y/\alpha_X + Y/\alpha_Z$, doit baisser afin de passer un certain temps au moins sous le niveau de G.

La présentation simplifiée présentée ci-dessus postule que la biosphère est un tout indifférencié. Cela a permis d'exprimer simplement qu'un taux unique d'empreinte, $Y/\alpha_X + Y/\alpha_Z$, ne peut durablement dépasser un taux unique de régénération G. Mais, cela revient à supposer que les différentes composantes de la biosphère ainsi que les biens et services qu'elle procure à l'humanité peuvent se substituer les uns aux autres sans la moindre difficulté. C'est une simplification extrême de la réalité dont Dasgupta (2021) est parfaitement conscient [149]. Par conséquent, ce qui précède gagne à être enrichi en distinguant plusieurs composantes et leurs interrelations.

On peut à juste titre se demander si le message de rapports tels que celui de Dasgupta (2021) trouve un écho dans les orientations politiques concrètes. Sans être aussi précise que ce rapport, l'ambition initiale du « Pacte vert pour l'Europe » (le "*European Green Deal*") exprimait un projet qui se rapproche de la perspective de Dasgupta (2021). La communication de la Commission européenne en 2019, dont un extrait est reproduit dans l'encadré 2, proclamait en effet que « la croissance économique sera dissociée de l'utilisation des ressources », d'où le nom de « croissance verte ». Cette formulation était bien plus large que la seule annulation des émissions nettes de GES. Elle a aussi suscité une vive controverse. Le degré de réalisme d'un processus de « croissance verte » demeure en effet âprement débattu [150].

8.2 Transition environnementale : la perspective étroite de la décarbonation

La notion plus étroite de transition environnementale s'exprime seulement en termes d'une partie des rejets notés ci-dessus Y/α_Z. Il y a un très large consensus sur l'urgence d'une importante réduction des émissions de GES à l'échelle de notre planète (cfr. l'accord de Paris en 2015) [151]. La transition environnementale est ici comprise comme le changement requis pour réduire ces émissions afin de limiter le réchauffement atmosphérique en-dessous de 1,5 ou de 2 degrés Celsius (en comparaison avec le niveau des tempéra-

149. "Thus, the biosphere's yield in a period of time is not a single number, but the yields of a myriad of goods and services" (Dasgupta, 2021, p. 113). Voir aussi la section 4.7 de ce rapport. A ce propos, on consultera aussi Richardson et al. (2023).

150. Voir par exemple OECD (2011), Espen Stoknesa et Rockström (2018), Parrique et al. (2019), Mastinia et al. (2021), Stern et Stiglitz (2023), OECD et UNDP (2025) et Kallis et al. (2025).

151. Un suivi des engagements concrets des nations est possible via le site `https://www.climatewatchdata.org/net-zero-tracker`.

tures de l'ère pré-industrielle) conformément à l'Accord de Paris (COP21) en 2015. Comme ces GES sont dans une large mesure la conséquence de l'usage massif de ressources naturelles carbonées, la transition ainsi comprise est aussi appelée la **décarbonation** de nos économies [152]. La transition comprise comme décarbonation est dans une bonne mesure une transition énergétique. Mais elle ne se réduit pas à cela car les émissions et absorptions de GES sont aussi liées à la gestion des sols, à la composition de l'alimentation, etc.

Une large part des travaux scientifiques résumés par la suite sera centrée sur les modalités de la décarbonation et sur leurs effets sur des indicateurs du marché du travail. Il n'y a en revanche actuellement guère de littérature reliant explicitement la perspective englobante de la section 8.1 au fonctionnement du marché du travail.

152. Ce terme qui se réfère à la diminution drastique des émissions de CO_2 puis à l'annulation des émissions nettes, ne doit pas faire perdre de vue que l'éventail des gaz à effet de serre est plus vaste (incluant par exemple aussi le méthane).

Encadré 2 *Le pacte vert pour l'Europe ("European Green Deal") et la loi européenne climat*
Ce pacte décrit l'ambition européenne de concilier la croissance économique avec le "verdissement" de l'économie. On parle de "Green growth".

> *« La présente communication propose un pacte vert pour l'Europe à l'Union européenne (UE) et à ses citoyens. (...)*
> *Le pacte vert pour l'Europe (...) vise à transformer l'UE en une société juste et prospère, dotée d'une économie moderne, efficace dans l'utilisation des ressources et compétitive, caractérisée par l'absence d'émission nette de gaz à effet de serre d'ici 2050 et dans laquelle la croissance économique sera dissociée de l'utilisation des ressources.*
> *Cette stratégie vise aussi à protéger, préserver et consolider le patrimoine naturel de l'UE, ainsi qu'à protéger la santé et le bien-être des citoyens des risques et incidences liés à l'environnement. Dans le même temps, cette transition doit être juste et inclusive. »*

Source : Communication de la commission au parlement européen, au conseil européen, au conseil, au comité économique social européen et au comité des régions : "Le pacte vert pour l'Europe", Document COM(2019) 640 final daté du 11 décembre 2019.
La loi européenne climat adoptée en juin 2021 inscrit dans le droit européen l'objectif contraignant d'atteindre la neutralité climatique d'ici 2050 (c'est à dire, zéro émission nette de gaz à effet de serre en 2050). Pour y parvenir, elle fixe un objectif pour 2030 visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 55% par rapport à 1990. Depuis, une foule de changements sont intervenus. En réaction au bouleversement des marchés énergétiques suite au conflit entre la Russie et l'Ukraine, l'Union européenne a développé un plan de redéploiement appelé REPowerEU. En réponse aux politiques de subventions publiques de grands pays, comme les États-Unis et la Chine, l'Union européenne a promulgué le "Green Deal Industrial Plan". L'Hotellerie-Fallois et al. (2024) décrivent plus complètement la politique européenne menée en ces matières au cours des années 2019 à 2024. En 2025, dans la foulée du rapport Draghi (2024), la Commission européenne a lancé la boussole pour la compétitivité (the "Competitiveness compass") qui s'est notamment concrétisée dans les lois de simplification dites Omnibus (https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_25_614), votées par le parlement européen en novembre 2025. Au même moment, le conseil européen s'est mis d'accord sur un amendement de loi européenne climat (https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/11/05/2040-climate-target-council-agrees-its-position-on-a-90-emissions-reduction/). Selon certains, ces évolutions récentes écornent le projet initial du Green Deal, ce que la Commission européenne réfute.

Chapitre 9

Prix énergétiques, emploi et rémunérations : analyses empiriques

L'excès d'accumulation de GES trouve son origine dans le mode de développement des pays occidentaux au cours des derniers siècles. Ce mode de développement, glouton en énergie fossile carbonée et, de manière générale, en matières premières, a depuis été répliqué ou adapté dans bien d'autres parties du monde. La réponse au réchauffement climatique induit par l'accumulation de GES requiert une réduction de la consommation d'énergies fossiles. Une hausse volontariste du prix de celles-ci est dès lors nécessaire (sans pour autant être suffisante [153]). Au-delà d'une hausse de prix liée à la raréfaction des réserves énergétiques ou à d'autres phénomènes [154], il s'agit *notamment* de recourir à une taxe carbone ou à un système d'échange de quotas d'émissions s'appliquant sans exception à toutes les énergies fossiles carbonées et d'accompagner cela de mesures de soutien à certains groupes sociaux en raison des effets d'une telle mesure sur la redistribution des revenus et la pauvreté. Les impacts d'une taxation du carbone seront abordés au chapitre 10 qui est consacré aux analyses empiriques. Ces impacts seront aussi évoqués au chapitre 11, où les informations collectées proviendront cette fois de simulations de modèles macro-économiques.

Le cours des énergies fossiles fluctue abondamment. Ceci complique bien évidemment les décisions d'investissement. La forte hausse des prix de ces énergies en 2021 et 2022 a été (inutilement) brutale. Elle a été induite par des facteurs bien spécifiques (vive reprise économique après la pandémie des années 2020 et 2021, suivie, en 2022, par le début la guerre en Ukraine). Pour réaliser la nécessaire réduction pérenne de la consommation d'énergies carbonées, une hausse plus raisonnable mais durable du prix des énergies fossiles est nécessaire.

153. Voir le chapitre 10.
154. Tensions géo-politiques, décisions du cartel des producteurs de pétrole, etc.

Or, cette recommandation se heurte à deux types d'obstacles : d'une part, l'effet direct d'une hausse de prix des énergies réduit relativement plus le pouvoir d'achat des ménages au bas de la distribution des revenus ; d'autre part, il y a la crainte d'une baisse de l'emploi. Les hausses de prix des énergies affectent généralement plus durement certains ménages. En 2018, la hausse des droits d'accise sur les carburants (qui incluaient une taxe sur le carbone) a été à l'origine d'un large mouvement de contestation en France (le mouvement dit des "gilets jaunes"). De manière plus générale, l'impact direct des hausses de prix des énergies se marque davantage au bas de la redistribution des revenus [155]. Il entraîne aussi une augmentation des indicateurs standards de pauvreté. Fulvimari et al. (2023) développent ces thèmes au niveau des pays de l'Union européenne [156]. Il s'agit de calculs *à comportements inchangés*. Ils ont évidemment leur intérêt mais il importe d'aller plus loin et d'étendre l'analyse aux changements de comportement. Pour cela, il faut notamment étudier les changements de choix de consommation (aspect qui n'est pas abordé ici [157]) et mesurer l'impact sur l'emploi. Or, l'impact défavorable sur l'emploi de politiques publiques relevant le coût des énergies fossiles est un second obstacle mis en avant pour postposer une politique volontariste (voir Vona, 2019 et Hafstead et Williams III, 2020, par exemple). Cet impact défavorable est-il avéré ? Si l'impact sur l'emploi était faible, y aurait-il néanmoins des effets négatifs plus nets sur certains types de travailleurs ou de métiers ? Le survol de la littérature qui suit apporte des éléments de réponse à ces questions.

La théorie économique a de longue daté étudié la situation d'une firme privée maximisant son profit sous une contrainte technologique [158] et dans un environnement concurrentiel donnés. L'état de la technologie résume les combinaisons de facteurs de production (travail, énergie, capital, etc.) requises pour produire un certain volume de biens ou de services. L'encadré d'approfondissement 3 est une brève introduction à cette théorie. Il explique les paramètres qui déterminent la réponse de la demande de travail aux variations de prix de l'énergie. Cet encadré résume aussi les conclusions de quelques études économétriques visant à estimer certains de ces paramètres. L'élasticité inconditionnelle de la demande de travail par rapport au prix de l'énergie, η_E^L, c'est-à-dire la variation relative de la quantité de main d'oeuvre demandée par unité de variation relative du prix de l'énergie, serait selon ces études inférieure à 1 dans l'industrie. Pour savoir si cette élasticité est positive ou négative et connaître son ampleur dans un éventail de secteurs, nous allons

155. Voir cependant Pallotti et al. (2023) pour qui domine une différenciation de l'effet selon l'âge en Allemagne, en Espagne, en France et en Italie.

156. Des études similaires existent au niveau des pays individuels. Voir, par exemple, Clavères (2022) en France et Capéau et al. (2022) en Belgique.

157. Voir, par exemple, Känzig (2025). En présence d'un changement de prix relatif, les économistes étudient l'impact sur le bien-être des individus concernés en mesurant la compensation financière qui les laisse indifférents entre leur consommation après cette hausse et une situation de référence (à propos de cette notion d'indifférence, voir par exemple, la section 14.8 de Varian, 2010).

158. Le chapitre 12 reviendra sur la représentation de cette contrainte lorsqu'on prend pleinement la mesure de l'encastrement de l'économie dans la biosphère.

à présent résumer une littérature empirique qui, contrairement à celle de l'encadré 3, ne s'appuie pas sur une spécification précise de la contrainte technologique [159].

Avant d'aller plus loin, rappelons que la demande de travail, c'est à dire la relation mathématique entre le volume de travail souhaité par les entreprises et ses déterminants, ne s'observe pas. L'emploi, c'est à dire la demande de travail satisfaite en un point du temps est en revanche mesuré. Des enquêtes informent aussi du nombre d'emplois vacants à un moment donné. Lorsqu'on passe de la demande de travail [160] à l'emploi, il faut toujours se rappeler que ce dernier est généralement influencé non seulement par la demande de travail, mais aussi par la quantité de travail offerte par la population et par le salaire.

9.1 Préoccupations méthodologiques

Ici, comme au chapitre 10, les analyses empiriques exploitent souvent des données d'établissement ou d'entreprise ou des données collectées au niveau du secteur d'activité ou d'une région. Mettre en évidence un lien de cause à effet entre le prix des énergies et l'emploi est un réel défi. Souvent, toutes les unités d'observation sont à des degrés divers touchées ("traitées") par les variations des prix des énergies. L'identification de l'impact s'appuie alors sur des différences d'intensité de ces variations. Dans certains cas, il est toutefois possible d'observer des unités de production non affectées par les variations de prix. Les conditions d'identification d'un lien de causalité ont alors plus de chances d'être transparentes dans la mesure où ces unités non traitées offrent en principe la possibilité de construire un contrefactuel crédible pour les unités traitées. Toutefois, lorsque les unités traitées et non traitées sont en concurrence sur les mêmes marchés, la possibilité même d'être une unité non traitée peut être mise en doute (voir, par exemple, Barrows et al., 2023). En effet, une variation notable de prix des énergies entraine un changement de coût parmi les entreprises concernées. Le changement induit de leur offre de biens et services produits ou de leurs prix de vente peut avoir des répercussions sur les unités "non traitées" situées sur les mêmes marchés. Lorsqu'il en va ainsi, d'autres approches empiriques que celles évoquées ci-dessous peuvent être élaborées (voir Barrows et al., 2023, et les références citées par cet article). Plus généralement, les estimations qui résultent d'une comparaison appropriée entre unités d'observation "traitées" et "non traitées" ne captent pas les impacts potentiels qui découlent de l'effet des hausses de prix des énergies sur les autres prix au sein de l'économie (dont les salaires). En effet, ces impacts potentiels induits se neutralisent lorsqu'ils affectent les unités "traitées" et "non traitées" dans la même mesure. En vue de prendre en compte tous les effets, certains travaux économétriques se placent au niveau macroéconomique (voir par exemple les études de Baumeister et Hamilton, 2019, et de

159. Autrement dit, il s'agit d'analyses économétriques n'imposant pas la structure de relations mathématiques découlant d'une théorie économique particulière (la théorie de la demande de facteurs de production).
160. Qui est l'objet de l'encadré 3 et plus particulièrement de la formule (9.1).

Känzig, 2021, relatifs au PIB). L'identification d'un lien de causalité à ce niveau est un défi particulièrement délicat. Une alternative consiste à bâtir un modèle mathématique de l'économie dont les paramètres doivent recevoir une valeur crédible avant de pouvoir simuler ce modèle dans divers scénarios. Le chapitre 11 couvrira cette approche et le chapitre 12 en indiquera les limites.

Lors du travail empirique, de nombreux autres facteurs, observables ou non, influencent à la fois le niveau de l'emploi et celui des prix énergétiques. Par exemple, ces prix peuvent varier en fonction de la situation socio-économique (les fluctuations cycliques, une pandémie, un désastre environnemental) ou de la quantité d'énergie consommée par l'unité de production objet de l'analyse. Il importe que ces autres facteurs marquent de manière identique l'évolution des unités de production traitées et celle des non traitées. Si ce n'est pas le cas, une correction appropriée doit être prévue afin d'éviter des biais d'estimation. Les effets d'anticipation sont une autre source de difficulté. Si la modification des prix énergétiques est pleinement anticipée par les agents économiques, tous ses effets devraient s'observer avant la modification elle-même. Le plus souvent, l'anticipation est partielle. Seule la partie non anticipée du changement de prix est alors susceptible d'engendrer des effets postérieurs. Or, les études résumées ci-dessous se préoccupent rarement de ce phénomène d'anticipation.

Comme indiqué en commençant, tout ce qui vient d'être dit à propos des prix énergétiques s'applique aussi dans le cas d'une taxation du carbone.

Le survol de la littérature se fera en trois étapes caractérisées par l'unité d'observation : d'abord l'établissement ou l'entreprise, ensuite la région (ou le secteur au niveau régional), enfin le secteur au niveau des nations.

Encadré 3 *La demande de travail : théorie et estimation.*
L'analyse de la demande microéconomique de facteurs de production représente une firme privée qui maximise son profit sous une contrainte technologique représentée par une fonction de production. Cet outil théorique fournit une prédiction de la réponse des entreprises à de petites variations du coût de ces facteurs (voir par exemple Cahuc et al., 2014). Considérons un processus de production requérant le capital, le travail (en quantité L), l'énergie (en quantité E) et les autres inputs intermédiaires. Limitons-nous aux fonctions de production homogènes (de degré θ)[a]. On démontre que l'élasticité inconditionnelle de la demande de travail par rapport au prix de l'énergie, η_E^L, c'est-à-dire la variation relative de L par unité de variation relative du prix de l'énergie, vérifie la condition suivante (Cahuc et al., 2014, p. 101) :

$$\eta_E^L = s^E \left(\sigma_E^L - \frac{\nu}{\nu - \theta} \right), \quad \sigma_E^L \lessgtr 0, \quad \nu > \theta \tag{9.1}$$

où $s^E > 0$ est la part du coût de l'énergie dans le coût total, σ_E^L est l'élasticité de la demande de travail par rapport au prix de l'énergie conditionnelle au volume d'activité et ν est le coefficient de mark-up de la firme (c'est-à-dire, le rapport entre son prix de vente et son coût marginal). Selon la formule (9.1), l'effet du prix de l'énergie sur la demande de travail est, en valeur absolue, d'autant plus fort que la part s^E est grande. Si L et E sont des substituts, le signe de η_E^L dépend de l'ampleur de l'effet positif de substitution σ_E^L comparée à celle, négative, de "l'effet volume" $-\frac{\nu}{\nu-\theta}$ (c'est-à-dire l'impact du prix de l'énergie sur le volume de production). Notons que plus le pouvoir de marché de la firme, résumé par le paramètre ν, est grand, moins l'effet volume sera négatif. Enfin, une condition suffisante pour que l'énergie et le travail soient des "compléments bruts", c'est-à-dire pour que η_E^L soit < 0, est que σ_E^L soit < 1 puisque $(\nu/(\nu-\theta)) > 1$).
Aux effets microéconomiques mesurés par la formule (9.1) s'ajoute l'impact possible de changements de prix de l'énergie sur la disparition d'entreprises et sur la création d'entreprises.
Certains travaux économétriques fournissent explicitement de l'information sur l'élasticité de substitution σ_E^L. Ils confirment que, dans l'industrie, l'énergie et le travail sont des compléments bruts (voir Bretschger et Jo, 2024, Cox et al., 2014, Dissou et al., 2015, et Haller et Hyland, 2014). Dans le cas de l'industrie chinoise, la question de savoir si le travail et l'énergie sont des substituts $\left(\sigma_E^L > 0\right)$ ou des compléments $\left(\sigma_E^L < 0\right)$ demeure ouverte (voir l'état de la question et l'évocation de la littérature antérieure par Wang et al., 2019). Signalons au passage que l'article de Haller et Hyland (2014) illustre la littérature qui s'est centrée sur le degré de substituabilité entre l'énergie et le capital.

a. Ceci signifie que si l'on multiplie toutes les quantités de facteurs par un coefficient $k > 0$ quelconque, le rapport entre le nouveau niveau de production et l'ancien vaut k^θ.

9.2 Exploitation de données d'établissement ou d'entreprise

Marin et Vona (2021) exploitent une enquête auprès d'un échantillon représentatif d'environ 13.000 établissements occupant au moins 20 travailleurs dans l'industrie manufacturière en France. Les informations relatives à l'emploi et aux rémunérations proviennent de sources administratives. La période d'observation s'étend de 1997 à 2015. Marin et Vona (2021) s'intéressent à l'évolution des prix de l'ensemble des énergies utilisées par ces unités de production. Douze catégories de sources énergétiques sont distinguées par cette étude. Le prix moyen de l'énergie déboursé par l'établissement i l'année t, noté p_{it}^E, n'est autre que la moyenne pondérée suivante :

$$p_{it}^E = \sum_{j=1}^{j=12} \phi_{it}^j p_{it}^j, \tag{9.2}$$

où p_{it}^j désignent le prix du produit énergétique j dans l'établissement i au temps t et ϕ_{it}^j est la part de chaque énergie j consommée par l'établissement i en t.

Marin et Vona (2021) estiment un grand nombre de spécifications. Il commencent par un ensemble de relations statiques (où donc le prix moyen courant p_{it}^E détermine les indicateurs de résultat au même temps t). L'encadré d'approfondissement 4 explicite la spécification retenue et la manière de prendre en compte le caractère potentiellement endogène du prix moyen des énergies p_{it}^E. Les auteurs estiment qu'une hausse de 10% du prix moyen de l'énergie payé par un établissement réduit en moyenne l'emploi de 0,8% (l'emploi étant mesuré en équivalents temps plein) [161]. Cette *élasticité* de -0,08 est statistiquement significative au seuil de 10% Les auteurs indiquent que la variation de prix moyen réel de l'énergie entre 2000 et 2015 (+56%) serait dès lors responsable d'une baisse totale de l'emploi s'élevant à 4,5% sur cette même période.

Quand la spécification de Marin et Vona (2021) devient dynamique, les prix énergétiques courants et retardés d'une et de deux périodes apparaissent parmi les variables explicatives [162]. L'élasticité estimée de court terme de l'emploi par rapport au prix moyen des énergies utilisées par l'établissement est proche de zéro et non significative (au plan statistique) et celle de long terme vaut - 0,12 et est significative au seuil de 10% [163].

Ensuite, les auteurs montrent que l'effet des prix énergétiques est hétérogène [164]. L'effet

161. Pour information, un ordre de grandeur de l'impact sur la consommation d'énergie (respectivement, les émissions de CO_2) est une diminution de 5% (respectivement, 11%).

162. C'est à dire dans le membre de droite de (9.3). L'exigence de données retardées pour le même établissement implique que le nombre d'observations chute de 40% par rapport au niveau de quasi 90.000 observations lorsque la spécification est statique. La composition de l'échantillon change également.

163. Cet élasticité est estimée par l'approche de variable instrumentale évoquée à l'encadré 4. Quand l'estimation du modèle statique (9.3) est réalisée sur le même échantillon que celui qui est disponible pour la spécification dynamique, une hausse de 10% du prix moyen de l'énergie payé par un établissement réduit en moyenne l'emploi de 0,5% et cet effet n'est plus statistiquement significatif.

164. A la spécification statique (9.3) de l'encadré 4, ils ajoutent quatre termes d'interaction entre le prix moyen

des prix de l'énergie sur l'emploi (respectivement, sur le salaire moyen) est *positif* (respectivement, *négatif*) et significatif (au seuil de 10%) dans le cas d'établissements de petite taille, faisant partie d'une entreprise ayant un seul établissement dans les secteurs les moins intensifs en énergie et non exposés aux commerce international. Si l'entreprise a plusieurs établissements, l'impact positif des prix de l'énergie sur l'emploi s'atténue et l'effet sur les salaires disparaît. Dans les établissements de grande taille, l'impact des prix de l'énergie est négatif sur l'emploi (l'élasticité valant - 0,12 et étant significative au seuil de 1%) et nul sur les salaires. Dans les établissements de secteurs plus intensifs en énergie, tant l'emploi que les salaires baissent avec le prix des énergies (effet significatif au seuil de 10%).

Disposant dans leurs données de quatre catégories socio-professionnelles [165], l'élasticité *de la part* des effectifs manuels peu qualifiés par rapport aux prix de l'énergie est estimée à -0.03 (effet significatif au seuil de 10%). Pour la part des techniciens, l'élasticité est positive (+0,01, significative au seuil de 10%). Aucun effet notable n'est détecté pour les deux autres groupes. Notons que la mesure de ces effets est assez sensible à la spécification retenue.

Marin et Vona (2021) ont aussi collecté un échantillon d'entreprises (ayant le cas échéant plusieurs établissements) [166]. A partir de ces données d'entreprises, Marin et Vona (2021) identifient un effet négatif, significatif mais modeste, des prix de l'énergie sur des indicateurs de productivité de l'entreprise et un effet positif à long-terme sur le ratio capital/travail. Exploitant le même instrument que Marin et Vona (2021) et s'intéressant à l'industrie manufacturière française mais à partir d'une source de données d'entreprises différentes [167], Bretschger et Jo (2024) suivent environ 11.000 entreprises entre 1994 et 2015. Ils estiment une élasticité inconditionnelle des effectifs en emploi par rapport au coût de l'énergie voisine de - 0,14 (effet statistiquement significatif au seuil de 5%). Cet effet est largement imputable aux entreprises dont l'élasticité de substitution entre le travail et l'énergie est faible.

de l'énergie de l'établissement et une variable le caractérisant : la première est une variable binaire indiquant si en début de période l'établissement compte plus de 100 équivalents temps plein, la deuxième, binaire elle aussi, indique si l'établissement appartient à une entreprise multi-établissements, la troisième, binaire également, renseigne si l'établissement appartient à un secteur exposé au commerce international, la quatrième mesure, en début de période d'observation, la part des dépenses énergétiques dans la valeur ajoutée au niveau du secteur d'appartenance de l'établissement.

165. Ces catégories sont : (1) les cadres, ingénieurs et chefs d'entreprise ; (2) les techniciens ; (3) les travailleurs manuels hautement qualifiés et (4) les travailleurs manuels peu qualifiés.

166. Certaines caractéristiques comme le stock de capital ne sont disponibles qu'au niveau de l'entreprise.

167. Occupant elles aussi au moins 20 travailleurs.

Encadré 4 *Complément d'information sur l'analyse de Marin et Vona (2021) :*
Leur spécification de base se présente schématiquement ainsi :

$$\ln(y_{it}) = \alpha_i + \beta \ln\left(p^E_{it}\right) + \rho \ln\left(w_{it}\right) + X'_{it}\gamma + \varepsilon_{it}, \qquad où \tag{9.3}$$

- y_{it} *est l'indicateur de résultat au sein de l'établissement* i*, l'année* t *: l'emploi (mesuré en équivalents temps plein), la quantité de* CO_2 *émises, etc. ;*
- α_i *est un effet fixe d'établissement (ce qui requiert de ne conserver que les établissements présents au moins deux années dans l'enquête) ;*
- w_{it} *désigne le salaire moyen payé par l'établissement ;*
- X_{it} *contient des variables de contrôle : des facteurs temporels spécifiques au secteur (au niveau NACE à 2 chiffres) et d'autres spécifiques à la région (au niveau NUTS-2), et davantage de variables ou non selon les spécifications ;*
- ε_{it} *est le terme d'erreur captant l'effet de variables inobservées sur* y_{it}*.*

Le paramètre d'intérêt, β*, est une mesure de l'élasticité inconditionnelle* η^L_E *de la formule (9.1). Vu que les parts* ϕ^j_{it} *de l'expression (9.2) sont potentiellement elles-mêmes affectées par les changements de prix des énergies et comme des modifications de quantités d'énergie consommées peuvent modifier le prix unitaire* p^j_{it}*, les auteurs proposent un instrument pour la variable* p^E_{it} [a]*. Cet instrument pour l'établissement* i *et la période* t *est défini ainsi :*

$$p^{IV}_{it} = \sum_{j=1}^{j=12} \phi^j_{i,t=t_0} p^j_t \tag{9.4}$$

où t_0 *précède le début de la période d'observation et* p^j_t *est le prix national moyen de l'énergie* j *de l'année* t [b]*. Comme le salaire moyen est aussi potentiellement endogène, les auteurs conçoivent un instrument pour le salaire selon les principes décrits à l'instant.*
Lorsque les auteurs s'intéressent à l'emploi et recourent à l'instrument (9.4), l'effet estimé apparaît assez stable (pour l'éventail de variables de contrôle X considéré).

a. Des caractéristiques inobservées captant l'efficacité de la production et de la gestion de l'établissement devraient être corrélées négativement avec son niveau d'emploi (à output donné) et avec le prix auquel il achète son énergie. Par conséquent, on s'attend à ce qu'une estimation par moindres carrés ordinaire de l'effet du prix des énergies sur l'emploi présente un biais positif. Autrement dit, si l'effet vrai des prix de l'énergie sur l'emploi est négatif, cet impact apparaîtrait moins négatif si l'on recourt aux moindres carrés ordinaires.

b. Il s'agit d'un instrument dit "shift-share" (introduit par Bartik, 1991). Les auteurs apportent différents arguments pour justifier le bien-fondé du choix de cet instrument. Ils suivent en particulier les recommandations de Goldsmith-Pinkham et al. (2020).

Dussaux (2020) étudie d'abord les effets des prix de l'énergie à l'aide d'un échantillon d'environ 8.000 entreprises représentatives du secteur manufacturier français limité aux

entreprises de plus de 20 salariés. Cette étude couvre la période allant de 2001 à 2016. L'emploi mesure ici le nombre de travailleurs. Utilisant le même type de spécification [168] et d'instrument [169] que Marin et Vona (2021), Dussaux (2020) conclut, lui aussi, que la réaction des entreprises varie selon leur taille. Une hausse de 10% du coût des énergies ne modifie pas le niveau de l'emploi dans les petites entreprises (de 20 à 50 travailleurs en début de période d'estimation). Entre 50 et 250 travailleurs, la même hausse engendre une baisse des effectifs en emploi de 2,6%. Au-delà, de 250, la chute de l'emploi est plus prononcée (-5,5%). Tous ces effets sont statistiquement significatifs et sont obtenus à partir d'observations d'entreprises présentes dans l'échantillon [170]. Quand une équation telle que (9.3) est estimée séparément par secteur de l'industrie manufacturière, l'effet [171] d'une hausse de coût de l'énergie sur l'emploi est négatif dans la plupart des branches d'activité mais il est souvent entouré d'un intervalle de confiance assez large [172].

Bijnens et al. (2021, 2026) étudient l'impact net des prix de l'électricité dans l'industrie manufacturière européenne [173]. Ils exploitent des données individuelles annuelles d'environ 200.000 entreprises dans six pays de l'Europe de l'ouest au cours de la période 2009–2017 (respectivement 2008–2020) [174]. Tous secteurs et pays confondus, l'élasticité de l'emploi manufacturier au prix de l'électricité est négative et cette corrélation est statistiquement si-

168. Quelques différences sont néanmoins à noter : dans la relation (9.3), Dussaux (2020) n'introduit pas le prix courant des énergies utilisées mais le prix retardé d'une période ; dans une seconde spécification, l'auteur ajoute une interaction entre ce prix et deux variables indicatrices (dummies) : l'une indique si au début de la période d'observation l'entreprise employait moins de 50 travailleurs, l'autre fait de même au-delà de 250 travailleurs.

169. Se référant à (9.4), le prix de l'énergie p_t^j n'est pas, chez Dussaux, un prix moyen national mais le prix médian dans le secteur où l'entreprise est active durant l'année t.

170. Comme l'écrit l'auteur dans sa note de bas de page 55, il se peut qu'une proportion de petites entreprises ferment leur portes en raison de hausse de coût des énergies. Cela, l'analyse n'est pas en mesure de le capter.

171. L'effet est obtenu par moindre carrés ordinaires. L'instrument choisi par Dussaux pour l'analyse au niveau des entreprises, que la note de bas de page 169 a sommairement défini, ne peut en effet être utilisé au niveau sectoriel. Le biais attendu de l'estimation par moindres carrés ordinaires a été expliqué à la note de bas de page *a* de l'encadré d'approfondissement 4.

172. Cet effet n'est négatif et significativement différent de zéro que dans la fabrication de produits en caoutchouc et en plastique, la métallurgie, la fabrication d'autres produits minéraux non métalliques, la fabrication de produits métalliques et les industries alimentaires.

173. L'impact net combine l'effet de substitution (l'électricité étant utilisée par les équipements productifs, l'usage du capital devient relativement plus coûteux que le recours au travail) et l'effet volume (observé lorsque la hausse du prix de l'électricité accroît les coûts de production et entraîne *in fine* une baisse du niveau d'activité de l'entreprise).

174. La Belgique, la France, l'Allemagne, l'Italie, les Pays-Bas et le Royaume-Uni. Le logarithme de l'emploi est expliqué par un effet fixe d'entreprise, le logarithme du prix de l'électricité, celui du coût salarial par travailleur et un ensemble de variables de contrôle variant d'une spécification à l'autre, mais incluant notamment une interaction entre le pays et le temps et une autre entre le secteur d'activité et le temps. Notons que le prix de l'électricité de l'entreprise n'est pas observé mais imputé à partir de données publiées croisant le secteur et le volume consommé. Les auteurs reconnaissent que ceci peut générer des erreurs de mesure. La spécification n'inclut pas le prix des autres énergies.

gnificative : selon les spécifications, à une hausse de 10% du prix de l'électricité serait associée une baisse de l'emploi de 0,2 à 0,5% (Bijnens et al., 2026). Cette élasticité varie toutefois fortement d'un secteur à l'autre. Elle est négative et statistiquement significative dans certains secteurs (métaux, papier, informatique, alimentation et boissons, ...) ; dans d'autres secteurs (y compris certains qui utilisent intensivement l'énergie électrique) cette élasticité est non significative et parfois positive [175]. Notons que ces résultats sont obtenus à l'aide d'estimations par moindres carrés ordinaires : un biais d'endogénéité n'est donc pas exclu [176]. Lorsque la spécification devient dynamique [177], Bijnens et al. (2026) obtiennent qu'une hausse de 10% du prix de l'électricité s'accompagnerait à long terme d'une baisse de l'emploi d'environ 0,5% parmi les entreprises d'une liste de secteurs [178]. Enfin, les corrélations entre l'emploi et les prix de l'électricité sont plus négatives lorsque les auteurs introduisent des variables explicatives supplémentaires sensées capter la présence de contraintes financières plus strictes.

Considérant sur la période 2003-2007 l'industrie manufacturière allemande finement désagrégée, Cox et al. (2014) concluent que la sensibilité de l'emploi aux prix de l'électricité est plus forte parmi les travailleurs peu et hautement diplômés que parmi les travailleurs de niveau intermédiaire [179].

Bossler et al. (2023) s'intéressent à l'impact du prix du gaz sur l'emploi (mesuré en équivalents temps plein) dans l'industrie manufacturière allemande. Le prix du gaz n'étant pas observé au niveau de l'établissement, les auteurs exploitent des statistiques annuelles moyennes d'Eurostat ventilées selon le volume de gaz consommé. Ils exploitent des données d'établissements sur la période 2012-2020. Outre le prix du gaz [180], la spécification statique comprend un effet fixe d'établissement, des effets temporels, le prix de l'électricité et les salaires. L'élasticité inconditionnelle de l'emploi au prix du gaz s'élève à - 0,02 [181]. A cet effet obtenu à partir d'établissements existants, les auteurs ajoutent que la hausse du

175. Les effets régionaux de hausses de prix de l'électricité découleraient dès lors de la composition sectorielle de leurs économies.

176. Les méthodes utilisées pour corriger ces biais se révèlent infructueuses ou elles conduisent à des élasticités peu crédibles dans le cas du coût du travail.

177. L'emploi de la période précédente fait alors partie des variables explicatives.

178. Fabrications de boissons et de produits à base de tabac, industrie du papier et du carton, chimie, industrie du plastique, métalurgie, fabrications métalliques, fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques, fabrication de machines et d'équipements, fabrication d'autres matériels de transport, autres industries manufacturières, réparation et installation de machines et d'équipements.

179. Où ce niveau intermédiaire est caractérisé de la manière suivante : « medium-skilled individuals have obtained an upper secondary school certificate ("Abitur" or "Fachabitur") or finished vocational training, or both » (p. 270). Les peu scolarisés n'ont aucun de ces deux types de formation. Les hautement scolarisés ont un diplôme de l'enseignement universitaire ou assimilé.

180. Basé sur le niveau de consommation de gaz de l'établissement en 2005.

181. Confrontés aux mêmes difficultés de mesure, Bijnens et al. (2026), qui exploitent des observations d'entreprises (de pays européens indiqués à la note de bas de page 174), estiment que cette élasticité est voisine de - 0,14 parmi les secteurs les plus intensifs en énergie.

prix du gaz entraine aussi une augmentation du risque de fermeture. Ils estiment également que la moitié de la hausse du coût du gaz est payée par les travailleurs sous la forme d'une croissance moindre des salaires. Sur base de ces effets moyens, les auteurs concluent qu'une hausse de 125% du prix du gaz (observée entre 2021 et 2022) réduirait l'emploi manufacturier allemand d'environ 100.000 unités (soit une baisse d'1,6%).

9.3 Exploitation de données régionales

Exemple d'une analyse au niveau régional, Deschenes (2012) s'intéresse à la relation entre la variation annuelle du prix (réel) de l'électricité et l'emploi (en équivalent temps plein) entre 1976 et 2007 aux États-Unis. Son unité d'observation est l'État. Cette étude couvre donc tous les secteurs économiques. Cette analyse porte sur les ajustements de court-terme seulement. L'auteur conclut : "The main finding is that employment rates are negatively related to real electricity prices and that the relationship is relatively weak. The crosselasticity of full-time equivalent (FTE) employment with respect to electricity prices ranges from –0.10 to –0.16 (...)."

Au niveau régional toujours, les prix de l'énergie peuvent aussi influencer la localisation géographique des activités économiques intensives en énergie. Cette affirmation s'étend au plan international. Kahn et Mansur (2013) s'intéressent en particulier au rôle joué par les différences régionales de prix de l'électricité au sein des États-Unis sur l'emploi local dans les entreprises manufacturières. Leur étude couvre la période 1998-2009. Comparant des comtés adjacents aux tarifs électriques différents, ils arrivent à la conclusion que la sensibilité de l'emploi industriel au prix de l'électricité varie beaucoup selon la nature de l'activité économique. Si l'emploi d'une entreprise type de la manufacture est selon Kahn et Mansur (2013) peu sensible au prix de l'électricité, cette sensibilité est très forte dans le cas des secteurs utilisant le plus intensivement cette énergie [182].

Au niveau régional de sept pays européens [183], Çürük et al. (2025) s'intéressent à l'effet de court terme du prix des énergies sur l'emploi selon le genre. Ils concluent : "We document small negative employment effects of energy prices and provide evidence on gender heterogeneity in these effects, with women being affected more severely than men. A doubling of the energy price is estimated to increase the gap in employment rates between men and women by 5 percentage points" (p. 11).

182. "We find the largest negative effects of electricity prices on the most electricity-intensive industry, primary metals, has an implied price elasticity of employment of -1.65". (Kahn et Mansur, 2013, p. 109). Ceci est conforme à la prédiction de l'encadré 3 relative à la part du coût de l'énergie notée s^E.

183. Soixante-quatre régions au niveau NUTS-2 au sein de la Belgique, la République tchèque, le Danemark, l'Italie, la Hongrie, la Finlande et la Norvège.

9.4 Exploitation de données sectorielles

Evoquons enfin trois études où l'unité d'observation est le secteur au niveau national. Couvrant un panel de 14 pays européens [184], Marin et Vona (2019) étudient 15 secteurs industriels sur la période 1995-2011 [185]. Les données d'emploi sont issues de l'enquête sur les forces de travail. Transposant la formule (9.2), les prix énergétiques sont une moyenne pondérée des prix des différentes sources énergétiques utilisées par un secteur au sein d'un pays. L'instrument pour le prix des énergies est le même que dans Marin et Vona (2021) évoqué plus haut (par transposition de la formule (9.4)). Comme des facteurs de changement autres que les prix des énergies ont aussi marqué les pays et leurs secteurs, les régressions prennent notamment en compte l'intensité capitalistique (distinguant les technologies de l'information et de la communication des autres) et le degré d'ouverture au commerce international. Marin et Vona (2019) concluent que le prix des énergies a eu un effet faible et non significatif sur l'emploi en Europe [186]. Marin et Vona (2019) indiquent à ce propos que, sur base de quelques études disponibles, "the competitiveness and employment impacts of environmental policies are larger in micro- than in macro-studies" (p. 14). Les analyses basées sur des données micro-économiques présentent des avantages [187] mais elles ne peuvent prendre en compte un ensemble d'ajustements : les travailleurs perdant leur emploi se réorientent vers d'autres entreprises en expansion (car elles sont plus performantes ou moins affectées par les hausses de prix des énergies) ; des activités de production et donc des emplois se relocalisent dans d'autres entités géographiques moins soumises à ces hausses ; les hausses de prix des énergies ont des effets induits sur les prix d'autres facteurs de production (par exemple une baisse des salaires, ce qui modifie la demande et l'offre de travail), etc. De tels ajustements sont à l'origine des différences notées dans la citation précédente [188].

L'effet sur l'emploi sectoriel est cependant hétérogène. Marin et Vona (2019) concluent qu'il est défavorable (respectivement, favorable) au travail manuel [189] (respectivement, les

184. A savoir, l'Autriche, la Belgique, la République Tchèque, l'Allemagne, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, la Hongrie, l'Irlande, l'Italie, les Pays-Bas, la Suède et le Royaume-Uni.

185. Treize secteurs de l'industrie manufacturière, le secteur des mines et des carrières et celui de la fourniture d'électricité, de gaz et d'eau. Le secteur de la construction n'est donc par exemple pas pris en considération.

186. Mentionnons ici un article assez surprenant par ses conclusions résolument positives, mais dont la capacité à identifier un lien causal pose question. Hille et Möbius (2019) exploitent un panel de 33 secteurs dans 27 pays de l'OCDE sur la période 1996-2009. L'impact des prix de l'énergie sur l'emploi (dont l'endogénéité est ici traité de manière fort simple) est non significatif quand l'étude se limite à l'industrie manufacturière. Dans quasi tous les pays, il devient *positif* quand l'emploi de l'ensemble de l'économie est considéré (voir par exemple la figure 1 à la p. 13 de l'article).

187. Les conditions sous lesquelles un lien de cause à effet sont identifiées sont souvent plus transparentes que dans les analyses sur des données plus agrégées.

188. Sur ce thème, on peut aussi consulter Smith (2015).

189. A savoir, le regroupement des catégories 7, 8 et 9 de la nomenclature ISCO, évoquée à l'encadré 5 concernant les sources statistiques.

professions scientifique ainsi que les techniciens [190]). Dans les termes des auteurs : "the skill bias of climate policies is aligned with that of globalization and automation : manual workers are the losers (...), while abstract professions are the winners (...)" (p. 14). Cet alignement des effets est préoccupant.

Dussaux (2020) développe une analyse au niveau des branches d'activité de l'industrie manufacturière française. L'emploi sectoriel varie notamment en raison de l'apparition et de la disparition d'entreprises. Dussaux (2020) s'intéresse notamment à la création brute et à la destruction brute d'emplois. Estimant une équation où sont présents des effets fixes de secteur et des variables indicatrices temporelles, Dussaux (2020) conclut à l'absence d'effet statistiquement significatif des prix énergétiques sur l'emploi, la création brute et la destruction brute d'emplois. Ceci cache cependant une réallocation :

1. Une réduction de l'emploi dans les entreprises grandes et moins efficientes sur le plan de leur usage des énergies ;
2. Une augmentation de l'emploi dans les entreprises efficientes (notamment via l'arrivée de nouvelles entreprises).

Enfin, Bijnens et al. (2022) mesurent l'impact des prix de l'électricité dans l'industrie manufacturière. Ils exploitent des données sectorielles annuelles dans 14 pays européens sur la période 2008-2016 [191]. Si l'on se limite aux résultats de leur spécification dynamique [192] incluant les prix d'autres énergies et une correction pour l'endogénéité des prix de l'électricité [193], une hausse de 10% du prix de l'électricité entraînerait à terme une baisse de l'emploi d'environ 0,6% au sein des secteurs utilisant très intensément cette énergie [194]. Dans les autres secteurs, l'effet estimé est petit, de signe variable, et n'est pas statistiquement significatif.

9.5 Résumé

Cette section s'est demandée si l'emploi est affecté négativement par les hausses historiques de prix de l'énergie. Le parcours de quelques études suggère que oui mais le niveau auquel on mène l'analyse importe. Au prix d'un processus d'identification souvent moins transparent, l'analyse menée à un niveau plus agrégé prend en compte un ensemble d'ajustements que l'analyse au niveau de l'établissement ou de l'entreprise ne peut généralement pas percevoir. En l'occurence, au niveau sectoriel, l'effet négatif estimé au niveau

190. A savoir, la catégorie 3 de la nomenclature CITP-ISCO introduite à l'encadré 5, appelée les « Professions intermédiaires ». Sous cette appellation, on retrouve notamment les techniciens du génie civile, de l'électricité, de la mécanique, de la chimie etc.

191. A savoir, l'Autriche, la Belgique, l'Allemagne, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Italie, les Pays-Bas, le Portugal, la Suède et le Royaume-Uni.

192. L'emploi de l'année précédente apparaissant parmi les variables explicatives.

193. Selon l'approche d'Arellano et Bond (1991).

194. Métallurgie, industrie du papier et du carton, cokéfaction et raffinage, et industrie chimique.

micro-économique de l'établissement ou de l'entreprise devient non significatif (sauf dans les secteurs intensifs en énergie dans le cas de l'électricité). A terme et dans l'industrie, une augmentation de 10% du prix des énergies réduirait l'emploi d'au plus 1 à 2% au niveau des établissements ou des entreprises et de 0 à 1% au niveau sectoriel. Il s'agit toutefois d'ordres de grandeur. Le chapitre 11 apportera un éclairage complémentaire, portant sur les effets macroéconomiques de réformes entraînant des hausses de prix des énergies.

L'impact des prix énergétiques sur l'emploi est hétérogène à plus d'un titre. Conformément aux prédictions de la théorie, il est fréquemment plus défavorable parmi les entreprises qui consomment plus intensivement de l'énergie. La conclusion répétée d'un effet négatif sur les travailleurs manuels moins qualifiés est une source de préoccupation dans la mesure où d'autres chocs (liés à l'automatisation des processus de production, au degré de pénétration du commerce international, etc.) touchent déjà davantage ce groupe de travailleurs. Or, ceux-ci se trouvent typiquement dans la partie inférieure de la distribution des revenus. L'effet négatif sur leur emploi vient donc renforcer l'impact direct des hausses de prix énergétiques mesurés à comportements inchangés. Par ailleurs, une étude relative aux effets du prix du gaz dans l'industrie allemande conclut à un effet plus défavorable parmi les femmes. Dans l'industrie française, la taille de l'entreprise est une autre source d'hétérogénéité de l'effet sur l'emploi : la baisse de l'emploi en réponse à une hausse de prix des énergies se marque uniquement au-delà d'un seuil (voisin d'une centaine de travailleurs). Enfin, quelques études mettent un évidence un effet négatif des prix énergétiques sur les rémunérations des travailleurs.

Encadré 5 *La nomenclature ISCO des professions.*
ISCO est l'abréviation de "International Standard Classification of Occupations". Au niveau le plus fin, une profession y est définie par quatre chiffres. Prenons un exemple qui décrit la gradation de 4 à 1 chiffres. Dans la version ISCO-08, la profession des conducteurs de machines pour la fabrication de produits en matières plastiques est identifiée par le numéro 8142. Elle appartient au groupe des conducteurs de machines pour la fabrication de produits en caoutchouc, en matières plastiques et en papeterie désigné par le numéro 814. Ce groupe appartient à la catégorie des conducteurs de machines et d'installations fixes (81) qui elle-même relève de la catégorie 8 des Conducteurs d'installations et de machines, et ouvriers de l'assemblage. Dans le langage courant, on parle souvent de classification à 1, 2, 3 ou 4 digits. La classification à 1 chiffre distingue neuf groupes de professions : (1) les membres de l'exécutif et des corps législatifs, cadres supérieurs de l'administration publique, dirigeants et cadres supérieurs d'entreprise ("managers" en Anglais) ; (2) les professions intellectuelles et scientifiques ("professionals") ; (3) les professions intermédiaires ("technicians and associate professionals") ; (4) les employés de type administratif ("clerical support workers") ; (5) le personnel des services et vendeurs de magasin et de marché ("service and sales workers") ; (6) les agriculteurs et ouvriers qualifiés de l'agriculture et de la pêche ("skilled agricultural, forestry and fishery workers") ; (7) les artisans et ouvriers des métiers de type artisanal ("craft and related trades workers") ; (8) les conducteurs d'installations et de machines et les ouvriers de l'assemblage ("plant and machine operators and assemblers") ; (9) les ouvriers et employés non qualifiés ("elementary occupations") ; (0) les forces armées ("armed forces occupations").
Pour plus de détail à propos de cette classification, on peut par exemple consulter https://esco.ec.europa.eu/en/about-esco/escopedia/escopedia/international-standard-classification-occupations-isco.

Chapitre 10

La taxation du carbone, l'emploi, le chômage et la distribution des revenus : analyses empiriques

Les politiques environnementales prennent la forme d'investissements publics, de directives ou de normes à respecter ("command-and-control policies" ou "non-market based policies") et de taxes ou de subventions ("market based policies")[195]. Ce chapitre aborde le second type d'intervention et fera la part belle à la taxation du carbone. Il commence par une brève discussion générale de la justification d'une taxe carbone, de sa mise en oeuvre actuelle et des mécanismes par lesquels elle impacte l'économie. Cette discussion générale se terminera pas une mise en garde méthodologique. Ce chapitre se poursuivra par la présentation d'évaluations économétriques exploitant d'abord des données micro-économiques et ensuite des données macro-économiques. Les indicateurs d'impact évoqués seront d'abord l'emploi, le chômage, les salaires et, plus tard, la distribution des revenus. Enfin, ce chapitre évoquera brièvement les effets de subventions au déploiement des énergies décarbonées. Dans ce chapitre, l'accent est mis sur des analyses purement empiriques. D'autres travaux exploitent des modèles mathématiques de l'économie afin de simuler les effets de la taxation du carbone. Cette taxation fera fréquemment partie des groupes de réformes étudiés à l'aide des modèles macroéconomiques évoqués à la section 11. Le chapitre 15 traitant de la réallocation des emplois et des travailleurs permettra aussi de revenir sur l'analyse des effets de la taxation du carbone mesurés à l'aide de tels modèles.

195. A propos de ces deux approches et des raisons de préférer l'une ou l'autre, voir par exemple Weitzman (1974). Le débat sur ces raisons demeure ouvert. A ce sujet, voir par exemple Goulder et al. (2016), Hafstead et Williams III (2018), Timilsina (2022), Stern et Stiglitz (2023), Castellanos et Heutel (2024) et Fredriksson (2025) ainsi que les références que ces auteurs citent.

Encadré 6 *Le coût social du carbone*

Les économistes calculent souvent ce coût en exploitant un "Integrated Assessment Model" ('IAM'). Cette modélisation comprend trois ingrédients (Golosov et al., 2014, Barrage et Nordhaus, 2024) :

1. *Un modèle qui décrit comment la température atmosphérique affecte l'économie et comment l'activité économique (découlant des choix optimaux des consommateurs et des entreprises) génère un flux d'émissions de GES. Une "fonction de dommage" (en Anglais, "damage function") exprime le premier effet (pour un aperçu, voir la section 2.1 de Henderson et al., 2024). Via cette fonction, seule une part de la production est indisponible pour la consommation, l'épargne et la réduction des émissions.*
2. *Un modèle expliquant comment le flux d'émission de GES évoqué au point précédent affecte l'accumulation (le stock) de GES dans l'atmosphère.*
3. *Un modèle climatique décrivant comment le climat évolue en fonction de l'accumulation de GES dans l'atmosphère.*

Toute une littérature s'est développée depuis le modèle très épuré de Nordhaus (1991). Hassler et al. (2016), Nordhaus (2019), Fisher-Vanden et Weyant (2020), Dietz (2024) et van der Ploeg et Rezai (2026) en fournissent une synthèse. De l'hétérogénéité sectorielle et spatiale a aussi été introduite.

Le niveau du coût social du carbone est sensible au choix du taux d'escompte (qui permet d'exprimer le sort des diverses générations occupant notre planète en une valeur présente) et à la prise en compte de l'incertitude (voir Groom et al., 2022, Gollier, 2024, Jensen et Traeger, 2024). Il est aussi sensible à la prise en compte des inégalités de revenus (Kornek et al., 2021, van der Ploeg et al., 2025).

Le message dominant de ce type de modélisation IAM a été, en très bref, que le coût social du carbone est modeste (voir Dietz et Stern, 2015, pour les raisons). Cette approche a eu une influence majeure parmi les économistes et sur le processus de décision dans certains pays. Mais, la communauté internationale n'a pas suivi cette recommandation : par l'Accord de Paris lors de la COP 21 en 2015, elle s'est fixée des objectifs en termes de hausse maximale des températures (ou de volume total d'émissions de GES encore permises avant d'atteindre la neutralité carbone).

Dietz et al. (2021b) et Folini et al. (2025) critiquent le modèle climatique des IAM. Bastien-Olvera et Moore (2022) soulignent l'absence du lien entre changement climatique et les services écosytémiques. Newman et Noy (2023), Bilal et Känzig (2024, 2025) remettent en question la manière de calculer la fonction de dommage. Les modèles IAM supposent souvent une évolution déterministe de la population, de la productivité, des relations entre le stock de GES et le climat, etc. Mais, l'incertitude à ce propos, qui est grande, peut être prise en compte (van den Bremer et van der Ploeg, 2021, Jensen et Traeger, 2024). Après Pindyck (2013, 2017), Stern et al. (2022) reprochent toutefois aux IAM leur incapacité à prendre un compte "l'incertitude radicale" ("deep uncertainty", où la distribution de probabilités n'est pas connue) et les dommages extrêmes (Weitzman, 2011, 2013). La pertinence de ces critiques est un objet de débat. Au sein de l'approche des IAM, Keller et al. (2004), Lemoine et Traeger (2014, 2016a, 2016b), Cai et al. (2016), Berger et al. (2017), Cai et Lontzek (2019), Dietz et al. (2021a), Fillon et al. (2023) et Olijslagers et al. (2023) intègrent les points de basculement climatique ("Climate tipping points") incertains dans le calcul du coût social du carbone.

10.1 La taxation du carbone est nécessaire, mais elle fait peur

Si les émissions de GES par de nombreux acteurs économiques étaient la source *unique* d'externalité [196] dans une économie mondiale "idéale", une taxation uniforme des GES appliquée partout, qui est un exemple de "taxe Pigouvienne", permettrait d'éliminer l'inefficience économique engendrée par l'externalité [197]. En effet, elle ferait en sorte que les effets externes des émissions de GES soient pris en compte par les acteurs économiques (on parler d'internalisation des externalités) [198]. La hausse des températures atmosphérique sont la conséquence de *l'accumulation* de GES. Le niveau de cette taxe Pigouvienne devrait alors être égal au "**coût social du carbone**" qui se définit comme la valeur intertemporelle monétaire escomptée de tous les dommages induits par l'émission supplémentaire d'une tonne supplémentaire de CO_{2eq} à une date donnée. L'encadré 6 est une introduction à la délicate mesure de ce coût social. L'expression "coût social (marginal) du carbone" résume donc la notion de "coût intertemporel d'une émission supplémentaire de GES pour la collectivité mondiale".

Le paragraphe précédent nécessite plusieurs commentaires. Par économie mondiale "idéale", on entend tout d'abord une économie mondiale sans imperfections ni incomplétudes de marchés [199]. Ces fréquentes imperfections et incomplétudes sont encore appelées "défaillances de marché" ("market failures"). Leur présence ou encore celle d'un éventail d'externalités complique le calcul de la taxe (du coût social du carbone) [200]. En raison des nombreuses défaillances de marché, la transition vers des émissions nettes nulles de GES nécessite en pratique un éventail de politiques bien choisies (Stern et al., 2022, Stern et Stiglitz, 2023, Blanchard et al., 2023, et van der Ploeg et Rezai, 2026, par exemple) [201]. *Une tarification du carbone fait toutefois partie de cet arsenal*. Enfin, la présence même d'une taxe et les adaptations de comportement qu'elle induit modifie la distribution des revenus. La direction de cette modification peut ou non apparaître souhaitable. Selon les instruments à la disposition du secteur public et la signification concrète attribuée au qualificatif souhai-

196. Notion définie à la note de bas de page 8.
197. La note de bas de page 9 rappelle comment comprendre la notion d'efficience économique.
198. Voir par exemple le chapitre 11 de Mas-Colell et al. (1995), les chapitres 8 et 26 de Hindriks et Myles (2013) ou encore la section 2 de Heutel et Kelleher (2024).
199. Le pouvoir de marché des entreprises est un exemple de source d'imperfection de marché, fréquemment observée. Les marchés du crédit et d'assurance sont par exemple incomplets en raison d'asymétries d'information entre emprunteurs et prêteurs.
200. Illustrons cela dans le cas de pouvoir de marché, puis d'incomplétude des marchés. Si la taxe carbone croit au fil du temps, le comportement stratégique des pays producteurs de pétrole est à prendre en compte lors du calcul de la taxe carbone (Jensen et al., 2015, Bogmans et al., 2024). Si l'agent économique doit emprunter pour mettre en oeuvre les mesures de réduction des GES et s'il n'est pas possible d'assurer les risques pesant sur sa capacité à rembourser, la capacité d'emprunt de cet agent est contrainte. Dans ce cas, la taxe optimale s'écarte de la formule Pigouvienne standard (Döttling et Rola-Janicka, 2025).
201. Dans un article devenu célèbre, Lipsey et Lancaster (1956) expliquent en effet qu'en présence de multiples obstacles à une allocation efficiente des ressources, lever un seul d'entre eux peut avoir des effets ambigus.

table, les recettes fiscales générées par la taxation peuvent être redistribuées de manière à corriger en tout ou en partie les modifications dans la distribution des revenus.

L'absence de consensus quant au niveau du coût social du carbone [202] a, en pratique, conduit à une approche alternative : la fixation d'une trajectoire de plafonds de volumes d'émissions de GES compatibles, selon les modèles climatiques, avec un réchauffement atmosphérique suffisamment limité [203]. Dans ce cas, un régulateur public fixe un nombre de permis d'émission (ou encore de quotas d'émissions) et une liste de critères définissant les secteurs émetteurs et le type d'installations de production concernées. Selon le cas, ces quotas seront distribués gratuitement ou mis aux enchères. La possibilité de vendre ou d'acheter ces quotas sur un marché détermine un prix des émissions de GES [204]. En 2023, il existait de par le monde 37 initiatives gouvernementales de plafonnement et d'échange de quotas d'émissions ("cap-and-trade") couvrant environ 18% des émissions mondiales de GES [205]. Un exemple majeur au niveau mondial est le Système Communautaire d'Echange de Quotas d'Emissions de gaz à effet de serre (SCEQE), brièvement décrit dans l'encadré 7. En novembre 2011, les autorités chinoises ont décidé que sept juridictions mettraient en oeuvre une expérience pilote de système d'échange de quotas d'émissions de GES [206]. Ces expériences chinoises ont concerné des entreprises de certains sous-secteurs industriels dont les émissions étaient suffisamment importantes. Chaque expérience pilote avait sa propre liste de secteurs concernés (Yu et Li, 2021). Goulder et al. (2022) décrivent le système national mis en place en Chine en 2021. Ce système diffère considérablement du système de plafonnement et d'échange de quotas d'émissions (cap-and-trade) employé ailleurs. Le système chinois se base en effet en particulier sur des normes maximales de *taux* d'émissions (volume d'émissions par volume d'output).

202. Voir Moore et al. (2024) et l'encadré 6.

203. Stavins (2022) et Döttling et Rola-Janicka (2025), notamment, comparent cette approche à la taxation du carbone.

204. Concernant l'Europe, Känzig (2025) précise p. 9 : "EU emission allowances (EUAs) are traded in several organized markets. Each EUA grants the right to emit one ton of CO2 equivalent. Key spot markets include Bluenext in Paris, EEX in Leipzig, and Nord Pool in Oslo. There are also well established futures markets for EUAs : the EEX in Leipzig and ICE in London."

205. `https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/coverage` et `https://icapcarbonaction.com/en/publications/emissions-trading-worldwide-2024-icap-status-report`. Cette part n'était que de 7% en 2013.

206. Ces sept juridictions sont Pékin, Tianjin, Shanghai, Chongqing, Hubei, Guangdong et Shenzhen. Le début de la mise en oeuvre se situe en 2013 sauf dans la municipalité de Chongqing où le démarrage a eu lieu en 2014. Dans la plupart des cas, les quotas furent alloués gratuitement (Wang et al., 2025). Qiang et al. (2025) confirment cela mais signalent qu'une allocation par enchère a été expérimentée à Shenzhen. Ces auteurs ajoutent que le prix de la tonne de CO_2 s'est situé entre 2 et 7$ sur la période 2013–2019. Une expérience pilote a aussi démarré en 2016 dans la juridiction de Fujian.

Encadré 7 *Aperçu du Système Communautaire d'Echange de Quotas d'Emissions de gaz à effet de serre (SCEQE)*
La citation suivante résume les principaux mécanismes de ce système apparu en 2005 :

> *"The market operates under a cap-and-trade principle. Unlike a carbon tax, which directly sets a price on emissions, the carbon market imposes a cap on total greenhouse gas emissions from covered installations. This cap declines over time to ensure continued emissions reductions. Companies receive emission allowances through auctions or free allocation, which they can trade, thereby establishing a market price for carbon. They may also use a limited number of international credits from eligible emission-reduction projects worldwide. Firms must monitor and report their emissions, surrendering sufficient allowances annually. Compliance is enforced with heavy fines. Since allowances are storeable, companies that reduce emissions can bank unused permits for future use or sell them at a profit (Känzig, 2025, p. 7)*

En 2022, les installations couvertes par le SCEQE représentaient 37% des émissions totales de l'Union européenne (European Environment Agency, 2024b, p. 22).
Après une période transitoire de plusieurs années, le mécanisme européen d'ajustement carbone aux frontières (CBAM) est entré dans une phase définitive en 2026. Il remplace graduellement l'allocation gratuite des droits d'émissions par un mécanisme d'enchères (Dolphin et Ferrucci, 2025). Afin de rester compétitives, les entreprises exportatrices non-européennes et leurs gouvernements sont ainsi incitées à mettre en place une forme de tarification du carbone. Le mécanisme CBAM ne couvre cependant pas toutes les importations européennes, loin de là, et il n'apporte en outre pas de réponse aux problèmes de compétitivité européenne sur les marchés à l'exportation.
Un nouveau système d'échange de quotas d'émission, appelé ETS2, a plus récemment été créé, distinct du système existant SCEQE. A partir de 2028, ce nouveau système couvrira et prendra en compte les émissions de CO_2 provenant de la combustion d'énergie fossile dans les bâtiments, le transport routier et d'autres secteurs encore (principalement les petites industries non couvertes par le SCEQE actuel).

Le caractère impopulaire de la taxation du carbone est cependant notoire [207]. Il est avéré que la tarification du carbone augmente le prix des énergies carbonées (voir par exemple, Konradt et Weder di Mauro, 2023, Känzig et Konradt, 2024, ou Känzig, 2025). Les oppositions à une tarification du carbone postulent que ces augmentations de prix des énergies carbonées ont nécessairement des effets sociaux et économiques délétères. Ces oppositions s'appuient assez souvent, explicitement ou non, sur les impacts à comportements inchangés. On craint en particulier que la taxation du carbone accroisse les inégalités de revenus

207. Voir, par exemple, les résultats de Dechezleprêtre et al. (2025) tirés d'enquêtes auprès de la population de 20 pays parmi lesquels 18 des 21 principaux émetteurs de GES. Cet article récent résume également la littérature disponible sur le thème de la (non) acceptabilité des politiques environnementales.

car les ménages moins bien lotis consacrent une plus grande part de leurs ressources aux dépenses énergétiques. Cependant, cette crainte, qui est justifiée, ignore souvent que les recettes générées par la taxation du carbone peuvent être utilisées pour contrecarrer ces effets redistributifs.

A côté des ménages, il y a les effets induits sur les entreprises et sur l'emploi. On s'attend à ce qu'une hausse de coût engendrée par une taxation du carbone impacte négativement les entreprises (leur production, leur profit). L'intuition d'un effet induit défavorable sur l'emploi émerge alors spontanément.

Or, à la réflexion, ces craintes et ces préoccupations ne vont pas de soi. Commençons par prendre la hauteur. Par la présence d'une tarification du carbone (ou d'un système d'échange de quotas d'émissions) d'un niveau bien choisi et appliquée uniformément, l'économie mondiale réaliserait en principe un gain en efficience [208]. Il se créerait donc un surplus qu'il serait en principe possible de répartir de manière à apaiser ces craintes et préoccupations. Le fait que ces dernières concernent prioritairement les générations actuelles et qu'une large part des bénéficiaires sont les générations futures complique toutefois grandement la mise en pratique de ce principe. Le fait que la tarification du carbone n'est en pratique pas appliquée partout est une autre source, assez évidente, de complication.

La conviction qu'une taxation du carbone nuit à l'économie actuelle peut encore mise en question par d'autres raisonnements et analyses. Les défaillances de marché sont nombreuses. Elles entraînent des inefficiences que la taxation du carbone pourrait permettre d'atténuer, si bien que les générations présentes en tire un gain. En voici une illustration. Les revenus du travail sont taxés. Ceci peut se justifier par les bienfaits d'une assurance sociale obligatoire et par d'autres arguments encore. Néanmoins, la taxation du travail engendre une distorsion [209]. Les revenus de la taxation du carbone pourraient servir à réduire cette distorsion touchant le travail. Ce raisonnement a été celui de la littérature sur le "double dividende", dont une version faible consiste en ceci : taxer le carbone réduit les émissions de GES (sans pour autant améliorer une mesure globale de bien-être) et les recettes de cette taxe servent à réduire les distorsions, par exemple, sur le coût du travail qui sont sources de chômage (Bovenberg et de Mooij, 1994). Cette version faible du double dividende est généralement admise. La version forte qui requiert l'amélioration d'une mesure globale de bien être ne fait en revanche pas consensus (Goulder, 1995, Schöb, 2005). Cette thématique du double dividende demeure d'actualité (voir par exemple, Fullerton et Monti, 2013, Jacobs et van der Ploeg, 2019, et Aubert et Chiroleu-Assouline, 2019, qui étendent la littérature sur le double dividende à la prise en compte des effets redistributifs ;

208. Comme cela a été indiqué ci-dessus, en présence de plusieurs défaillances de marché, ce gain en efficience nécessiterait un éventail de politiques en complément à la tarification du carbone.

209. En présence d'une taxation, par exemple linéaire, sur les revenus du travail, ce que les employeurs sont prêts à payer pour une unité supplémentaire de travail diffère de la compensation souhaitée par les travailleurs pour fournir cette unité supplémentaire. Cette différence est en soi une propriété non souhaitable qualifiée de distorsion.

voir aussi Callonnec et al., 2025, dans le cas français).

En raison de diverses imperfections, les choix technologiques et la direction prise par la recherche et le développement ne sont pas nécessairement désirables du point de vue de la collectivité : il y a globalement trop peu d'efforts pour limiter les effets délétères du changement climatique[210]. Il se peut que la régulation environnementale ou la taxation du carbone induise des substitutions entre processus de production et stimule des innovations technologiques, qui au bout du compte en limitent les coûts ou, même, créent un avantage comparatif. C'est une compréhension de "l'hypothèse de Porter" évoquée à l'encadré 8.

En conclusion, l'effet net de la taxation du carbone sur des indicateurs partiels, comme ceux du marché du travail, n'est pas déterminée par un raisonnement théorique. La littérature empirique est nécessaire pour espérer trancher cette question. La suite s'intéressera d'abord aux indicateurs d'emploi, de chômage et de salaires. Elle élargira ensuite le champ d'analyse aux inégalités de revenus. Avant d'introduire cette littérature empirique, il y a lieu de rappeler que signer l'effet net de l'introduction d'un plafonnement des émissions ou d'une taxation du carbone soulève des questions méthodologiques complexes. La section 9.1 a déjà abordé ce thème. L'encadré 9 la complète dans le contexte spécifique de ce chapitre.

10.2 Synthèse de la littérature empirique relative aux effets de la taxation du carbone sur l'emploi, le chômage et les salaires

Les articles de Martin et al. (2016), Joltreau et Sommerfeld (2019), Timilsina (2022) et Gray et al. (2023) synthétisent la littérature relative aux impacts de la taxation du carbone sur une série d'indicateurs dont la performance économique des entreprises. Les récents articles de Dechezleprêtre et al. (2023) et de Colmer et al. (2025) proposent également un aperçu des résultats essentiels de cette littérature. La suite de cette section se limite à quelques études portant explicitement sur des indicateurs relatifs au marché du travail.

10.2.1 Exploitation de données micro-économiques

Martin et al. (2014) étudient les effets de court terme (2001-2004) d'une taxe carbone modeste[211] appliquée aux entreprises manufacturières au Royaume-Uni. Ils exploitent le fait que certaines entreprises sont soumises à une taxe carbone beaucoup plus faible[212]. Tenant compte des effets de sélection, cette taxe a un effet positif mais statistiquement non significatif sur l'emploi.

210. Voir, par exemple, Stern et Stiglitz (2023).
211. Son ordre de grandeur s'élève à 15% de la facture énergétique.
212. De l'ordre de 3%.

Encadré 8 *Le lien entre la régulation environnementale et l'innovation (l'hypothèse de Porter)*
Les articles de Porter et van der Linde (1995) et d'Acemoglu et al. (2012) portent sur l'impact de la régulation environnementale. Le premier article a donné lieu à diverses formulations de l'hypothèse dite de Porter.

> *"Properly designed environmental regulation may spur innovation (...). This has often been called the "weak" version of the Porter Hypothesis because it does not indicate whether that innovation is good or bad for firms. Of course, the notion that regulation may spur technological innovation is not a new idea in economics and would not itself have led to the controversy about the Porter Hypothesis (...) The second part of the Porter Hypothesis (...) is that in many cases this innovation more than offsets any additional regulatory costs—in other words, environmental regulation can lead to an increase in firm competitiveness. This has often been called the "strong" version of the Porter Hypothesis. Finally, in what has been called the "narrow" version of the Porter Hypothesis, it is argued that flexible regulatory policies give firms greater incentives to innovate and thus are better than prescriptive forms of regulation." (Ambec et al., 2013, p. 5-6)*

Acemoglu et al. (2012) étudient comment les contraintes environnementales orientent la direction prise par le changement technologique endogène (voir aussi Acemoglu et al., 2016, Finkelstein Shapiro et Metcalf, 2023 et Dugoua et Moscona, 2025). Un travail empirique s'est développé en vue de tester ces hypothèses.
Au terme d'une synthèse de la littérature de l'époque, Dechezleprêtre et Sato (2017) concluent : "there is strong evidence that environmental regulations induce innovation activity in cleaner technologies" (p. 201). Ces auteurs soulignent que l'effet de la régulation environnementale sur des indicateurs de compétitivité émerge surtout auprès d'entreprises intensives en énergie carbonée. Plus récemment, Benatti et al. (2023) et Benatti et al. (2024) aboutissent à une conclusion moins tranchée que celle de Dechezleprêtre et Sato (2017).
Qu'en est-il lorsque la régulation environnementale est comprise comme le SCEQE ? Exploitant des données de firmes de 23 pays européens, Calel et Dechezleprêtre (2016) concluent que, durant ses premières années d'existence, le SCEQE a entraîné une hausse de 10% du dépôt de brevets à faible teneur en carbone. Exploitant des données anglaises, Calel (2020) conclut que le marché européen du carbone a encouragé une augmentation des dépôts de brevets bas carbone et des dépenses en recherche et développement parmi les entreprises réglementées. Känzig (2025) rejoint ces conclusions. Cui et al. (2018) fait de même dans le cas des expériences pilotes en Chine. La synthèse de Teixidó et al. (2019) suggère que le SCEQE a davantage stimulé l'activité d'innovation que l'adoption de technologies peu émettrices de carbone. Selon Dechezleprêtre et al. (2023) et Colmer et al. (2025), cette adoption est néanmoins un mécanisme clé pour comprendre le peu d'impacts négatifs du SCEQE sur la santé économique des entreprises durant les années 2005 à 2012.

Encadré 9 *A propos de la méthode de différence-de-différences.*
Dans le contexte de ce chapitre, la politique évaluée est fréquemment représentée par une variable binaire qui passe de 0 à 1 lorsque l'unité d'observation (l'entreprise, le secteur, la région) se met à participer à un système de plafonnement et d'échange de quotas ou commence à être soumise à une taxe carbone. Beaucoup d'évaluations s'appuient sur la méthode de différence-de-différences conditionnelle à des caractéristiques des unités d'observation[a]*. D'après la littérature récente (voir par exemple, Baker et al., 2026), les effets estimés par cette méthode peuvent ne pas capter l'effet causal (ni sa valeur, ni même son signe) pour, notamment, trois motifs brièvement expliqués ci-dessous. Ces motifs de préoccupation sont mentionnés ici car ils se rencontrent dans certaines évaluations des effets de l'introduction d'un plafonnement des émissions ou d'une taxation du carbone. Quand l'estimateur de différence-de-différences est conditionnel à des caractéristiques observées, on n'évite un biais d'estimation qu'à condition de postuler que l'effet soit identique peu importe la valeur prise par ces caractéristiques*[b]*. Ensuite, il n'est pas rare de rencontrer des spécifications de l'équation à estimer où sont présentes des caractéristiques observées après l'introduction de la politique évaluée. Lorsque ces caractéristiques sont influencées par la politique elle-même, il y a un biais dû au caractère endogène de ces caractéristiques. Enfin, lorsque les études considèrent les effets d'une politique dont l'introduction est échelonnée dans le temps*[c]*, on sait à présent que l'estimateur de différence-de-différences ne capte l'effet causal moyen de cette politique que si l'on postule que cet effet est le même en tout temps (voir par exemple, Baker et al., 2026).*

a. L'ajout de telles caractéristiques est motivé par le désir d'obtenir des estimations plus précises de l'effet de la taxation ou par le souci de ne pas rejeter l'hypothèse de parallélisme des tendances des unités traitées et non traitées avant le début du traitement.

b. Cette hypothèse peut être testée en faisant interagir cette variable binaire et ces caractéristiques. Si l'échantillon exploité est de taille suffisante, on peut aussi estimer l'effet sur des sous-échantillons homogènes sur le plan de ces caractéristiques (par exemple, la taille de l'entreprise ou le secteur).

c. Dans le contexte de ce chapitre, la variable binaire qui désigne l'introduction du système de plafonnement et d'échanges de quotas (ou la taxation du carbone) passe de 0 à 1 à des moments différents selon l'unité d'observation considérée.

Il existe plusieurs évaluations des effets du SCEQE sur base de données d'entreprises. Elles couvrent la plupart du temps les années allant de 2005 à 2012, période où les permis d'émission de GES étaient alloués gratuitement[213]. Dechezleprêtre et al. (2023) étudient l'impact du SCEQE sur les émissions de GES et des indicateurs de performance économique des entreprises. Ils exploitent des données de tous les secteurs concernés par le SCEQE entre 2005 et 2012. Au cours de cette période, le prix de la tonne émise a fluctué amplement entre quasi 0 et environ 30 €. La régulation européenne ne s'applique qu'aux installations d'une capacité supérieure à un seuil[214]. Se référant en particulier à Heckman

213. Ce faisant, les études couvrent les deux premières phases du SCEQE. A partir de 2013, la troisième phase a introduit de nombreux changements résumés sur la page web `https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020_en`.

214. La définition du seuil dépendant du sous-secteur considéré. Le seuil n'est pas établi au niveau de l'en-

et al. (1997), Heckman et al. (1998) et Abadie (2005), l'étude combine une méthode d'appariement (de "matching", visant à identifier pour chaque firme soumise à la régulation, une ou plusieurs autres qui ne le sont pas [215]) et une approche de différence-de-différences [216]. Alors que cela a parfois été mis en doute vu le faible niveau du prix de la tonne émise, les auteurs mettent en évidence un lien de causalité entre l'introduction du SCEQE et la baisse des émissions de CO_2 durant la période 2005–2012 [217]. Concernant l'emploi, l'effet moyen est positif mais n'est pas statistiquement significatif. Ceci demeure vrai quand l'analyse est menée par grand secteur, par classe de tailles de firme et par groupe de pays [218].

S'intéressant, selon une méthodologie proche, à l'emploi dans l'industrie manufacturière de 19 pays européens, Marin et al. (2018) concluent pour leur part à un impact faiblement négatif mais statistiquement significatif pendant la première phase du SCEQE (2005–2007), effet qui disparaît durant la deuxième (2008–2012). Colmer et al. (2025) exploitent des données d'entreprises de l'industrie manufacturière française au cours des années allant de 2005 à 2012. La méthodologie présente des similitudes avec celle de Dechezleprêtre et al. (2023). Colmer et al. (2025) concluent que le SCEQE n'a pas d'effet détectable sur la production et l'emploi des entreprises. L'explication principale tient au fait que les entreprises visées par le SCEQE ont investi dans des processus technologique réduisant les émissions. Le tableau 1 de l'article de synthèse de Gray et al. (2023) mentionne trois autres études plus anciennes exploitant des données de firmes, qui concluent à une absence d'effet du SCEQE sur l'emploi [219].

Le gouvernement de la province de Québec a annoncé en 2008 son intention de mettre en place un marché du carbone. Un système de plafonnement et d'échange des émissions

treprise mais de l'installation de production. Une entreprise relève du SCEQE si elle a une installation au-delà du seuil.

215. Sans entrer dans les détails, l'approche dite de matching suppose qu'en tenant compte d'un riche éventail de caractéristiques observables (avant l'entrée en vigueur du SCEQE), les problèmes de sélection endogène disparaissent. Dans le cas étudié ici, deux entreprises du même secteur et du même pays, ayant plusieurs installations et, notamment, des chiffres d'affaire analogues peuvent l'une avoir au moins une installation au-delà du seuil (être traitée) et l'autre pas. L'assignation du traitement n'est pas aléatoire : elle est endogène. La méthode de matching suppose que les caractéristiques observables disponibles permettent d'expliquer cette assignation à un facteur purement aléatoire près.

216. L'indicateur de traitement est une variable binaire valant 1 pour les entreprises dont une installation au moins est soumise au SCEQE et zéro sinon. Les auteurs précisent que le traitement se situe en 2005 pour la plupart des entreprises. Les problèmes inhérents à un calendrier échelonné d'entrée en traitement devraient donc être limités (sur ce thème, voir la fin de l'encadré 9). Les auteurs discutent les conditions requises pour que leur approche identifie un effet causal.

217. Il semble y avoir un consensus sur ce point. Voir Colmer et al. (2025) et, selon une méthodologie bien différente couvrant les années allant de 2005 à 2019, Känzig (2025). Colmer et al. (2025) précisent p. 1657 : "We find little evidence that carbon leakage played a meaningful role in contributing to emissions reductions, indicating that, at least in this context, the EU ETS helped to mitigate global climate change".

218. Sauf que l'effet est positif et statistiquement significatif dans le cas des pays du sud de l'Europe (compris comme le regroupement de l'Espagne, la Grèce, l'Italie, le Portugal et la Slovénie).

219. L'article de Klemetsen et al. (2020) relatif au cas Norvégien va dans le même sens.

s'est mis en place en 2013. Hanoteau et Talbot (2019) en évaluent les effet en exploitant un panel d'établissements, provenant de 47 installations réglementées au Québec et de 245 installations non réglementées au Québec et dans le reste du Canada (hormis la Colombie britannique[220]). Cet échantillon de petite taille est disponible sur la période 2010–2015. Les auteurs disposent donc de peu de recul temporel si bien que l'on ignore si les unités de contrôle et les unités réglementées au Québec suivent des tendances parallèles avant 2008. La vérification n'est pas non plus menée sur la période 2010–2012. Cela fragilise cette évaluation. En matière d'emplois, elle conclut que le nombre moyen de travailleurs employés a baissé d'environ 7% dans les installations réglementées sur la période 2013–2015 par comparaison avec la période 2010–2012. L'effet, considérable, est significatif au seuil d'1% et ne varie guère si la période préalable au traitement devient 2010–2011 (afin de prendre en compte les effets d'anticipation éventuels en 2012).

Considérons à présent les pays du sud de la planète. De nombreux articles évaluent les effets des expériences pilotes menées à partir de 2011 dans diverses juridictions en Chine[221]. Ces études exploitent des échantillons d'entreprises cotées en bourse, probablement non représentatifs de la partie de l'économie chinoise concernée par le plafonnement des émissions de GES. Ces évaluations, de qualité inégale, concluent généralement à un effet positif, et fréquemment statistiquement significatif, sur l'emploi. Bu et al. (2022) indiquent toutefois que la structure de l'emploi se modifie. Ils concluent en effet que suite aux expériences pilotes la proportion de travailleurs associés à la production chute et le niveau ainsi que la part de travailleurs ayant au moins un diplôme de bachelier augmente, ces effets étant statistiquement significatifs. Exploitant des données d'entreprises des secteurs minier et manufacturier en Afrique du Sud, Gallé et al. (2025) ne trouvent pas d'effet négatif à court terme de l'annonce puis de la mise en oeuvre de la taxation du carbone (respectivement en 2015 et 2019) sur les ventes, les profits et l'emploi.

En résumé, les évaluations exploitant des données micro-économiques livrent des messages contrastés, y compris quant au signe de l'effet sur l'emploi. Sur base des études les plus fiables, les effets micro-économiques sur l'emploi des systèmes de plafonnement des émissions ou de taxation du carbone apparaissent toutefois être généralement faibles et statistiquement peu ou non significatifs. Ces conclusions concernent typiquement des unités de production industrielle intensives en émissions de GES. Elles ont été obtenues à partir de données observées à une époque où le prix du carbone était faible.

220. Comme l'expliquera la sous-section 10.2.2, cette province a en effet introduit une taxation du carbone en 2008.

221. Citons notamment Yu et Li (2021), Bu et al. (2022), Wang et al. (2023), Yang et al. (2024), Wang et al. (2025).

10.2.2 Exploitation de données sectorielles ou régionales

En juillet 2008, la Colombie britannique a instauré une taxe sur le carbone tandis que les autres provinces canadiennes ne l'ont pas (encore) fait. Cette taxe, au départ de 10$/tonne de GES, a augmenté par palier pour atteindre 30$ en 2012, année qui clôt la période couverte par les évaluations de Yamazaki (2017), Carbone et al. (2020) et Azevedo et al. (2023). La taxe carbone se voulait neutre en ce sens que les recettes publiques de cette taxe ont servi à réduire l'impôt sur le revenu des ménages et celui payé par les entreprises. Ces recettes ont aussi permis d'allouer un transfert forfaitaire aux ménages à bas revenus. Les résultats évoqués mesurent l'impact net de ces réformes. L'unité d'observation de Yamazaki (2017) et de Carbone et al. (2020) est le secteur d'une province. Répondant aux critiques adressées notamment par Yip (2018) à l'évaluation de Yamazaki (2017), celle de Azevedo et al. (2023) exploite des données d'entreprises qu'ils agrègent pour obtenir plusieurs "entreprises représentatives", de tailles différentes, par secteur et province[222]. Azevedo et al. (2023) aboutissent à deux conclusions principales à propos de l'impact sur l'emploi : (i) en moyenne l'effet n'est pas statistiquement significatif ; (ii) l'emploi baisse significativement dans les grandes entreprises fortement émettrices de GES et il croît sans ambiguïté dans les secteurs des services, ceux des soins à la personne et dans divers secteurs liés à l'alimentation et à l'habillement, où les unités de production sont petites. Il est fort plausible que ce second ensemble d'effets découle de la redistribution des recettes de la taxe carbone.

L'introduction d'une taxe sur le carbone en Colombie britannique a aussi été étudiée à l'aide de l'enquête canadienne sur les forces de travail. Etant donné la différence d'appréciation des effets, il est utile de l'évoquer ici. Yip (2018) exploite des données individuelles de travailleurs sur la période 2005–2015. La réforme est perçue par une variable binaire valant 1 lorsque le travailleur réside en Colombie britannique et zéro sinon. Comme il est standard avec la méthode de différence-de-différences, cette variable binaire multiplie un indicateur temporel permettant de contraster les périodes après et avant juillet 2008. Dans des extensions, l'auteur capte aussi la réforme de manières différentes. Selon Yip (2018), tenant compte de diverses variables de contrôle, la taxe carbone provoque une hausse statistiquement significative du taux de chômage des travailleurs peu et moyennement qualifiés. L'impact est respectivement de + 2,4 et + 1,4 point de pourcentage. Deux autres variables d'intérêt (la durée hebdomadaire individuelle de travail et le taux de participation au marché du travail) ne sont en revanche guère affectées. Wei et Yip (2025) étudient l'impact sur les flux de travailleurs suite à l'introduction de la taxe carbone en Colombie britannique. Ils concluent à un effet négatif sur les salaires à l'embauche, qui se marque uniquement

222. Comme les hypothèses requises par l'approche de différence-de-différences (utilisées par les deux premières évaluations) sont rejetées dans de nombreux secteurs, les auteurs adoptent la méthode de contrôle synthétique (Synthetic Control Method en Anglais), qui consiste, pour chaque "entreprise représentative" d'un secteur en Colombie britannique, à créer une unité de contrôle artificielle obtenue en pondérant de manière appropriée des observations au sein des entités géographiques n'ayant pas mis en œuvre la taxe carbone.

parmi les travailleurs peu et moyennement qualifiés. La hausse, temporaire du taux de chômage en Colombie britannique, découle de licenciements plus fréquents et d'embauches en baisse. Ces effets sont plus prononcés au bas de l'échelle des qualifications.

Il apparaît difficile de concilier ces différentes études relatives à l'introduction d'une taxation du carbone en Colombie britannique. La concomitance de la Grande Récession économique de 2008-2009 complique très certainement l'identification de l'effet causal de l'instauration de cette taxe carbone.

Hernandez Carballo et al. (2025a) exploitent des données régionales européennes (au niveau NUTS 3[223]). Alors que les études sur données d'entreprises évoquées plus haut couvrent une période s'arrêtant en fin de la phase 2 du SCEQE (2012), Hernandez Carballo et al. (2025a) exploitent le changement survenu entre cette phase et la suivante. La phase 3 (couvrant les années 2013 à 2020) se caractérise dès 2013 par une réduction très marquée du nombre de permis d'émissions alloués gratuitement. Ces auteurs construisent un indicateur régional de coût net des émissions de GES qu'ils évaluent en 2013 et en moyenne sur la phase 2 (2008–2012). La différence entre ces deux valeurs leur fournit un indicateur d'exposition régionale au changement de coût des émissions. Cette différence fluctue selon la composition d'activité économique régionale (composition en termes de secteurs et de taille des installations de production). Elle est répartie en quintiles. Il y a une très nette différence de valeur entre le cinquième quintile et les trois premiers. C'est moins vrai dans le cas du quatrième. Les régions appartenant aux trois premiers quintiles forment le groupe de contrôle et les deux autres le groupe traité. L'application d'une variante de l'approche de différence-de-différences conduit à la conclusion que le secteur englobant les mines et les carrières, le gaz, l'électricité et l'eau des régions des deux quintiles supérieurs connait une baisse significative (au seuil de 5%) de l'emploi durant la troisième phase par comparaison avec les régions des trois premiers quintiles. Cet effet, -3%, est bien différent de celui obtenu dans le cas de l'industrie manufacturière (-1%, effet seulement significatif au seuil de 10%). Cette dernière conclusion rejoint qualitativement certains résultats de la sous-section 10.2.1 exploitant des données d'entreprises du même secteur. Différentes analyses de sensibilité suggèrent que ces conclusions sont robustes[224].

Zhang et Duan (2020) étudient les implications des expériences pilotes chinoises sur la compétitivité et l'emploi à l'aide de données recensées au niveau du secteur de la juridiction sur la période 2005–2015[225]. Le traitement est une variable binaire qui vaut 1 si le secteur, défini finement, est concerné par les quotas d'émissions dans une juridiction

223. Voir https://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts.

224. L'ampleur du changement régional de coût des émissions entre les phases 2 et 3 découle de ses caractéristiques économiques propres. Si des déterminants inobservés de l'emploi varient avec le temps et sont corrélés avec ces caractéristiques, les effets mesurés peuvent toutefois être biaisés.

225. Sept juridictions sont concernées : Pékin, Tianjin, Shanghai, Chongqing, Hubei, Guangdong et Shenzhen. Le début de la mise en oeuvre se situe en 2013 sauf dans la municipalité de Chongqing où le démarrage a eu lieu en 2014.

mettant en oeuvre l'expérience pilote et 0 sinon [226]. Le groupe de contrôle est constitué des secteurs non couverts par les quotas d'émissions au sein des juridictions participantes et/ou des juridictions non participantes [227]. Les unités de contrôle ont un poids dans l'analyse de différence-de-différence qui dépend de leur similitude avec les secteurs traités dans le juridictions participantes [228]. Cette similitude se calcule à partir de la probabilité d'être traité étant donné un ensemble de caractéristiques observées durant la période précédant le début de l'expérience pilote (méthode dite de "propensity score matching"). L'analyse tient compte de possibles effets d'anticipation. Zhang et Duan (2020) détectent un effet négatif sur les effectifs employés durant les années 2013 à 2015 mais l'ampleur et le degré de significativité au plan statistique varient selon que le groupe de contrôle est constitué des secteurs non traités au sein des juridictions pilotes ou des juridictions non participantes [229]. Dans ce second cas, l'impact est moins négatif et devient non significatif. Les effets sont analogues, mais estimés moins précisément, quand l'analyse se limite aux six sous-secteurs les plus intensifs en énergie.

En résumé, si, en raison de la concomitance avec la Grande Récession, on ignore les résultats divergents relatifs l'expérience menée en Colombie britannique, on dispose de peu d'études fiables au niveau régional ou sectoriel. Les deux études résumées ci-dessus suggèrent qu'à ce niveau d'agrégation les effets sur l'emploi seraient négatifs, à tout le moins dans certains secteurs.

10.2.3 Exploitation de données macroéconomiques

Au niveau macroéconomique des pays, dans le prolongement d'une première étude [230], Metcalf et Stock (2023) estiment l'impact net des taxes carbone que quinze pays européens ont introduit afin, le plus souvent, de couvrir des secteurs qui n'ont pas jusqu'ici été concernés par le SCEQE (transport non aérien, habitat, par exemple) [231]. Ces auteurs proposent d'interpréter les variations de la taxe carbone comme formées de deux composantes : la première est le reflet de la trajectoire économique passée du pays (captée par la présence d'un ensemble de variables explicatives appropriées [232]), la seconde ne peut être prévue. Autrement dit, cette seconde part est un choc inattendu que les auteurs supposent être

226. Une unité d'observation croise donc l'identification d'un sous-secteur et celle d'une province. Il y a 55 unités d'observation traitées.
227. En tout, 413 unités observées.
228. Voir en particulier Heckman et al. (1997), Heckman et al. (1998), Abadie (2005).
229. Les premières présentent l'avantage de partager avec les secteurs soumis aux quotas un contexte économique temporel propre à la juridiction. Mais le risque que les secteurs de contrôle soient affectés par l'introduction des quotas (via des interrelations économiques) est sans doute plus grand au sein de la même juridiction qu'entre juridictions. Cette seconde considération pousse à privilégier le second groupe de contrôle.
230. Metcalf et Stock (2020).
231. L'impact net tient compte de la manière dont les recettes fiscales de la taxe ont été allouées.
232. Divers indicateurs macroéconomiques passées, l'historique du taux de tax carbone, un effet fixe de pays et des effets temporels communs aux pays.

exogènes par rapport aux variables de résultat considérées (le PIB et l'emploi). Cette étude macro-économétrique couvre la période 1990-2019. Elle conclut à une absence d'effet statistiquement significatif de cette part inattendue des variations de la taxe carbone tant sur le taux de croissance de l'emploi total que sur celui de l'emploi manufacturier. La conclusion est identique pour le PIB. Ces conclusions apparaissent robustes [233].

Känzig et Konradt (2024) estiment les effets macroéconomiques du SCEQE et ceux des taxes carbones nationales en Europe sur la période 1999-2019. Ces auteurs et Känzig (2025) suivent une approche générale commune distincte de celle de Metcalf et Stock (2023). Le principe consiste à isoler une variation exogène des prix du carbone en mesurant comment les prix des contrats à terme sur le carbone évoluent dans une courte fenêtre temporelle autour des annonces politiques réglementaires concernant l'offre de quotas d'émission ou le niveau des taxes carbones [234]. Cette variation exogène sert de variable instrumentale lors de l'estimation de l'impact de ce que l'on peut appeler un "choc politique carbone" [235]. Känzig et Konradt (2024) concluent que les impacts économiques du SCEQE sont plus marqués que ceux des taxes carbones [236]. Le taux de chômage est en hausse. Dans le cas du SCEQE, l'effet est par moment statistiquement significatif (au seuil conventionnel de 95%), mais pas dans le cas des taxes carbones nationales. Känzig (2025) se centre sur les effets du SCEQE. La hausse du taux de chômage en raison du SCEQE se confirme. Elle atteint 0,15 points de pourcentage par choc de la politique carbone augmentant la partie énergie de l'indice de prix HICP [237] d'1%. L'effet ne devient significatif au seuil de 10% qu'après trente mois [238]. Selon Känzig (2025), un choc de la politique carbone entraine aussi une baisse des salaires réels en Europe. Ces résultats suggèrent qu'au-delà d'effets directs, le

233. "Our results are robust to controlling for how carbon tax revenue is used, whether we limit the analysis to countries with large tax rates or to the Scandinavian countries that were early adopters of carbon taxes as part of a Green Tax Reform, allowing for marginal effects to depend on the level of the tax or the covered share, or other cuts of the data" (Metcalf et Stock, 2023, p. 285).

234. Dans la mesure où les conditions économiques présentes et futures sont déjà intégrées dans les prix avant l'annonce réglementaire, ces changements constituent une source de variation des prix du carbone dont l'exogénéité est plausible. Il reste néanmoins la possibilité que les changements réglementaires soient partiellement anticipés et reflétés dans les prix avant leur annnonce.

235. Tant Känzig et Konradt (2024) que Känzig (2025) sont attentifs à neutraliser les effets de certaines récessions, de la crise européenne des dettes souveraines et de chocs pétroliers.

236. Les auteurs avancent plusieurs sources d'explication à cette différence qualitative : redistribution des revenus des taxes carbones, différences de couverture sectorielle (le secteur de production d'électricité est dans une large mesure non concerné par les taxes carbones nationales, mais le SCEQE s'applique à ce secteur ; l'inverse est vrai pour le secteur du transport et du chauffage), différences de mécanismes de formation des prix dans les secteurs concernés par le SCEQE d'une part et les taxes carbones de l'autre ; comparé aux taxes carbones, le prix du carbone dans le cadre du SCEQE est plus volatile et cette incertitude peut avoir des effets macroéconomiques (Bilal et Stock, 2025) ; etc.

237. European Harmonised Indices of Consumer Prices. L'énergie, qui inclut le carburant, l'électricité et le gaz, représente environ 10% de la composition du panier moyen des consommateurs européens.

238. L'indice HICP augmente rapidement et la production industrielle baisse peu après un choc de politique carbone.

SCEQE a de nombreux effets induits dans l'économie. En bref, pour Känzig (2025), "the above findings clearly illustrate a policy trade-off between reducing emissions to avert future climate damages and the economic costs of decarbonization" (p. 22). Les effets du SCEQE sont aussi hétérogène. Selon Känzig (2025), l'effet sur l'output national se marque plus négativement dans les pays où l'intensité des émissions de GES est plus forte.

L'approche de Känzig (2025) a récemment été suivie par d'autres auteurs. Par exemple, Mangiante (2024) et Konradt et Mangiante (2026) l'appliquent à l'étude des effets régionaux du SCEQE. Mangiante (2024) conclut : "Aggregate employment strongly decreases following the [carbon policy] shock down to 0.25% after 2 years. The response of the poorer regions is stronger than those of the rich ones. After 2 years, poor regions observe a decrease in employment of 0.4 percentage points stronger than rich regions. In conclusion, using gross value added or employment as a measure of economic activity delivers similar results" (p. 12).

En résumé, les études macroéconomiques livrent un message tranché. Dans la mesure où l'on parvient à isoler la part exogène des variations de prix du carbone en Europe, cette part a un effet défavorable sur les salaires, l'emploi et le chômage dans le cas du système européen d'échange de quotas d'émissions de GES. Il n'en va pas de même pour la part exogène des variations de taxes carbones introduites par plusieurs pays européens dans des secteurs non couverts par le système européen d'échange de quotas d'émissions de GES. Un essai de synthèse des évaluations menées aux divers niveaux d'agrégation est reporté à la section 10.4.

10.3 Les effets redistributifs de la taxe carbone

Cette section se préoccupe des effets de la tarification du carbone sur la distribution des revenus[239]. En préambule à cette discussion, ne perdons pas de vue que le changement climatique lui-même a des effets redistributifs entre nations et au sein de celles-ci. Plus précisément, une dégradation du climat se marquant par une hausse des températures accroît les inégalités de revenus au sein des pays. L'effet est plus net dans les pays pauvres et ceux caractérisés par une température élevée ou un secteur agricole plus important (Mumtaz et Theophilopoulou, 2024). Ce rappel utile étant fait, penchons-nous ici sur les effets de la taxation du carbone. Dans les pays à bas revenus, un ensemble plus ou moins vaste de personnes au bas de la distribution des revenus consomme peu d'énergies fossiles, si bien que la taxation du carbone peut y réduire les inégalités de revenus mais le sujet de-

239. Beaucoup d'études et la discussion qui suit portent sur les revenus instantanés (par exemple, annuels). Une alternative plus complexe à mettre en oeuvre consiste à s'intéresser aux revenus inter-temporels. Ce choix n'est en soi pas anodin dans la mesure où, selon la théorie économique controversée du revenu permanent (Milton Friedman), la consommation varie en fonction non du revenu instantané mais d'un indicateur des revenus inter-temporels. A propos de l'utilisation de ces différentes notions de revenus dans le cadre de la taxation du carbone, voir par exemple Rausch et al. (2011) et la synthèse de Ohlendorf et al. (2021).

meure controversé (Wang et al., 2016). Dans le cas des économies avancées et plus riches, il y a en revanche la crainte que la taxation du carbone accroisse les inégalités de revenus car les ménages situés au bas de l'échelle des revenus consacrent une plus grande *part* de leurs ressources aux dépenses énergétiques[240]. Ces craintes sont-elles fondées ? La suite apporte des éléments de réponse à cette question complexe. Les synthèses de la littérature par Wang et al. (2016), Ohlendorf et al. (2021), Shang (2023), Merkle et Dolphin (2024) et l'OECD (2024) sont un complément recommandé.

Certaines études portent sur l'impact d'une taxe carbone appliquée sur, en particulier, les carburants et sur les combustibles utilisés dans le secteur du logement (par exemple, Berry, 2019, ou Douenne, 2020, dans le cas français). Ces études exploitent ce que l'on appelle des modèles de microsimulation, qui exploitent des données individuelles fines sur la consommation et les dépenses des ménages et qui simulent l'impact de changements de la fiscalité en tenant compte ou non de la possibilité de changements de comportement des ménages. Selon ses effets induits sur les prix hors taxe, la taxation des carburants ou des combustibles utilisés dans le secteur du logement affecte directement les consommateurs au prorata de leur usage de ces énergies mais aussi indirectement via l'impact de cette taxation sur l'ensemble des prix de l'économie. Ces études quantifient les changements dans la distribution nationale des revenus induits par la taxation. Le caractère régressif de telles taxes carbones est une propriété assez générale dans les pays riches[241].

D'autres études s'intéressent aux effets d'une taxation générale du carbone. Ceci requiert d'évaluer le contenu en carbone de tout le panier de consommation des ménages et d'ensuite examiner comment une augmentation des prix du carbone modifie les budgets des ménages et les prix à la consommation. Si une taxation du carbone existe à l'étranger ou si, en son absence, le contenu en carbone des biens importés est taxé[242], il est nécessaire de reconstituer la chaîne d'approvisionnement (voir par exemple, Feindt et al., 2021, Merkle et Dolphin, 2024, OECD, 2024). Par son analyse des cas de l'Allemagne, de la France, du Mexique, de la Pologne et de la Turquie, le chapitre 5 du rapport de l'OECD (2024) confirme, *qu'à comportements et technologies inchangés*, la taxation du carbone réduit davantage le pouvoir d'achat au bas de la distribution des revenus[243].

Känzig (2025) développe une approche sensiblement différente. Il exploite des données d'enquête au Royaume-Uni réalisées annuellement et disponibles sur deux décennies

240. Il arrive que le premier décile de revenus soit une exception si ses populations n'ont que rarement accès à certains biens (un véhicule privé avec moteur à combustion par exemple). En corollaire, le critère précis utilisé pour mesurer les inégalités de revenus peut être déterminant.

241. Le caractère régressif signifie que la charge financière relative (en termes de dépenses ou de revenus) diminue avec le niveau de revenu. Voir la figure 1 de Budolfson et al. (2021).

242. Comme dans le Mécanisme européen d'Ajustement Carbone aux Frontières (CBAM).

243. La prise en compte des changements de comportement des ménages ne changerait pas la conclusion : "Overall, the impact of households' behavioural response on the distributional impact of carbon prices seems limited at current carbon price levels" (OECD, 2024, p. 239).

(1999–2019). Il distingue trois types de ménages : ceux à bas, à moyen et à haut revenus [244]. Le coeur de l'analyse porte sur l'impact d'un "choc politique carbone" (notion précisée à la sous-section 10.2.3) sur les dépenses et les revenus des ménages des trois types. Selon Känzig (2025), par comparaison avec la population à haut revenu, "there is evidence that low-income households experience significantly larger declines in both income and expenditure—at some horizons, these differences are statistically significant even at the 90 percent level" (p. 32). L'impact plus marqué sur les bas revenus s'explique par la plus grande part de l'énergie dans leurs dépenses, par la faible réponse de leur consommation d'énergie aux prix mais aussi par la plus grande sensibilité de leurs revenus. Ceci s'explique par l'importance des revenus du travail comme source de revenu et le fait que les secteurs qui les emploient sont plus sensibles aux fluctuations économiques.

Bigio et al. (2025) appliquent aux pays de la zone Euro une approche voisine de celle Känzig (2025) évoquée à l'instant. Les auteurs développent une approche permettant de quantifier ce que chaque individu est prêt à payer pour ne pas être soumis à un "choc politique carbone" de petite ampleur. Si cette somme est positive, les auteurs considèrent que le choc engendre une perte de "bien-être économique" d'un montant équivalent. Exploitant un ensemble de données de la période 1999–2019, leurs principaux résultats sont les suivants. Premièrement, les pertes globales moyennes de bien-être sont élevées : une hausse de 1% des prix de l'énergie induite par une politique carbone entraîne une perte de "bien-être" moyenne de 245 euros, ce qui correspond à environ 0,5% de la consommation sur trois ans. Deuxièmement, lorsqu'ils décomposent les origines de ces pertes, l'effet direct — provenant de la hausse des prix du panier de consommation — représente 0,2 % de la consommation sur trois ans. Sur les revenus du travail, les prix des actifs et les transferts financiers de l'État, les impacts indirects sont respectivement de 0,45 %, -0,05 % et -0,1 % de la consommation sur trois ans [245]. L'effet induit sur les revenus du travail constitue donc le facteur dominant. Si l'effet direct se révèle être peu différent d'un groupe socio-démographique à l'autre, en revanche les effets indirects sont surtout défavorables aux ménages plus jeunes (25–34 ans) appartenant au tiers inférieur de la distribution des revenus et aux populations sans diplôme d'études supérieures. Les effets négatifs sur le "bien-être économique" se marquent également plus dans les pays du sud et de l'est de l'Europe. Tant Känzig (2025) que Bigio et al. (2025) soulignent que les effets mesurés sont cependant entourés d'une grande incertitude.

Le rapport de l'OECD (2024) souligne que les effets redistributifs de la taxation du carbone dépendent fortement de l'utilisation des recettes publiques collectées via la taxe carbone ou la vente des quotas d'émission (lorsque ces derniers ne sont pas accordés gratui-

244. Les premiers se situent dans le quart inférieur de la distribution, les derniers dans le quart supérieur et le groupe à revenus moyens occupe la moitié centrale de la distribution.

245. Les deux signes négatifs proviennent de ce que le "choc politique carbone" entraîne une hausse du prix des actifs et des transferts. Au chapitre suivant, la note de bas de page 269 apportera un autre éclairage concernant la valeur des actifs.

tement). Dans leur analyse des divers pays européens, Merkle et Dolphin (2024) vont dans le même sens. Budolfson et al. (2021) montrent qu'il y a moyen d'utiliser les recettes de la taxation du carbone de telle sorte que la pauvreté et/ou les inégalités *présentes* de revenus diminuent. Fullerton et Monti (2013), Aubert et Chiroleu-Assouline (2019), Fragkos et al. (2021), et Ascari et al. (2025) produisent des analyses économiques qui confortent le message central de Budolfson et al. (2021). La section 11.1 y reviendra. Budolfson et al. (2021) préconisent en particulier d'utiliser les recettes fiscales de la taxe carbone en octroyant un transfert égal par habitant. On parle de dividende carbone. Boyce (2019) et André (2026) approfondissent les fondements éthiques d'un tel dividende. Lorsque l'État peut utiliser un tel dividende, Fricke et al. (2025) et Douenne et al. (2026) optimisent à la fois la redistribution des revenus et la taxation du carbone, les premiers dans un cadre statique et les seconds dans un cadre dynamique.

Avoir un mécanisme de redistribution transparent, crédible et visible a toute son importance du point de vue de l'acceptabilité politique d'une taxation du carbone (voir par exemple Maestre-Andrés et al., 2019). Néanmoins, l'hétérogénéité des situations au sein des déciles de revenus peut être fort importante. Sur base d'un grand échantillon de ménages et d'un modèle d'équilibre général où les travailleurs sont mobiles entre les emplois mais pas entre les régions des États-Unis, Rausch et al. (2011) soulignent que les pertes et les gains financiers résultant d'une faible taxe carbone (20$/tonne en 2006) sont fort dispersés au sein des déciles de revenus. Cela est vrai pour trois modes de redistribution des recettes de la taxe carbone. Rausch et al. (2011) notent aussi l'importance de savoir comment les transferts sociaux varient avec le niveau général des prix. Labrousse et Perdereau (2025) concluent qu'en France et toutes choses restant égales par ailleurs, les ménages ruraux sont plus affectés par une tarification du carbone. En pareil cas, la tarification du carbone devrait tenir compte de la localisation géographique des consommateurs d'énergies carbonées.

Enfin, en plus des effets redistributifs en termes de revenus, la littérature considère la "justice procédurale" ("procedural justice") et la "justice de reconnaissance" ("recognitional justice"). La première se préoccupe de l'équité du processus de décision (qualité de l'information, participation citoyenne, etc.). La seconde est soucieuse du respect et de la prise en considération équitable des différentes cultures et perspectives présentes dans la société. Divers auteurs soulignent l'importance de ces deux notions de justice. Toutes les parties concernées par les changements que la tarification du carbone induit sont-elles activement pris en compte ? Est-ce en particulier vrai pour les parties qui ont peu de relais politiques, peu de possibilités de lobbying ? (Vatalis et al., 2022, Hernandez Carballo et al., 2025)

10.4 Résumé concernant les effets de la tarification du carbone

Toutes les analyses empiriques s'intéressant au marché du travail ne convergent certes pas sur un message unique. Comme souvent, l'établissement d'un lien de causalité est un vrai défi. Néanmoins, selon les études les plus fiables et *aux prix historiques du carbone*, la taxation de ce dernier et un système de plafonnement des émissions et d'échange de quotas n'ont pas eu d'impact significatif sur l'emploi selon les études exploitant des données d'entreprises. Les études relatives au système européen d'échange de quotas d'émissions (SCEQE) couvrent cependant la période s'achevant en 2012 où les droits d'émission étaient distribués gratuitement. Une étude, qui exploite des données sectorielles régionales, couvre la phase ultérieure où c'est nettement moins le cas. Elle conclut à un impact négatif significatif du SCEQE sur l'emploi d'un secteur industriel englobant notamment la production d'électricité. L'effet est bien moindre et peu significatif dans l'industrie manufacturière. Ceci suggère qu'il est imprudent d'extrapoler ces conclusions à des époques où le prix du carbone serait nettement plus élevé [246].

Quelques études empiriques macroéconomiques couvrent une période allant jusqu'à 2019. A ce niveau d'agrégation, l'établissement d'un lien causal est particulièrement complexe à réaliser. Cela dit, en ce qui concerne l'Europe, il y aurait lieu de distinguer le SCEQE et les taxes carbones que diverses nations ont mises en place dans des secteurs non couverts par le SCEQE. Ces dernières n'auraient pas eu d'effet significatif sur l'emploi. A l'inverse, le SCEQE aurait été responsable d'une hausse modeste du taux de chômage. Les zones géographiques plus pauvres ou davantage émettrices de GES seraient plus affectées que les autres. Par conséquent, selon les études empiriques macroéconomiques, la décarbonation de nos économies peut aller de pair avec une hausse du chômage.

Dans la mesure où il est douteux que la taxation du carbone impacte grandement l'offre de travail, le message dominant quant aux effets du SCEQE diverge donc selon qu'on se place au niveau microéconomique, régional ou macroéconomique. Il n'est pas certain que les différences de période couverte soient un facteur d'explication majeur : entre 2012 et 2017 le prix d'échange de quotas d'émission est en effet resté faible ; il a seulement augmenté à partir de janvier 2018 [247] ; cela dit, le mécanisme d'attribution des quotas d'émissions a dans une large mesure changé après 2012. Pour concilier les résultats sur données d'entreprise et ceux au niveau agrégé, Känzig (2025) privilégie une autre explication : celle des effets induits du SCEQE sur les prix dont les effets ne sont pas captés par les analyses microéconomiques. A l'appui de cette thèse, il cite une littérature mettant en évidence que les variations de prix du carbone se répercutent sur le prix de l'électricité et une autre sur

246. Citant les recommandations de l'OCDE et l'Agence internationale de l'énergie, Coenen et al. (2024) évoquent en effet un prix de 140$/tonne de CO_2 équivalent en 2030 afin de se conformer à l'objectif de réduction des émissions des GES. Ce niveau est bien supérieur à ceux observés au cours des périodes d'observation exploitées par les analyses économétriques.

247. Voir par exemple https://www.homaio.com/post/what-drives-the-eu-ets-carbon-allowance-price.

les effets macroéconomiques néfastes des hausses de prix énergétiques (en l'occurrence sur le PIB).

Comme certaines entreprises sont plus affectées que d'autre par une taxation du carbone d'un niveau non négligeable, la question de la réallocation induite des emplois et des travailleurs apparait importante. Elle sera traitée au chapitre 15.

Au sein d'un pays riche, une taxation du carbone pèse relativement plus sur les dépenses et sur les revenus des ménages au bas de la distribution des revenus que sur ceux situés dans la haut de la distribution. A côté d'un effet redistributif direct, il paraît exister en Europe un effet induit important via les rémunérations des travailleurs. Que ce soit au nom d'arguments éthiques (André, 2026) ou par souci de l'acceptabilité socio-politique de la taxation du carbone (Maestre-Andrés et al., 2019), son effet régressif peut être corrigé en redistribuant une partie ou la totalité des revenus de la taxe sur le carbone. Il demeure cependant difficile de prendre en compte toute l'hétérogénéité qui marque les conditions d'existence (comme l'isolement géographique, par exemple). Par ailleurs, en plus des effets redistributifs en termes de revenus, divers auteurs soulignent l'importance du processus par lequel ces effets sont atteints. Ils recommandent d'impliquer toutes les parties concernées dans le processus de conception de la taxe et des mécanismes de redistribution des recettes générées.

10.5 Le rôle des subventions

En complément ou en lieu et place d'une taxation du carbone, des mesures subventionnent le déploiement de l'énergie décarbonée. Cela peut par exemple prendre la forme de subventions à la recherche et au développement ou de tarifs de reprise d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables. De telles mesures s'observent en particulier lorsque ces énergies renouvelables ne sont pas encore rentables comme alternative à l'énergie carbonée. La garantie de tarifs de reprise au-dessus du prix du marché durant une période suffisamment longue stimule l'investissement des ménages et des entreprises dans ces technologies. Le financement de cette garantie peut prendre la forme d'une surcharge de prix de l'électricité payée par les consommateurs ou par une partie de ceux-ci. En Allemagne, par exemple, de 2000 à 2022, le Renewable Energy Sources Act (Erneuerbare-Energien-Gesetz) a soutenu la production d'électricité renouvelable par un tel tarif de reprise. La surcharge a varié de 0,19 €cents en 2000 à 6,76 €cents en 2020. Pestel (2019) résume les connaissances à propos de ces systèmes garantissant des tarifs de reprises pour l'électricité renouvelable financés par une augmentation de prix à charge des consommateurs d'électricité. D'une part, cela crée des emplois dans la production d'énergie renouvelable (avec, néanmoins, une fuite plus ou moins grande à l'importation en particulier en provenance de Chine). D'autre part, le prix accru payé par les consommateurs d'électricité a des effets induits sur l'emploi dont il a été question au chapitre 9. En outre, la stimulation d'investissements

dans la production d'électricité renouvelable peut évincer d'autres types d'investissement. En s'appuyant en particulier sur l'expérience allemande, Pestel (2019) conclut que l'effet net sur l'emploi serait positif mais petit et que donc l'argument principal en faveur de ce mécanisme est la réduction de la pollution (polluants atmosphériques et GES). La littérature plus récente est par exemple couverte par Fredriksson (2025).

Chapitre 11

Analyse macro-économique et macro-sectorielle de la décarbonation

L'analyse micro-économique des effets du prix des énergie et de taxes carbone sur le marché du travail va maintenant être complétée par une analyse macro-économique des politiques de décarbonation. L'éventail des politiques considérées variera d'une étude à l'autre mais il inclura un renchérissement des énergies fossiles.

Bien que l'analyse scientifique du changement climatique se soit développée il y a déjà longtemps sans que les économistes n'y prennent initialement une part active, il existe à présent tout un éventail de modèles macro-économiques ou macro-sectoriels cherchant à quantifier les conséquences de politiques visant à réaliser d'importantes réductions des émissions de GES. Le nombre de modèles développés est trop grand que pour en faire un inventaire exhaustif. L'approche retenue consiste à contraster les messages principaux de quelques modèles économiques bien différents entre eux[248]. La présentation se limite à quelques études qui explicitent un impact sur des indicateurs du marché du travail ou sur les inégalités de revenus[249]. La présentation de ces modèles complexes sera succincte. Les références indiquées permettront cependant d'accéder à une description plus précise. L'exploitation de ces modèles exige que l'on attribue une valeur à un grand nombre de paramètres. Ceci s'effectue à l'aide d'estimations économétriques (sur base, donc, de séries statistiques historiques) ou selon une approche de calibration[250]. L'annexe 2.A du rapport de l'OECD et UNDP (2025) offre un résumé qui complète la synthèse ci-dessous. Cette

248. Ces modèles sont distincts des Integrated Assessment Models (introduits dans l'encadré 6) notamment par l'absence d'une fonction de dommage et d'un modèle climatique. De plus, en règle générale, les mesures de lutte contre le réchauffement climatique n'ont pas la prétention de maximiser un objectif intertemporel collectif. Par ailleurs, certains modèles considérés dans ce chapitre ne s'appuient pas sur des décisions qui maximisent les objectifs des ménages et ceux des entreprises.

249. Parmi les articles non résumés figurent Coenen et al. (2024) et Garcia et al. (2026) qui insistent notamment sur les liens entre les politiques de décarbonation, l'inflation et la politique monétaire.

250. Voir la note de bas de page 30.

annexe s'intéresse à l'impact sur le PIB.

Chaque étude présentera des prédictions (c'est à dire des simulations du modèle construit) dans un "scénario de référence" et dans un ou plusieurs scénarios alternatifs visant à atteindre des objectifs de réduction accrue des émissions de GES. Le scénario de référence et les scénarios alternatifs sont propres à chaque étude, ce qui complique la comparaison entre elles. Dans leur annexe 2.A, OECD et UNDP (2025) soulignent aussi cette difficulté. Les études évoquées font abstraction de la pandémie de la Covid-19, qui a engendré temporairement une chute de l'activité économique et des émissions de GES, suivie d'un important rebond de l'activité économique. Par ailleurs, des innovations technologiques possibles (les puits artificiels de carbone, la capture de divers gaz, l'injection de soufre dans la stratosphère, etc.) ne sont pas non plus pris en compte par les modèles considérés dans cette section [251].

Ce chapitre aborde d'abord quelques études relatives à la décarbonation de l'Europe. Ensuite il synthétise une étude relative au monde et un autre relative au G20. Après un résumé des acquis et des divergences rencontrés dans les deux premières sections, ce chapitre traitera des effets de deux mesures phares en Amérique du Nord : "l'Inflation Reduction Act" introduit en 2022 aux États-Unis et la tarification du carbone combinée à des crédits d'impôts ciblés au Canada à partir de 2019 [252]. Une section finale étendra l'éventail des approches.

11.1 Quelques études relatives à l'Union européenne

En préambule, il est utile de situer quelques ordres de grandeur. Le Système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE) couvrait en 2019 des secteurs qui représentaient 64% des émissions territoriales de CO_2 mais moins de 6% de l'emploi total de l'Union européenne (mesuré en nombre de personnes) [253]. Au sein des secteurs couverts par ce système, le transport terrestre, la production d'électricité à partir de charbon et de gaz et le transport aérien représentaient à eux seuls 61% des émissions mais seulement 1,4% de l'emploi. Au sein de ces mêmes secteurs, l'emploi se trouvait surtout dans des secteurs industriels intensifs en énergie carbonée comme la sidérurgie, les cimenteries, les verreries ou la production de papier, par exemple. Plus précisément, ces secteurs industriels

251. Mais leur rôle peut être pris en compte sous la forme d'une moindre exigence en termes de réduction des émissions GES.

252. Il n'est pas possible de couvrir ici toutes les régions du monde. Valero (2025) étudie les retombées sur le marché du travail d'un scénario d'annulation des émissions nettes de GES au Royaume-Uni. World Bank Group (2022) se penche sur les objectifs 30-60 de la Chine (atteindre le pic d'émissions de GES avant 2030 et la neutralité carbone avant 2060) avec quelques éléments d'information relatifs au marché du travail.

253. Comme toutes les installations dans les entreprises d'un secteur ne sont pas concernées par ce système, l'information suivante apporte une nuance importante : en 2022, les installations couvertes par le SCEQE représentaient 37% des émissions totales de l'Union européenne (European Environment Agency (2024b), p. 22).

occupaient 3% de l'emploi total mais étaient responsables de seulement 1% des émissions (Borgonovi et al., 2023, p. 17). La figure 11.1 complète ces informations. Elle suggère qu'une décarbonation des économies européennes n'aura d'impact *direct* que sur une part modeste de l'emploi total. Il importe d'ajouter que le déclin d'activités (industrielles) intensives en carbone aura des effets induits sur le reste de l'économie.

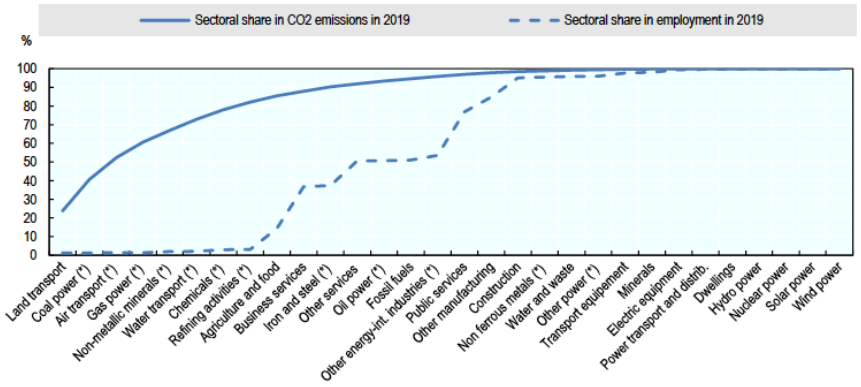


FIGURE 11.1 – Parts cumulées des émissions de CO_2 et de l'emploi sectoriels au sein de l'Union européenne. Source : Figure 2.1 de Borgonovi et al. (2023).

Les secteurs sont classés par niveau absolu décroissant d'émissions de CO_2. Les secteurs suivis du symbole (*) participent en 2019 au Système communautaire d'échange de quotas d'émission. Le secteur appelé "Fossil Fuels" ne couvre que l'extraction de charbon, de pétrole et de gaz. Le secteur "Agriculture and food" couvre l'agriculture, la sylviculture, la pêche et l'industrie alimentaire.

Eurofound (2019) est la première étude considérée. Elle contraste un scénario de référence caractérisé par un "business-as-usual" (encore appelé "baseline scenario")[254] et un scénario alternatif compatible avec l'objectif d'une hausse de la température inférieure à 2°C par rapport à l'époque pré-industrielle[255]. Ce scénario alternatif, appelé l'"energy scenario", s'applique dans le monde entier mais l'essentiel des résultats concerne l'Union européenne. En bref, cet energy scenario se distingue par un prix du carbone fixé à 155$/tonne de CO_2 à l'horizon 2050[256], des programmes publics subventionnant l'efficience énergétique des ménages, de l'industrie et des commerces, un programme de subvention des énergies renouvelables dans les systèmes de production d'électricité et un ensemble de dispositifs de taxation et de régulation dans le secteur des transports. Des instruments fiscaux

254. Défini dans le rapport Cedefop et Eurofound (2018). Ce scénario de base utilise les projections de population d'Eurostat réalisées en 2015 et les perspectives de croissance du PIB disponibles en 2017, à savoir un taux moyen de croissance de 1,9% par an entre 2015 et 2020, diminuant à 1,4% entre 2020 et 2030 (p. 18 de ce rapport). Dans ce scénario de référence les émissions de GES continuent à croître de 2015 à 2030 (voir la figure 2 du rapport d'Eurofound, 2019).

255. Les auteurs estiment que cet objectif est respecté avec une probabilité de 2/3 seulement.

256. Il s'agit de dollars américains de 2012.

sont ajustés afin que la situation budgétaire des gouvernements nationaux soient la même dans les deux scénarios.

Encadré 10 *Brève introduction au modèle E3ME.*
L'oeuvre de Keynes a donné lieu à diverses interprétations. L'approche post-Keynésienne est l'une d'entre elles. Cambridge Econometrics (2022) est la source de ce qui suit.
Les décisions économiques se prennent en présence d'"incertitudes radicales". Ceci signifie non seulement que le futur est incertain mais surtout qu'il n'est pas possible de décrire les facteurs aléatoires par une distribution de probabilité. En l'absence d'une telle description du futur, l'approche post-Keynésienne renonce à s'appuyer sur des comportements micro-économiques où les agents optimisent rationnellement face à l'incertain (comme le détaillent Jensen et Traeger, 2024, ce n'est pas la seule attitude possible). Une autre caractéristique centrale de cette approche est le rôle moteur joué par la demande agrégée de biens et services. Etant donné celle-ci, l'offre s'ajuste sous un ensemble de contraintes. Tant les travaux de Keynes que le mouvement post-Keynésien se sont développés à une époque où les préoccupations environnementales étaient absentes. La version du modèle E3ME utilisé pour le rapport d'Eurofound (2019) ne prend en compte que les contraintes d'approvisionnement physique en énergie. Dans ce modèle, la terre est divisée en 59 régions. Les comportements des acteurs économiques sont décrits par des relations mathématiques dont les paramètres sont estimés à partir de données historiques.

La comparaison des effets des deux scénarios résulte de la simulation du modèle E3ME de Cambridge Econometrics. Ce modèle économétrique est d'inspiration post-Keynésienne. L'encadré 10 introduit brièvement cette approche et le modèle E3ME. Quelques résultats émergent en comparant l'energy scenario au scénario de référence, les informations quantitatives portant sur l'année 2030 :

— Le PIB (réel) de l'Union européenne des 28 (UE28) [257] serait supérieur d'1,1%. L'écart varierait d'un pays à l'autre et serait d'environ 2% en Allemagne et en Belgique, d'environ 1% en France, en Espagne et au Portugal et de moins d'1% en Italie et dans les pays nordiques.
— L'impact sur l'emploi serait légèrement positif et d'environ 0,5% au niveau de l'UE28. L'écart diffèrerait selon les pays avec une hausse d'un peu moins d'1 % en Belgique, en Espagne et en Allemagne, de 0,5% en Italie et de 0,4% en France. En raison de son recours intensif à des énergies carbonées (dont le charbon), seule la Pologne subirait une très légère baisse de l'emploi.
— Au niveau de l'UE28, l'effet relatif sur l'emploi est fort contrasté selon les secteurs d'activités : de +1,1% dans le secteur de la construction à -2,4% dans le secteur englobant l'énergie, l'eau et le traitement des eaux usées et -16,6% dans les industries extractives (avec ici aussi un impact hétérogène selon les pays).

257. Le Brexit n'est pas pris en compte par cette étude.

Quand il s'agit d'affiner les conclusions aux niveaux salarial, éducationnel ou des tâches, l'analyse fait l'hypothèse forte qu'à l'intérieur de chaque secteur, la structure de l'emploi est la même dans le scénario de référence et dans l'energy scenario. Quelques éléments émergent du rapport :

— La croissance de l'emploi dans le secteur de la construction (où le niveau des salaires est intermédiaire) explique que la polarisation de l'emploi est plus marquée dans le scénario de référence que dans l'energy scenario. Par polarisation de l'emploi, on entend que l'emploi se développe parmi les bas et les hauts salaires et se contracte au milieu de la distribution.

— "Much of the employment created is at the bottom and the middle of the wage distribution. These jobs, to a greater extent than in the baseline forecast, are filled by low to medium educated employees and involve performance of less advanced tasks." (p. 1)

Cette dernière conclusion est tout particulièrement à garder à l'esprit. Si l'on résume le message à l'extrême, cet exercice prédit un petit effet positif sur le niveau de l'emploi, une réallocation sectorielle (de l'activité économique et donc de l'emploi) et des perspectives encourageantes d'accès à l'emploi pour les travailleurs peu ou moyennement rémunérés. Cette dernière propriété est le pur reflet de l'évolution sectorielle de l'emploi prédite par le modèle E3ME car la structure de l'emploi sectoriel est par hypothèse figée. Cependant, comme l'indique le rapport d'Eurofound (2019), le modèle E3ME ignore l'existence de frictions sur le marché du travail. Autrement dit, ce modèle ignore les difficultés d'appariement entre les emplois vacants et les personnes à la recherche d'un emploi et les coûts de formation et de reconversion des travailleurs.

Contrairement à l'études de Eurofound (2019), celle de Varga et al. (2022) nous informe sur l'impact d'un renforcement des réductions des émissions par rapport à une trajectoire de référence déjà exigeante. Les scénarios étudiés supposent tous que l'Union européenne ('UE') est la seule à agir, le reste du monde demeurant passif sur le plan des émissions. Le scénario de référence prend pour acquis les mesures d'atténuation des émissions de GES existantes en 2020. Celles-ci impliquent déjà une réduction des émissions de GES de 45 (respectivement, 58%) au niveau de l'UE à l'horizon 2030 (respectivement, 2050) par rapport à leur niveau de 1990. Afin que les émissions nettes de GES deviennent nulles en 2050, l'objectif pris en compte par Varga et al. (2022) est de réduire de 94% les émission de GES à l'horizon 2050 [258]. Parmi les scénarios alternatifs étudiés par ces auteurs, il en est un qui introduit une taxe sur les émissions de GES (une taxe par tonne d'émission de GES d'environ 100$ en 2030 à 600$ en 2050). Les variantes portent sur la manière de redistribuer les recettes de la taxe carbone. A côté d'un point de référence (le recours à des transferts

258. L'objectif de neutralité carbone en 2050 est supposé atteint grâce à la prise en compte des puits de carbone (que le modèle utilisé ne représente pas).

forfaitaires), Varga et al. (2022) considèrent une réduction de l'impôt sur les revenus des ménages ciblée sur les travailleurs les moins qualifiés, une baisse de la taxation sur la consommation et deux formes de subvention à l'investissement (excluant le "capital sale", notion introduite dans l'encadré 11). Pour l'analyse de ces scénarios, Varga et al. (2022) exploitent une extension du modèle QUEST III appelé E-QUEST, introduit dans l'encadré 11.

Venons-en à quelques résultats de simulations. Les revenus de la taxe carbone sont d'abord croissants puis ils décroissent. Comparé au scénario de référence, l'impact relatif sur le PIB (réel) de l'UE est négatif (après parfois une période où l'effet est très faiblement positif). En 2050, le PIB est entre 0,5 et 2,0% plus faible que dans le scénario de référence. En termes d'écart de l'emploi entre 2020 et 2050, toutes les simulations prédisent un écart mineur (dans l'intervalle $-0,05\%, +0,05\%$), sauf celui qui recourt à un allègement de la fiscalité sur le travail peu qualifié afin de redistribuer les recettes de la taxe carbone : dans ce cas, l'emploi augmente d'au plus 0,15% vers 2035, mais cet effet s'estompe ensuite [259]. A l'horizon 2050, la chute de l'emploi de l'UE se situe selon les modalités entre 0 et 0,02%. Trois niveaux d'études sont distingués, mais la composition intra-sectorielle est par hypothèse figée si bien que l'impact mesuré est uniquement le reflet de l'évolution de l'emploi sectoriel [260]. En 2050, les peu scolarisés [261] subiraient une baisse de l'emploi située entre - 0,02 et - 0,07%. Les personnes titulaires d'un diplôme de niveau intermédiaire [262] subiraient une baisse de l'emploi située entre 0 et - 0,02%. Enfin, l'emploi des titulaires d'un diplôme de l'enseignement supérieur varierait dans l'intervalle $[-0,01\%, +0,01\%]$. En résumé, le renforcement des mesures par rapport à ce qu'elles étaient en 2020 impacte très faiblement l'emploi. Contrairement au rapport de l'Eurofound (2019), les perspectives sont cependant moins bonnes pour les moins scolarisés. En 2050 toujours, les salaires réels simulés seraient plus bas que dans le scénario de référence. L'impact est plus important que dans le cas de l'emploi puisqu'il se situe dans l'intervalle $[-0,09\%, -1,6\%]$.

259. Ce résultat est en lien avec la notion de double dividende évoquée au début du chapitre 10.
260. Voir le tableau 6 de l'article.
261. Titulaires d'un diplôme inférieur au niveau des études secondaires supérieures.
262. Titulaires d'un diplôme égal au niveau des études secondaires supérieures.

Encadré 11 *Brève introduction au modèle E-QUEST.*
Il s'agit d'un modèle dynamique d'équilibre général stochastique néo-Keynésien (connu sous l'abréviation "DSGE"). Les agents optimisent leurs décisions sur tout l'horizon de temps en présence de chocs aléatoires probabilistes. Les attentes sont rationnelles (usage optimal de toute l'information disponible). Le modèle distingue trois types de main d'oeuvre substituables, caractérisés chacun par un groupe de niveaux d'études. Les ménages consomment un éventail de biens et services substituables (voir figure 1 de Varga et al., 2022) et décident des quantités offertes de chaque type de travail. Une part des ménages connaît des contraintes de liquidité : contrairement aux autres ménages, elle n'a pas accès aux marchés financiers. Les firmes produisent des biens et services différenciés et interagissent dans un cadre de concurrence imparfaite (la concurrence monopolistique).
La version du modèle utilisée par Varga et al. (2022) distingue deux régions : l'Union européenne et le reste du monde. Outre le travail, le capital et un un agrégat d'inputs intermédiaires, la production utilise deux types d'énergies : un agrégat dit "sale" et un autre dit "propre". Le premier combine l'usage du capital avec de l'énergie fossile (on parle de "capital sale") tandis que le second combine l'usage du capital avec l'électricité ("capital propre"). Il y a sept secteurs entre lesquels la main d'oeuvre est parfaitement mobile. Parmi ces secteurs, un produit de l'énergie fossile et un autre de l'électricité avec de l'énergie fossile ou de l'énergie renouvelable. Cinq autres secteurs ont des propriétés différentes en termes d'émissions de GES. Le modèle recourt aux fonctions de production C.E.S. emboîtées (pour davantage de précisions, voir la figure 2 de Varga et al., 2022, et, pour une introduction, l'encadré 13). La négociation collective détermine les salaires. Plus précisément, le salaire est un coefficient de mark-up (supérieur à l'unité) multiplié par le salaire de réserve (sous lequel l'offre de travail est nulle). Le modèle introduit aussi un progrès technique exogène qui accroît l'efficacité technique de l'usage de l'électricité et des combustibles fossiles d'une part et celle de la production de capital "propre" d'autre part. A cela s'ajoute un progrès technique par apprentissage-sur-le-tas (learning-by-doing) présent dans le secteur de production de capital "propre". Le modèle explicite les coûts de réduction des émissions de GES. Il tient compte d'une contrainte sur le stock de ressources fossiles. Chaque région du monde a son autorité publique et son autorité monétaire. L'État paie des intérêts sur la dette publique et finance de la consommation et de l'investissement publics, des transferts, des allocations de chômage et des subsides à l'aide d'un éventail de taxes. Les politiques menées doivent être neutres du point de vue du budget de l'Etat. Pour plus de détails sur les propriétés de ce modèle macroéconomique, voir par exemple Burgert et al. (2020).

Prolongeons à présent ce survol des études relatives à l'Union européenne par une analyse exploitant divers modèles. En 2014, l'UE s'est fixé le double objectif de réduire les émissions de GES de 40% en 2030 et de 80 à 95% en 2050 (par rapport au niveau atteint en 1990). En 2019, le parlement européen et ensuite le conseil européen ont adopté l'objectif de neutralité carbone (la fin des émissions nettes de GES d'ici à 2050). Comme l'ambition de 2014 en termes de réduction des GES d'ici à 2030 se révélait incompatible avec la neutralité

carbone en 2050, à la fin de 2020, l'UE s'est donné pour cible une réduction des émissions de 55% en 2030 (par rapport au niveau atteint en 1990) ; d'où le nom d'"Ajustement à l'objectif 55" mieux connu sous sa dénomination en Anglais : "Fit-to-55" [263]. Afin de préparer cette décision, l'impact du *relèvement* de l'ambition à l'horizon de 2030 a été estimé via trois modèles pour la Commission européenne. Le scénario de référence incorpore notamment les politiques qui étaient d'application ou planifiées jusqu'en décembre 2019 [264]. Deux des modèles utilisés (E3ME et E-QUEST) ont été évoqués ci-dessus. Le troisième, appelé JRC-GEM-E3, est un modèle dit d'équilibre général calculable (voir l'encadré 12). Chaque modèle a simulé plusieurs scénarios de réformes combinant de la tarification du carbone (élargissement éventuel du SCEQE), impliquant des hypothèses d'utilisation des recettes fiscales, et des directives ou des normes à respecter (normes d'émissions des véhicules, taux d'isolation des bâtiments, etc.). Pour un indicateur d'impact donné (l'emploi, par exemple), ceci engendre un éventail d'effets pour chaque outil utilisé (voir la figure 11.2). Les scénarios de réformes sont décrits sommairement aux pages 43 à 45 du rapport de la European Commission (2020). En très bref, il s'agit d'élargissements du système d'échange de quotas d'émissions de GES [265], de mesures accroissant l'efficacité énergétique, stimulant le recours aux énergies renouvelables, ou encore des politiques visant l'utilisation des terres et la foresterie. Les scénarios étudiés combinent donc des mesures agissant directement sur les prix et d'autres qui sont de nature réglementaire. Certaines mesures entrainent des recettes fiscales (par exemple, la mise aux enchères des droits d'émissions de gaz à effet de serre), qui sont redistribuées à la population européenne.

La figure 11.2 indique que selon les modèles et les modalités précises prises en compte l'emploi total varierait à l'horizon 2030 entre - 0,3% et + 0,5% par rapport à un scénario de référence compatible avec la réduction des émissions de GES de 40% en 2030. Les conclusions plus pessimistes du modèle JRC-GEM-E3 se retrouvent au niveau de l'écart de PIB (réel) de l'Union qui, en l'occurence, est négatif. A l'opposé, le modèle E3ME conclut que le PIB est supérieur en 2030. Pour chaque modèle, la dispersion des prédictions dépend des scénarios précis étudiés. Par exemple, Weitzel et al. (2023) précisent que, comparé au scénario de référence, l'emploi baisse de 0,26% en 2030 lorsque le modèle JRC-GEM-E3 suppose que la concurrence est imparfaite sur le marché du travail [266] et que les recettes fiscales de la taxation du carbone sont redistribuées aux ménages de manière forfaitaire. L'effet légèrement positif de 0,06% est obtenu, lui, quand ces recettes servent au contraire à réduire la fiscalité sur le travail. Globalement, les divers modèles prédisent que le renforcement exigé

263. En complément aux travaux évoqués ci-dessous, Borgonovi et al. (2023) proposent une quantification des effet du paquet Fit for 55 sur l'emploi et les compétences au sein de l'Union européenne.

264. Comme l'expliquent Weitzel et al. (2023), il en découle que l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre de 55% en 2030 implique un surcroît de réduction des émissions de 13% par rapport au scénario de référence.

265. Voir le chapitre 10.

266. Par l'introduction d'une "wage curve", c'est à dire une relation (faiblement) décroissante entre le niveau de salaire réel et le niveau du taux de chômage.

des émissions de GES aurait en 2030 un faible impact sur l'emploi agrégé.

Encadré 12 *Les modèles d'équilibre général calculable tels que JRC-GEM-E3*
Ce type de modèle est une représentation agrégée de l'économie en situation d'équilibre. Les modèles d'équilibre général calculable combinent la structure abstraite d'équilibre général formalisée par Arrow et Debreu (où des acteurs économiques rationnels agissent au mieux de leurs intérêts propres) et des données économiques pour résoudre numériquement les niveaux de l'offre, de la demande et des prix qui soutiennent l'équilibre sur les marchés que le modèle représente. Ces modèles sont utilisés pour calculer les impacts de politiques ou de chocs sur l'économie. Diverses hypothèses simplificatrices sont imposées, comme par exemple l'existence d'une firme par secteur. Les possibilités de substitution au sein de la production et de la consommation sont représentées. La réactivité des variables endogènes (prix, production, salaires, emploi, ...) dépend de la valeur des paramètres du modèle. Une manière fréquente de fixer ces paramètres a été introduite à la note 30. Certaines extensions de cette approche de modélisation permettent d'introduire du déséquilibre sur certains marchés (en particulier, du chômage, comme l'explique la section 4.1 de Gray et al., 2023). Tant le modèle JRC-GEM-E3 que ceux introduits aux encadrés 13 et 16 permettent ces extensions. Le modèle JRC-GEM-E3 est davantage décrit par Weitzel et al. (2023). On peut aussi consulter le site suivant : https://joint-research-centre.ec.europa.eu/gem-e3/gem-e3-model_en.

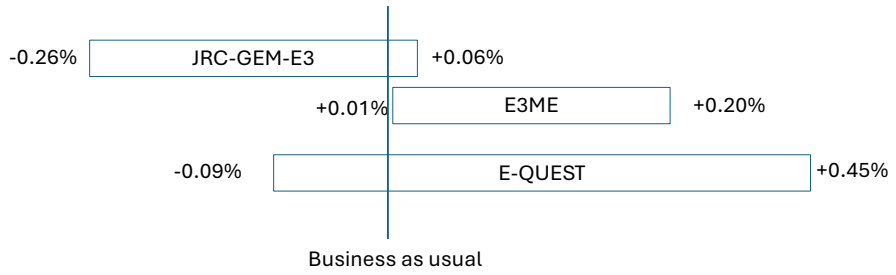


FIGURE 11.2 – Scénarios produisant la baisse de 55% des émissions comparé à un scénario de référence : impact relatif sur l'emploi en 2030 au sein de l'UE des 27 pays utilisant 3 modèles différents (JRC-GEM-E3, E3ME, E-QUEST). Sources : European Commission (2020) et Asikainen et al. (2021).

Le scénario de référence intègre les mesures prises par l'UE pour atteindre l'objectif de réduction des GES de 40% à l'horizon de l'année 2030 (objectif fixé en 2014). Les effets quantifiés dans le graphe ci-dessus se mesurent par rapport à cette référence. A l'échéance de 2030, la pandémie de Covid-19 ne joue pas de rôle majeur.

Comme l'indique la figure 11.3 l'emploi sectoriel est davantage affecté. Comme le scénario de référence implique déjà une réduction de l'emploi dans certains secteurs (en particulier celui du charbon), l'effet total à venir comparé au niveau d'emploi sectoriel actuel est encore plus fort. La concentration géographique des activités liées au combustibles fossiles (extraction, production d'électricité, ...) accroît l'acuité des problèmes au plan local.

Weitzel et al. (2023), qui exploitent le modèle JRC-GEM-E3, complètent les prédictions d'écarts d'emploi sectoriel par des prédictions par groupes de professions et de qualifications. Il s'agit des 9 groupes de la classification ISCO à un chiffre brièvement décrite à l'encadré 5. La méthode suivie consiste à superposer les projections d'évolutions des professions du CEDEFOP à celles de l'emploi sectoriel obtenues par le modèle JRC-GEM-E3. Notons que les projections du CEDEFOP n'ont pas été élaborées en vue de quantifier l'impact de mesures étudiées par Weitzel et al. (2023). Les changements dans la composition des métiers induits par ces mesures ne sont donc pris en compte qu'à travers les changements de composition sectorielle de l'emploi. Weitzel et al. (2023) distinguent neuf groupes de professions organisés en trois niveaux de qualification. Les conclusions générales sont les suivantes :

> "In all scenarios, relative employment changes are more favourable for low-skilled workers than of medium or high-skilled workers. Although low-skilled workers are only accounting for a minority in all occupation groups (...), their importance is higher in agriculture and construction – sectors that benefit from the transition. The extent of the skill reallocation is also dependent on policy design. When revenues [from carbon taxation] are used to lower labour taxes, low-skilled workers benefit most, especially when there are more revenues available (...) When the carbon price is high (...), medium and high-skilled workers instead have more employment gains with free allocation of permits, as auctioning leads to output losses in sectors with a relatively high share of workers with these skill classes." (Weitzel et al., 2023, p. 10).

Les politiques menées en Europe en vue d'atteindre la neutralité carbone en 2050 ont aussi des effets redistributifs. Hsiang et al. (2019) et Hänsel et Spiro (2025), par exemple, décrivent un éventail de raisons à cela. Notons que ce peut être tant via les bénéfices de ces politiques (sur, par exemple, la santé des populations) que via les coûts (baisse de pouvoir d'achat, par exemple) [267]. Fragkos et al. (2021) utilisent une extension du modèle GEM-E3 introduit à l'encadré 12 pour étudier les effets d'une taxation du carbone permettant à l'Europe et au reste du monde d'atteindre les objectifs de l'accord de Paris (compris comme un réchauffement d'au plus 2°C). Ascari et al. (2025) et Hochmuth et al. (2025) s'intéressent à ce thème à l'aide d'outils de modélisation mathématique de l'économie où les agents éco-

267. Les bénéfices comme les coûts peuvent être d'ampleur inégale au sein des populations ou être identique pour tous mais néanmoins affecter différemment les populations selon leur niveau de revenu, par exemple.

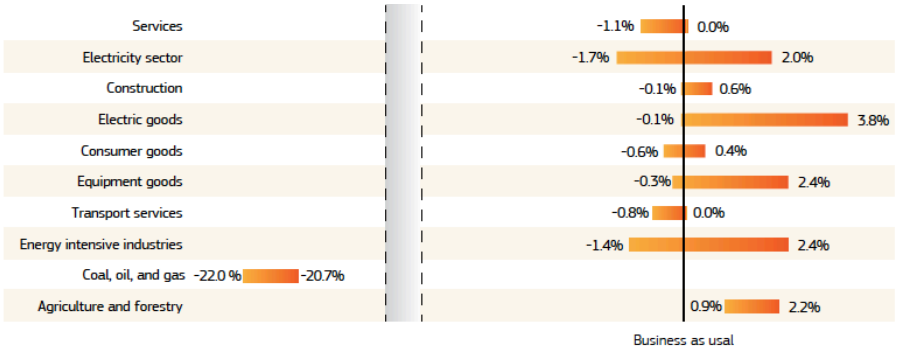


FIGURE 11.3 – Scénarios produisant la baisse de 55% des émissions en 2030 comparé à un scénario de référence réalisant une baisse de 40% : intervalles d'impacts relatifs sur l'emploi sectoriel en 2030 au sein de l'UE des 27 pays, simulés par le modèle JRC-GEM-E3. Sources : tableau 23 de European Commission (2020) et Asikainen et al. (2021).

La note sous la figure 11.2 s'applique ici également.

nomiques optimisent inter-temporellement. Les modèles utilisés par ces deux études sont davantage stylisés que ceux évoqués précédemment. La politique environnementale analysée étant la taxation du carbone, les résultats de ces trois études complètent ceux présentés au chapitre 10 [268]. Distinguant deux types d'agents, les pauvres et les riches, Hochmuth et al. (2025) étudient plus spécifiquement une taxation de la "technologie brune" dont les recettes financent une subsidiation de la "technologie verte" . La très forte augmentation de la taxation du carbone requise pour atteindre l'objectif de neutralité carbone réduit nettement le PIB chez Hochmuth et al. (2025), pénalisant les agents pauvres 50% plus fortement que les riches. Ce constat *qualitatif* en termes d'inégalités fait écho aux résultats obtenus pour les pays riches à la section 10.3. Cela dit, d'autres effets induits sur les diverses sources de revenus (via des dépréciations de capital, la politique monétaire, etc.) sont encore l'objet d'études [269].

Fragkos et al. (2021) et Ascari et al. (2025) étudient les différents usages possibles des recettes de la taxation du carbone. Chez ces derniers, lorsque l'État utilise ces recettes pour

268. La régulation environnementale a aussi des effets redistributifs mais ce thème est moins étudié. Voir toutefois Fullerton et Muehlegger (2019) et Hernandez Carballo et al. (2025b).

269. Comme la tarification du carbone entraîne une hausse de prix des énergies, elle accroît l'inflation. La réponse des autorités monétaires peut amplifier les effets négatifs sur les ménages au bas de la distribution des revenus (Bobasu et al., 2025). De manière plus générale, les effets redistributifs de la taxation du carbone apparaissent moins clairement établis à mesure que davantage d'effets indirects sont pris en compte (voir par exemple Ohlendorf et al., 2021, et Pröbsting, 2024). Dans une analyse macroéconomique relative aux États-Unis, Pröbsting (2024) simule les effets d'équilibre général d'une taxe carbone de $100/tonne et conclut que les revenus du capital chutent à court terme si l'on admet que le stock de capital existant et l'énergie sont des facteurs de production complémentaires.

financer ses dépenses courantes, les inégalités en termes de consommation, mesurées par l'indice de Gini, croissent [270]. Si les recettes servent au contraire à octroyer un transfert forfaitaire à tous les ménages, l'indicateur d'inégalité diminue. Ceci rejoint les conclusions de Budolfson et al. (2021). Le cas d'une réduction de la fiscalité sur le travail est envisagé par Fragkos et al. (2021) et par les analyses théoriques de Fullerton et Monti (2013) et d'Aubert et Chiroleu-Assouline (2019). Intuitivement, lorsque la taxation du carbone est régressive [271], utiliser les recettes fiscales générées par cette taxe pour réduire la fiscalité sur le travail peu qualifié augmente les revenus des travailleurs moins bien rémunérés et/ou élève la demande de travail pour ce type de main d'oeuvre. Ceci atténue à tout le moins le caractère régressif de la taxe carbone [272].

Toutes ces études relatives à l'Union européenne n'ont pas pu prendre en compte le fait que les plan nationaux en matière d'énergie et de climat annoncent des efforts insuffisants selon l'évaluation qu'en a faite la commission européenne à la fin de 2023 [273]. Par conséquent, le stock de GES qui peut encore être émis (si l'on veut limiter la hausse de la température moyenne à 1.5°C) se réduit encore. Selon la European Commission (2025a), l'objectif européen de réduction des émissions en 2030 est néanmoins accessible si toutefois les pays membres respectent leurs plans nationaux énergie-climat.

Au cours des années 2024 et 2025, le discours des autorités européennes a mêlé l'ambition de garder le cap en matière de réductions des émissions nettes de GES et le souci de ménager les intérêts défendus par divers groupes de pression. La préoccupation de la compétitivité de l'Union européenne est devenue centrale. Comme l'illustre le propos suivant, un doute s'est installé quant à la possibilité de concilier une multiplicité d'objectifs ou à propos des modalités de mise en oeuvre des ambitions environnementales européennes : "Most importantly, the "European Green Deal" was premised on the creation of new green jobs, so its political sustainability could be endangered if decarbonisation leads instead to de-industrialisation in Europe – including of industries that can support the green transition" (Draghi, 2024, p. 37). Après la publication de ce rapport influant, la sortie des États-Unis de l'accord de Paris, les politiques menées par son administration fédérale actuelle et

270. Concernant cet indice, voir par exemple Hindriks et Myles (2013) (p. 472).
271. Voir la note de bas de page 241.
272. Fragkos et al. (2021) concluent : "the modelling outcomes show that if ETS carbon revenues are redistributed via lump-sum transfers to households and via reduced social security contributions, they can redirect resources to low-income households and effectively reduce income inequality within EU countries, with strong progressive effects through disproportionately increasing the income of low-income classes" (p. 11). Ces résultats complètent ceux de la littérature sur le double dividende évoquée à la section 10.1.
273. "L'évaluation de la Commission révèle que les États membres sont sur la bonne voie, mais constate encore un déficit d'ambition pour atteindre les objectifs généraux et les objectifs spécifiques revus à la hausse pour 2030 dans les politiques en matière de climat et d'énergie." (EU wide assessment of the draft updated National Energy and Climate Plans COM(2023) 796 final, décembre 2023.) A ce propos, on consultera aussi le rapport de la European Environment Agency (2024a).

la menace de la Chine sur les plans industriel, commercial et des ressources rares sont venues renforcer l'inquiétude européenne. Tout ceci a conduit à une série d'ajustements des ambitions climatiques européennes dont la fin de l'encadré 2 s'est fait brièvement l'écho.

On ne peut que noter le contraste entre les débats et décisions européennes récentes et le message général des simulations de modèles macroéconomiques évoquées précédemment dans ce chapitre. Il n'y a pas de doute que des secteurs industriels européens sont en 2025 et 2026 menacés par le niveau de leurs coûts. Il est toutefois nécessaire de bien diagnostiquer les vraies causes de cette situation. La littérature scientifique résumée dans ce chapitre et dans les deux précédents suggère que les causes des problèmes de coût de l'industrie ne proviennent pas d'abord de la politique climatique européenne.

11.2 Etudes mondiales et centrées sur le G20

Parmi d'autres institutions internationales, le FMI exploite des instruments de modélisation permettant d'étudier les effets des mutations énergétiques et, plus largement, environnementales sur l'économie globale. Jaumotte et al. (2021) exploitent une extension d'un modèle d'équilibre général calculable (appelé G-cubed), introduit brièvement dans l'encadré 13.

Jaumotte et al. (2021) sélectionnent un scénario de référence ("baseline scenario"). Celui-ci s'appuie sur des projections (en termes de taille de population, de productivité sectorielle régionale, d'amélioration de l'efficacité énergétique) qui prolongent le passé. Dans le scénario de référence, les émissions de GES continuent à augmenter à un taux annuel moyen de 1,7%. L'amélioration de l'efficience énergétique et une certaine pénétration des énergies renouvelables ne parviennent donc pas à compenser les autres tendances en cours. En particulier, la croissance économique mondiale demeure positive mais elle s'affaiblit au fil du temps. Le scénario alternatif vise à atteindre l'objectif d'un niveau d'émission nette de GES nul en 2050. Ceci se traduit par une réduction de 80% des émissions brutes de GES liées aux besoins énergétiques [274]. Pour y parvenir, Jaumotte et al. (2021) envisagent en résumé seulement deux types d'interventions publiques : une tarification du carbone [275] et des politiques de soutien aux énergies bas carbone (une subvention de 80% de la production d'énergie électrique éolienne et solaire et un programme d'investissements publics directs en infrastructures [276] et en technologies, représentant, au départ, 1% du PIB (réel) et tendant linéairement vers zéro dix ans plus tard). Environ un quart des recettes de la taxe

274. Seules les émissions de GES du secteur énergétique sont prises en compte ici. Cette réduction est, par hypothèse, d'application dans toutes les régions, excepté un groupe de pays incluant les exportateurs de pétrole.

275. Les auteurs optent pour une taxe sur le carbone variant, au départ (en 2019) et selon les pays, de 6 à 20$ la tonne de CO_2. Cette taxe croit au taux de 7% par an pour atteindre 40 à 150$ selon les pays en 2050 (p.16).

276. Notamment, dans les secteurs de production d'énergie renouvelable et d'autres secteurs bas carbone ainsi que dans les infrastructures de transport.

carbone est transféré aux ménages afin de protéger leur pouvoir d'achat.

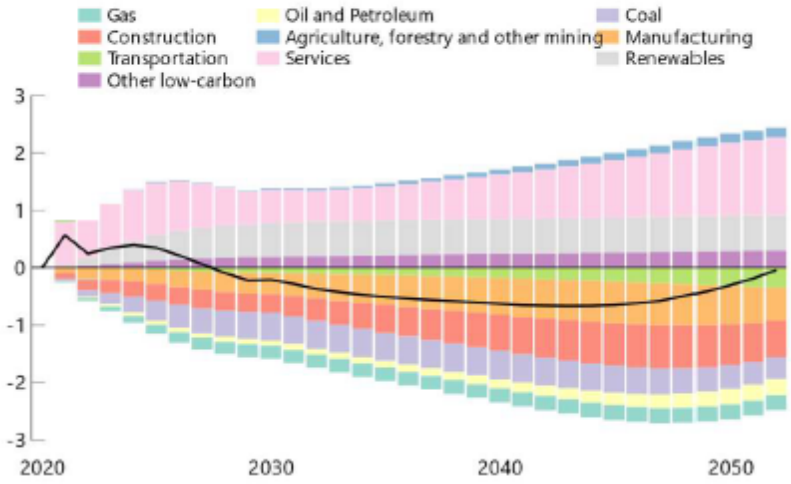


FIGURE 11.4 – Variation de l'emploi mondial par secteur : écart en % par rapport au niveau de l'emploi dans le scénario de référence. Source : Figure 6 de Jaumotte et al. (2021).

Le scénario de référence s'appuie sur des projections (en termes de taille de population, de productivité sectorielle régionale, d'amélioration de l'efficacité énergétique) qui prolongent le passé. Dans ce scénario, les émissions de GES continuent à augmenter à un taux annuel moyen de 1,7%. La courbe continue noire représente l'effet net sur l'emploi total. Dans la nomenclature utilisée par les auteurs, le secteur de la construction (en déclin) n'inclut pas les activités d'entretien et de rénovation des bâtiments.

En termes de résultats simulés, à l'horizon 2050, Jaumotte et al. (2021) obtiennent une diminution des émissions de CO_2 de 75% par rapport au scénario de référence. Qualitativement, la taxe sur le carbone a un effet négatif sur le PIB (réel) tandis que le reste de l'intervention publique agit en sens opposé. Globalement, le niveau de PIB (réel) est supérieur à celui de référence à raison de 0,7% après 15 années (en 2035). Par la suite, l'impact de la taxe carbone se fait davantage sentir si bien qu'en 2050 le PIB est plus faible d'1% par rapport à son niveau dans le scénario de référence. Cet effet négatif est donc faible. Il n'incorpore pas les effets induits favorables sur la santé et sur la nature. La figure 11.4 décrit l'écart du niveau sectoriel mondial de l'emploi par rapport au scénario de référence. L'investissement public initial stimule d'abord l'emploi mondial (à raison d'environ 12 millions de personnes en moyenne sur la période 2021-2027). Ensuite, l'écart devient négatif mais il disparaît par hypothèse[277] à la fin de la période simulée (2050). Le changement de structure sectorielle de l'emploi se maintient néanmoins à cet horizon. Les secteurs bas carbone

277. Car, comme indiqué dans l'encadré 13, le modèle postule qu'à long terme il n'y a aucun rationnement sur le marché du travail.

qui se développent sont typiquement plus intensifs en main d'oeuvre [278] que ceux, intensifs en carbone, qui se contractent [279]. De l'ordre de 2% des emplois sont ainsi réalloués des secteurs intensifs en carbone vers les secteurs bas carbone. Les auteurs mentionnent que cette réallocation pourrait être difficile pour les travailleurs mais ils n'approfondissent pas ce thème.

Encadré 13 *Brève introduction au modèle G-cubed.*
Le modèle G-cubed distingue 10 régions du globe et 20 secteurs (dont 8 secteurs représentant chacun un mode de génération d'électricité). La production est représentée par une technologie à élasticité de substitution constante (C.E.S.) à quatre agrégats : le capital, le travail un agrégat énergétique et un agrégat d'inputs intermédiaires. L'énergie et les inputs intermédiaires sont eux-mêmes une fonction C.E.S. de divers inputs. Dans l'exemple de l'énergie, ces inputs sont respectivement, l'électricité, le pétrole, le charbon, le gaz (ces derniers étant la source unique d'émission de CO_2, seuls GES prix en compte). L'électricité est elle-même une fonction C.E.S. de 8 inputs représentant chacun une source énergétique (le nucléaire, le solaire, l'éolien, le gaz, etc.). Ce type de représentation de la technologie porte le nom de fonction C.E.S. emboîtée. Dans ce modèle, les salaires sont caractérisés par des rigidités nominales. Moins le salaire nominal réagit rapidement aux variations du niveau général des prix, plus les rigidités nominales sont fortes. Les firmes recrutent jusqu'au niveau d'emploi tel que la productivité marginale équivaut au salaire réel du secteur correspondant. S'il y a un excès d'offre de travail, la population correspondante est en chômage. Le niveau de ce dernier joue un rôle de modération des salaires nominaux si bien que par hypothèse le marché du travail ne présente aucun rationnement à long terme. Le modèle s'écarte de l'approche habituelle en équilibre général par l'introduction de deux types de ménages. Le premier optimise ses choix tandis que le second applique des règles ad hoc qui ne correspondent pas nécessairement à leur optimum à court terme (mais bien à long terme). Le déficit public est exogène. Des taxes et transferts forfaitaires sont par hypothèse des instruments accessibles. Ce modèle est décrit à l'adresse `http://www.gcubed.com/software/g_cubed.html`.

Garaffa et al. (2023) situent leur analyse au niveau des pays du G20, qui en 2019 étaient responsables de 75% du total des émissions mondiales de GES. Ils considèrent leurs contributions nationales ("nationally determined contributions") à la Conférences des Parties COP26, leurs stratégies à long terme de développement à faible émission de gaz à effet de serre ("long-term low GHG emission development strategies"), et les actions immédiates complémentaires nécessaires en vue de réellement respecter l'Accord de Paris. La simulation des effets économiques s'appuie sur le modèle JRC-GEM-E3 déjà évoqué. Ils concluent : "Our results show that the macroeconomic costs associated with the decarbonized pathways amount to less than half a percent of the global GDP by 2040, with

278. Sans surprise, la construction, la production d'énergie renouvelable, les services.
279. Sans surprise également, la production d'énergie fossile, l'industrie lourde, le transport.

electrification moving jobs toward energy-intensive industry, construction, and manufacturing sectors and partially offsetting losses in fossil fuel sectors" (p. 1591). Ne traitant pas des freins à la mobilité des travailleurs, Garaffa et al. (2023) ajoutent : "the transition of jobs does not necessarily imply a direct transfer from one sector to another because skills are not directly interchangeable and may actually reflect that new workers entering the labor force follow a different career" (p. 1599).

11.3 Résumé

Ce chapitre a jusqu'ici survolé des simulations réalisées par des outils économiques différents et mettant en oeuvre des politiques économiques variées. La synthèse qui suit est donc à considérer avec circonspection. Qu'il s'agisse d'une comparaison avec un scénario de référence très peu soucieux des dégradations climatiques [280] ou avec un scénario déjà exigeant sur le plan de la limitation des GES [281], les modèles économiques abordés dans cette sous-section apparaissent livrer les messages généraux suivants :

- ☞ Du parcours d'un éventail de modèles très différents, il ressort que l'impact prédit d'une réduction volontariste importante des émission nettes de GES sur le niveau du PIB réel européen varie, selon les études et les scénarios de référence, le plus souvent entre - 2 et + 1% à l'horizon 2030 ou 2050. Par conséquent, les modèles exploités permettent et prédisent un découplage à tout le moins *relatif* entre la croissance et les émissions de GES. L'encadré 14 précise les notions de découplage dans le cas des GES. Il souligne qu'un découplage *absolu* massif est nécessaire s'il s'agit de respecter les objectifs de l'accord de Paris de 2015 (fixant des plafonds de réchauffement atmosphérique) [282].
- ☞ L'impact prédit d'une réduction nette des émission de GES sur le niveau de l'emploi en Europe est fort modéré tant que l'on s'en tient à une notion indifférenciée d'emploi. Une fourchette allant de - 1 à +1% est indicative.
- ☞ L'impact sur la composition sectorielle de l'emploi est bien plus marqué. Par exemple, Jaumotte et al. (2021) indique qu'au niveau mondial, de l'ordre de 2% des emplois sont réalloués des secteurs intensifs en carbone vers les secteurs bas carbone. Dans la

280. Eurofound (2019) et Jaumotte et al. (2021).
281. European Commission (2020), Asikainen et al. (2021) et Varga et al. (2022), Garaffa et al. (2023).
282. Les travaux relatifs au découplage exploitent fréquemment une identité comptable dite de Kaya :

$$\text{GES}_t = P_t \times \frac{\text{GES}_t}{\text{PIB}_t} \times \frac{\text{PIB}_t}{P_t}, \quad \text{où , } P_t = \text{la population l'année } t. \tag{11.1}$$

De cette identité nécessairement vérifiée, certains auteurs sont tentés de tirer un lien de causalité entre la variation dans le temps du PIB par tête et celle de l'intensité des émissions (GES/PIB). Or, étant une identité, la relation (11.1) ne permet pas un raisonnement en termes de lien de causalité.

mesure où les secteurs en déclin sont concentrés sur le plan géographique, la préoccupation engendrée par la réallocation des emplois et de la main d'oeuvre est donc fort variable d'une région ou d'un pays à l'autre.

☞ Dans le cas de l'Union européenne, les conclusions des études *divergent* lorsqu'elles désagrègent l'emploi selon d'autres critères que l'appartenance sectorielle. Selon Eurofound (2019), qui mesure des effets par rapport à un scénario de référence insoutenable de type business-as-usual, la transition économique serait porteuse d'emplois dans la moitié inférieure de la distribution des salaires. Weitzel et al. (2023) concluent que les travailleurs moins qualifiés sont les bénéficiaires des mesures de lutte contre le réchauffement climatique. Mais Varga et al. (2022) aboutissent à la conclusion opposée : les moins scolarisés pâtissent des réformes tandis que les diplômés de l'enseignement supérieur en bénéficient légèrement. Si l'on se limite aux deux dernières références (car elles mesurent des effets par rapport à un scénario de référence où le niveau de décarbonation est déjà non négligeable), le fait d'endogénéiser (Varga et al., 2022) ou non (Weitzel et al., 2023) les substitutions entre travailleurs de qualifications (ou de professions) différentes est probablement une source d'explication des différences de prédiction.

☞ Les changements dans la structure de l'emploi contribuent à déterminer l'évolution macro-économique des salaires réels. Seuls Varga et al. (2022) produisent une information explicite à propos de cet indicateur dans le cas européen. Alors que la composition de l'emploi par niveau d'études se modifie relativement peu, le renforcement des réductions des émissions de GES (par rapport à ce qui était convenu en 2020) réduit, chez Varga et al. (2022), les salaires réels. L'impact se situe dans l'intervalle $[-0,09\%, -1,6\%]$.

☞ En ce qui concerne les inégalités de revenus et de niveaux de consommation à l'intérieur des pays, les simulations macroéconomiques confirment, dans le cas européen, les résultats du chapitre 10 : la tarification du carbone accroît les inégalités mais cet effet peut être inversé par une redistribution appropriée des recettes fiscales.

Encadré 14 *Les notions de découplage.*
Bien qu'elle puisse porter sur d'autres indicateurs (comme les flux de matières ou d'eau utilisés), le notion de découplage est ici introduite dans le cas des GES (mesurés en tonnes d'équivalents CO_2)[a]*. Pour une entité géographique et sur une période données, deux modalités de découplage sont à distinguer (Hubacek et al., 2021, p. 2) :*

- *le découplage absolu désigne une baisse des émissions en termes absolus ou, cas exclu par Vogel et Hickel (2023), leur stabilisation alors que le PIB augmente ;*
- *le découplage relatif désigne une croissance des émissions plus faible que celle du PIB.*

De tels découplages, exprimés en termes de production ("production-based emissions" [PBE]) peuvent s'observer parce que de la production intensive en émission de GES est transférée à l'étranger. On parle alors de "fuites de carbone". Exprimées cette fois en termes de demande finale ("consumption-based emissions" [CBE]), il existe aussi deux notions de découplage – relative et absolue – et on parle alors d'"empreinte". La littérature sur le découplage est traversée de controverses (Parrique et al., 2019). Selon Hubacek et al. (2021), entre 2015 et 2018, 32 pays sur 116 ont réussi à réaliser un découplage absolu en production (23 pays en termes d'empreinte)[b]*. Cohen et al. (2018) décomposent le logarithme des émissions de GES et celui du PIB réel de 20 pays en une composante cyclique et une tendance sur la période 1990–2014. Ils régressent ensuite la tendance des émissions sur celle du PIB. Selon cette approche, un découplage absolu s'observe si la pente de cette relation entre les tendances n'est pas statistiquement différente de zéro ou est négative et significative (au moins au seuil de 10%). Dans le cas des émissions en production, le coefficient est par exemple significativement négatif dans le cas de le France, de l'Allemagne et du Royaume-Uni. Quand les auteurs s'intéressent à l'empreinte, seule l'Allemagne conserve un coefficient statistiquement négatif. Selon une méthodologie analogue et sur la période 1960–2018, Cohen et al. (2022) concluent à un découplage absolu (en production) seulement dans un petit nombre de pays riches*[c]*. La neutralité carbone en 2050 requiert cependant une baisse beaucoup plus rapide et massive des émissions qu'un simple découplage absolu. Pour chacun des 11 pays riches ayant connu un découplage absolu entre 2013 et 2019, Vogel et Hickel (2023) répartissent le budget carbone mondial (sur 2023–2050, compatible avec un réchauffement de 1,5 à 1,7°C, avec un déploiement modéré de technologies à émissions négative) selon leur part prévue dans la population mondiale. Ils calculent ensuite une trajectoire d'émissions (CBE) respectant ce budget carbone national. Si le PIB croit au rythme moyen entre 2013 et 2019, l'accroissement du découplage absolu requis est gigantesque. Si les Contributions Déterminées au niveau National sont suffisamment renforcées dans tous les groupes de pays, les simulations de OECD et UNDP (2025) prédisent un découplage absolu en termes de GES ; leur figure 2.2 prédit un retour au niveau des émissions de 1990 à l'horizon 2040 alors que le PIB mondial continue à croître). Ce renforcement n'est pas un acquis de la COP 30.*

a. En termes de matières, l'OECD (2019) conclut qu'on n'a pas historiquement observé de découplage et l'OECD (2025b) ne prévoit pas de découplage absolu d'ici à 2050 (p. 97). Voir aussi Haberl et al. (2020).

b. Simple comparaison entre la variation relative des émissions (PBE ou CBE) entre deux points du temps et celle du PIB. Sur la période 2005-2018, 5 des 25 principaux pays émetteurs de GES ont réalisé un découplage absolu en production (Girard et al., 2022).

c. Les conclusions des deux articles de Cohen et al. sont inchangées si le PIB est endogène.

11.4 L'Inflation Reduction Act et les mesures canadiennes

Passons à présent par l'évocation d'une étude relative à l'Amérique du Nord (Fournier et al., 2024)[283]. Elle s'intéresse aux mesures récentes et de grande ampleur mises en place aux États-Unis et au Canada et se demande comment celles-ci affectent les économies de ces pays ainsi que celle du Mexique, sachant que ces pays sont liés par un accord de libre échange commercial[284]. L'encadré 15 décrit brièvement les dispositifs étudiés : il s'agit de l'Inflation Reduction Act (IRA) aux États-Unis et d'un ensemble de mesures au Canada parmi lesquels on trouve une taxation du carbone croissant régulièrement au fil des années. Pour étudier l'impact de ces mesures, les auteurs exploitent un modèles d'équilibre général calculable appelé IMF-ENV. Ce modèle des régions du monde, décrit davantage par Château et al. (2022) et Château et al. (2025), distingue de nombreux biens et représente soigneusement le commerce international. Il postule la concurrence parfaite sur les divers marchés[285] et, contrairement aux modèles évoqués plus haut, a une représentation putty-clay de la technologie[286]. Le travail est un facteur de production homogène. Il est utile de savoir que la part du commerce international qui résulte d'échanges entre ces trois pays est d'environ 20% pour les États-Unis, 60% pour le Canada et 70% pour le Mexique. Le canal principal par lequel les mesures étudiées affectent ce commerce est celui des changements sur les marchés énergétiques. L'approche canadienne et celle des États-Unis se distinguent nettement par le fait que le premier pays privilégie la taxation du carbone tandis que le second a opté pour les crédits d'impôts, les subventions et les prêts. Tous effets pris en compte, les deux stratégies produisent des substitutions entre les modes de production énergétique mais, là où l'offre d'électricité au Canada baisse quelque peu, celle aux États-Unis augmente sensiblement. Comparé à un scénario de référence, le prix de l'électricité est en 2030 8% plus cher au Canada et il est 25% moins cher aux États-Unis.

Selon Fournier et al. (2024), l'IRA et les mesures prises au Canada ont un impact très net sur leurs émissions de GES :

> "In combination with existing policies, Canada's carbon tax and green subsidies, on the one hand, and the U.S.' IRA, on the other hand, would in total

283. D'autres travaux s'intéressent à l'impact sur la structure de l'emploi. Par exemple, Popp et al. (2021) évaluent l'effet sur l'emploi aux États-Unis des investissements "verts" de l'American Recovery and Reinvestment Act de 2009 : en particulier, des investissements d'infrastructure et dans la construction (visant à l'accroissement de l'efficience énergétique des bâtiments. Ils concluent que ces investissements ont principalement stimulé l'emploi manuel dans le secteur de la construction.

284. Le North American Free Trade Agreement.

285. Ce modèle ignore donc les frictions d'appariement entre les travailleurs et les emplois vacants. Pour une analyse des effets de l'IRA qui prend ces frictions en compte et montre leur importance, voir Adhikari (2025).

286. Ceci signifie que la substitution entre facteurs de production n'est possible qu'avant l'installation de la génération de capital ; une fois l'équipement placé, ces facteurs sont utilisés en proportions fixes. Cela permet donc de capter de manière plus réaliste le phénomène d'obsolescence de générations anciennes de capital productif lorsque, par la régulation ou par un prix du carbone, le coût des énergies fossiles augmente nettement.

> reduce GHG emissions by around 29 percent and 35 percent respectively (relative to 2005 levels) by 2030, compared to goals of a 40-45 percent and 50-52 percent decline, respectively." (p. 7)

L'effet sur les échanges internationaux entre les trois pays reste en revanche fort limité. Sans surprise, il se concentre dans le secteur énergétique et ceux qui sont à la fois intensifs en énergie et exposés au commerce international. Les parts de marché des États-Unis dans la production d'électricité, dans les secteurs du fer et de l'acier et des métaux non ferreux augmentent quelque peu et celles du Canada baissent quelque peu. Si les effets macroéconomiques sur l'emploi sont négligeables, les effets sectoriels sont plus marqués. En comparaison avec un scénario de référence, la figure 8 de Fournier et al. (2024) livre les ordres de grandeurs suivants en 2030 :

— Aux États-Unis le nombre d'emplois dans le secteur de l'électricité à base d'énergie renouvelable est supérieur de 40%, il baisse de 10% dans les secteurs de l'électricité à base d'énergie fossile et de l'extraction de telles énergies, l'impact dans les autres secteurs intensifs en énergie étant minuscule.
— Au Canada, le nombre d'emplois dans le secteur de l'électricité à base d'énergie renouvelable est supérieur de 12%, il baisse de 8% dans le secteurs de l'électricité à base d'énergie fossile et de 2% dans celui de l'extraction de telles énergies. L'emploi des autres secteurs intensifs en énergie baisse d'environ 3%.
— Les effets sur l'emploi au Mexique apparaissent négligeables.

Enfin, les "fuites de carbone" (un transfert de production intensive en émission de GES dans le reste du monde, suivi d'une importation des biens finaux correspondants) apparaissent fort peu importantes.

D'autres travaux portent sur la réalisation de l'objectif de neutralité nette en carbone à l'horizon 2050. Parmi ceux-ci, Becker et al. (2025) concluent que cet objectif est atteignable pour les États-Unis. En redistribuant de manière forfaitaire les recettes de la taxation du carbone, cette transition y réduit les inégalités de revenus.

Encadré 15 *L'Inflation Reduction Act (IRA) et les mesures canadiennes.*

L'IRA est essentiellement un ensemble de mesures d'encouragement à l'investissement dans la production d'énergies propres et dans le verdissement de l'industrie. Les mesures comprennent principalement des crédits d'impôt et, dans une moindre mesure, des subventions et des prêts. L'IRA est un vaste programme portant sur la production d'énergie décarbonée, l'efficience énergétique des bâtiments, l'agriculture, la préservation de l'environnement, l'électrification du parc automobile, la réduction de la pollution de l'air et l'innovation dans l'industrie. Une évaluation officielle récente mentionnée par Fournier et al. (2024) estime le coût total de l'IRA à 660 milliards de $. Au début de l'année 2025, l'administration fédérale a gelé les financements prévus par l'IRA. Certaines actions en justice en vue de bloquer les financements précédemment accordés sont en cours au printemps 2025. L'administration fédérale a, en 2025 et 2026, considérablement réduit la portée de l'IRA, mais certaines de ses mesures pourraient survivre. Pour un suivi approfondi, voir `https://iratracker.org/`.
L'approche canadienne afin de réduire les émissions de GES est différente. Elle s'appuie sur la taxation du carbone introduite en 2019 (initialement au niveau de 20 Can$/tonne en 2019 et en augmentation planifiée de 15 Can$/tonne par an). En réponse à l'IRA, le budget fédéral canadien de 2023 prévoit une augmentation sensible des incitations fiscales vertes. Les diverses mesures fiscales fédérales de soutien au verdissement de l'économie canadienne prises en 2022 et 2023 (et précisées par Fournier et al., 2024) devraient représenter un coût total d'environ 90 milliards de Can$ sur dix ans.
Bien qu'ayant introduit assez tôt une taxation du carbone, les dispositifs au Mexique n'ont pas de commune mesure avec ceux des deux autres pays. Ils ne sont donc pas détaillés ici. Signalons toutefois qu'un système de quotas d'émission échangeables a démarré en 2023, les quotas étant jusqu'ici alloués gratuitement.

11.5 Mise en oeuvre de narratifs de changements macro-économiques et comportementaux

Les simulations évoquées ci-dessus envisagent une gamme assez étroite de mesures incitant à la décarbonation. Il s'agit pour l'essentiel d'une tarification du carbone[287], et du recours à la réglementation ou à des subventions publiques. On est donc en droit de se demander si l'éventail des possibles entre lesquels les acteurs économiques ont à choisir au sein de ces modèles est suffisamment vaste. Des innovations comportementales, de procédé de production, etc. ne sont-elles pas exclues a priori ? La suite se fait l'écho d'efforts menés au niveau national pour élargir l'éventail des changements possibles (Berger et al., 2020, ADEME, 2021, ADEME, 2022). La suite se limitera aux travaux de l'ADEME française.

287. Taxe sur les énergies carbonées ou mécanisme de quotas d'émissions échangeables.

Etant donné une *cible* à atteindre (en l'occurrence, la neutralité carbone à l'horizon 2050), ce type d'approche commence par un processus de consultations de groupes de la société civile et d'experts en vue d'identifier un large éventail d'ajustements possibles de nos sociétés face au changement climatique. Ensuite, cet éventail est structuré en un nombre limité de "narratifs", c'est à dire de récits (qui ont une dimension symbolique) autour de *scénarios*[288]. "Les scénarios portent en eux des visions différentes du monde qui peuvent être nourries par différentes idéologies, au sens d'un ensemble plus ou moins cohérent d'idées, de croyances et de doctrines propre à une époque, une société, des individus et qui oriente l'action" (ADEME, 2021, p. 30). Ces scénarios de neutralité carbone sont "construits par itération en ajustant les hypothèses de transformations jusqu'à atteindre *la cible*" (ADEME, 2021, p. 27). Ce processus itératif s'appuie sur des outils de modélisation de l'économie semblables à ceux rencontrés jusqu'ici.

Quatre scénarios sont analysés de le rapport de l'ADEME (2021). Le scénario S1 est appelé "Génération frugale". C'est un exemple emblématique de scénario qu'on ne voit pas apparaître dans la littérature évoquée jusqu'ici dans ce chapitre. Les trois autres scénarios sont en revanche moins différents que ceux évoqués ci-dessus. Le narratif à propos du scénario S1 mentionne la frugalité choisie mais aussi contrainte, la division par trois de la consommation de viande, la rénovation massive et rapide du bâti, la limitation forte de la construction neuve, la réduction forte de la mobilité, le règne des *low-tech*, de la réutilisation et de la réparation, une stabilisation de la consommation des data centers ou encore un commerce international contracté (ces expressions étant issues de la page 9 d'ADEME, 2021)[289]. Pour quantifier les implications des scénarios, l'ADEME exploite notamment le modèle ThreeME qui est brièvement présenté à l'encadré 16. Il s'agit d'un modèle d'équilibre général calculable où les marchés sont régis par une forme de concurrence imparfaite.

288. Le GIEC recourt lui aussi à des narratifs. Ce sont les "Shared Socio-economic Pathways", c'est à dire des scénarios socio-économiques portant notamment sur l'évolution de la population, de l'urbanisation, du PIB et sur le forçage radiatif (l'écart entre le rayonnement solaire reçu et émis par la terre) en 2100.

289. Ce scénario est lié à la notion de sobriété ("sufficiency") définie par exemple en ces termes : "a set of policy measures and daily practices that avoid the demand for energy, materials, land, water, and other natural resources, while delivering a decent living standard for all within planetary boundaries" (`https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-9/`). Les défenseurs de la sobriété insistent sur le fait qu'elle ne concerne pas les populations pauvres du sud comme du nord de la planète. La notion de sobriété est parfois limitée à la consommation d'énergie : "La sobriété peut être définie comme la réduction de la demande d'énergie qui ne résulte pas de gains d'efficacité énergétique" (Pommeret, 2023). Elle englobe parfois également la réduction de la demande dans le secteur du logement (European Scientific Advisory Board on Climate Change, 2024).

Encadré 16 *Brève introduction au modèle TreeME.*
C'est un "modèle macroéconomique en équilibre général d'inspiration néo-keynesienne" (ADEME, 2022, p. 9). La formation des prix et des salaires s'inscrit dans la logique des modèles de concurrence imparfaite sur les marchés des biens et du travail, connus sous le nom de modèles "Wage setting - Price setting" (voir par exemple Layard et al., 1991). Le modèle distingue 37 secteurs, dont 17 secteurs énergétiques et 5 secteurs de transport. L'énergie est un input pour les entreprises comme pour les ménages. "Les ménages consacrent leur revenu disponible en premier lieu pour se loger et se déplacer, et utilisent dans un second temps le revenu restant pour les autres dépenses. (...) La demande d'énergie évolue en fonction des besoins de transport ou de chauffage et selon la variation des performances énergétiques du parc immobilier et automobile. Les ménages réalisent des arbitrages entre diverses classes énergétiques de bâtiments et de véhicules en fonction de leurs coûts d'usage respectifs" (Callonnec et Cancé, 2022, p. 21). La technologie est représentée à l'aide de fonctions de production standards à quatre inputs. Callonnec et al. (2013), Callonnec et Cancé (2022) et le site `https://www.threeme.org/` *fournissent plus de détails sur ce modèle.*

L'analyse des scénarios de l'ADEME porte sur la période 2021-2050. Dans le cadre du scénario S1, le PIB et le revenu disponible des ménages sont moins élevés qu'en 2021 et ce, jusque respectivement 2029 et 2028. En bref, les baisses cumulées de la construction neuve et des achats de véhicules et la réduction des capacités de production (en raison du repli sur le marché domestique) font plus que compenser le développement de la rénovation de bâtiments et les gains d'efficacité énergétique. En 2030 le niveau global de l'emploi est environ 10 points de pourcentage sous celui de 2021. Entre 2021 et 2030, la dette publique, qui croît déjà sensiblement plus vite que le PIB dans le scénario de référence de l'ADEME, s'envole dans le scénario S1 à consommation des administrations publiques inchangée[290]. En 2030, le taux de chômage est quasi 6 points de pourcentage supérieurs à celui du scénario tendanciel. Au-delà d'un seuil qui selon les indicateurs se situe entre 2028 et 2035, la tendance s'inverse. Bon nombre d'indicateurs s'améliorent entre 2030 et 2050. Selon l'ADEME (2022), ce revirement trouve ses origines dans une contraction des marges des entreprises et une pression à la baisse des salaires réels suite à la hausse du chômage. La compétitivité internationale des entreprises françaises s'améliore. En 2050, l'emploi est néanmoins quatre points de pourcentage plus bas qu'en 2021.

Certains auteurs rejettent toutefois le recours à des modèles économiques comme TreeME pour évaluer les conséquences de narratifs incorporant une croissance faible, voire une dé-

290. Sauf si la Banque centrale européenne jouait le rôle de prêteur et, donc, monétisait l'accroissement de dette publique, l'évolution prédite de l'endettement public devrait à tout le moins conduire à une hausse des taux d'intérêt demandés par les prêteurs. Les documents de l'ADEME consultés ne paraissent pas évoquer cela. Adoptant une modélisation très différente (au sein de l'école d'"ecological macroeconomics"), D'Alessandro et al. (2020) aboutit à la conclusion qu'un scénario de décroissance introduit en France en 2019 produirait entre 2035 et 2050 une élévation sévère du ratio entre le déficit public et le PIB (Figure 3d de cet article). Ceci rejoint *qualitativement* le message de l'ADEME.

croissance du PIB (Jackson et Victor, 2015, Jackson et Victor, 2020, D'Alessandro et al., 2020)[291]. Ces auteurs préfèrent élaborer des modèles mathématiques d'inspiration post-Keynésienne (voir l'encadré 10). Puisque l'hypothèse comportementale d'acteurs économiques qui maximisent un objectif est jugée inappropriée[292], les modèles développés par Jackson et Victor (2020) et par D'Alessandro et al. (2020) reposent sur un ensemble de relations comportementales jugées plausibles, captant par exemple des régularités historiques[293]. Le choix de ces relations comportementales et le déterminisme qu'elles peuvent induire sont une réelle source de préoccupation. Par ailleurs, même au sein de ces modèles, les répercussions sur l'emploi d'une croissance économique faible ou négative sont souvent défavorables[294]. Ceci conduit ces auteurs à introduire dans leurs narratifs différentes politiques qu'ils espèrent être correctrices. L'archétype de celles-ci est la réduction du temps de travail. Dans ces modèles, une telle réduction *volontariste*[295] engendre mécaniquement une hausse de l'emploi[296]. Or, la littérature scientifique internationale, notamment celle d'évaluation économétrique, n'aboutit le plus souvent pas à cette conclusion[297]. Bien au-delà

291. Notons qu'une forme de décroissance peut aussi apparaître dans des modèles adoptant les hypothèses standards d'agents économiques qui optimisent leurs décisions (voir par exemple Germain, 2017, Aghion et al., 2025).

292. Parce que la maximisation de l'utilité des individus (ou des ménages) conduirait nécessairement à la poursuite d'un objectif de croissance du PIB (Kallis et al., 2025, p. e67). Or, rien n'est moins évident car tout dépend des arguments de la fonction d'utilité et de ses propriétés mathématiques.

293. Ces modèles contiennent aussi un ensemble de relations permettant un traitement cohérent des stocks et des flux (de monnaie, d'énergie, etc.).

294. Plus généralement, cette littérature est consciente des défis posés par la décroissance sur le financement de l'État et de la sécurité sociale ainsi que sur les inégalités. A ce propos voir par exemple, Corlet Walker et al. (2021), Hartley et Kallis (2021) et Kallis et al. (2025). Naudé (2023) résume d'autres critiques de la littérature portant sur la décroissance.

295. Il est acquis que des gains de productivité du travail permettent une réduction du temps de travail (plutôt qu'une augmentation du salaire horaire) qui soit indolore du point de vue de l'emploi. Le qualificatif volontariste vise donc une réduction du temps de travail qui va au-delà de ce que les gains de productivité permettent, avec l'espoir, par exemple, de lutter contre un problème de chômage.

296. De surcroît, elle aurait des effets bénéfiques sur l'environnement. Shao et Rodríguez-Labajos (2016) synthétisent la littérature. Les études portant sur des données de pays concluent généralement qu'un accroissement du temps de travail est associé à une hausse des pressions sur l'environnement (différents indicateurs étant utilisés). Shao et Rodríguez-Labajos (2016) produisent ensuite leur propre analyse sur 55 pays (dont 37 pays riches). Cette analyse corrige plusieurs lacunes de la littérature antérieure. Pour les pays riches, tenant compte d'une série d'autres indicateurs, Shao et Rodríguez-Labajos (2016) concluent qu'il y a une corrélation positive entre la durée annuelle de travail par travailleur et les émissions annuelles de carbone par tête sur la période 1980-2000, mais que cette corrélation change de signe sur la période 2001-2010 (période où, en moyenne, la durée du travail par tête a baissé parmi ces pays). En guise d'interprétation, ces auteurs écrivent : "Increasing leisure hours in countries with higher average incomes tended to provide their inhabitants with increased opportunities to organize multiple and costly energy-intensive activities" (p. 233).

297. Parmi les évaluations scientifiques concluant que les effets d'une réduction du temps de travail ont été négatifs ou nuls sur l'emploi, citons Hunt (1999), Andrews et al. (2005), Skuterud (2007), Sánchez (2013), Kawaguchi et al. (2017). Raposo et van Ours (2010) (que contredisent Lopes et Tondini, 2022) et Taylor (2011) sont quelques évaluations scientifiques plus positives.

d'effets mécaniques, la réduction du temps de travail enclenche en effet un vaste ensemble de mécanismes complexes [298]. L'octroi d'une garantie d'un emploi de dernier ressort par l'État, offrant un salaire de base, est une autre mesure préconisée pour contrecarrer les effets d'une croissance faible ou négative sur l'emploi. Le coût net serait à charge de l'État. D'un point de vue organisationnel, la décentralisation du rôle de garant public serait souhaitable. Dans les pays riches qui octroient des allocations sociales à certaines personnes sans emploi mais aptes à en occuper un, cet emploi de dernier ressort deviendrait une obligation à accepter sous peine de perdre ces allocations (on parle de "workfare"). Plus ces emplois de dernier ressort s'approcheraient d'emplois non subventionnés générés par l'économie privée et plus la mobilité entre eux serait plausible mais plus aussi la pérennité de ces emplois privés serait remise en question. A l'inverse, plus ces emplois de dernier ressort s'éloigneraient d'emplois générés par l'économie privée et plus la population concernée risque d'être enfermée dans ces emplois de dernier ressort. Enfin, le financement public de cette garantie d'emploi est une source de préoccupation [299]. Les réponses aux effets induits de la décroissance sur l'économie et la société dans son ensemble demeurent un grand chantier inachevé.

298. En faire ici un inventaire nous emmènerait trop loin. Signalons néanmoins que les modèles mathématiques utilisés pour représenter les effets économiques de la réduction du temps de travail ne sont généralement pas plus favorables à cette politique que les analyses économétriques mentionnées dans la note de bas de page précédente. Prenant en compte le caractère fini des ressources naturelles, Fagnart et al. (2023) aboutissent toutefois à des conclusions plus favorables.

299. Que certains auteurs évacuent dans des contextes économiques et institutionnels précis (voir par exemple Olk et al., 2023). De leur côté, D'Alessandro et al. (2020) recourent à une taxation du patrimoine afin de limiter l'élévation du ratio entre le déficit public et le PIB dans un scénario de décroissance.

Chapitre 12

Analyse critique de l'approche macro-économique

La littérature économique appliquée du chapitre 11 a le grand mérite de quantifier les effets globaux de mesures prises en vue de décarboner nos économies. Cette quantification requiert un travail considérable et fort complexe pour étendre les modèles macro-économiques ou macro-sectoriels disponibles afin qu'ils puissent représenter de manière assez détaillée des phénomènes pertinents comme la consommation et la production d'énergie. Quel que soit le soin mis à leur élaboration, ces modèles économiques font cependant l'objet de critiques d'origines diverses. Ce chapitre en résume quelques unes parmi les plus importantes.

12.1 L'incertitude

Plusieurs modèles macroéconomiques sont développés dans un cadre déterministe. Or, étant donné l'horizon de temps pertinent, il est admis que les systèmes climatiques et économiques présentent des incertitudes majeures (voir, par exemple, Pindyck, 2021, Jensen et Traeger, 2024). De plus, la plupart des acteurs économiques ont de l'aversion au risque et les marchés d'assurance sont incomplets. Simuler un éventail de scénarios déterministes contrastés présente évidemment un intérêt. Mais cela n'équivaut pas à une modélisation où ces acteurs prennent leurs décisions face aux incertitudes (Jensen et Traeger, 2024).

D'autres modèles macroéconomiques incorporent explicitement des choix inter-temporels en incertitude. Généralement toutefois, l'éventail des réalisations possibles de phénomènes aléatoires est connu et à chaque réalisation est associée une probabilité. Lorsqu'il en est ainsi, on parle de risques. Dans le cas des systèmes climatiques et économiques et de leurs interactions, compte tenu de l'horizon temporel pertinent, on a de bonnes raisons de penser

que certaines réalisations possibles, leur impact[300] et/ou leurs probabilités sont imparfaitement connues[301]. Lorsqu'il en est ainsi, on parle d'ambiguïté ou encore d'incertitude profonde ou radicale. Il est alors permis de questionner le recours aux outils économiques de prise de décision en présence de risques car, dans ce contexte, ils manquent de fondements clairs. D'autres approches existent (voir Heal et Millner, 2018, Jensen et Traeger, 2024) mais leur mise en oeuvre est assez rare[302] et, à ma connaissance, les modèles macroéconomiques du chapitre précédent ne développent pas ces approches.

Cela dit, la majorité des exercices évoqués au chapitre 11 prennent pour acquis des objectifs fixés par la communauté internationale ou par certains de ses sous-ensembles afin de maintenir la température atmosphérique sous un seuil tel que les incertitudes demeurent contenues. La question traitée à l'aide de modèles est alors de savoir comment atteindre au mieux ces objectifs. Si les agents économiques représentés dans ces modèles sont convaincus que ces objectifs limitent l'incertitude à des risques auxquels des probabilités claires peuvent être associées, les fondements de ces modèles ne sont pas remis en cause[303].

Tous les exercices de simulation produisent une comparaison avec une situation de référence, qui décrit le contrefactuel, c'est à dire ce qu'il adviendrait à l'économie mondiale dans le cas d'actions insuffisantes pour lutter contre le réchauffement climatique et, plus largement, contre les dégradations environnementales. La construction de la trajectoire économique dans le contrefactuel peut, au moins dans certains cas, être mise en doute. En effet, plus le contrefactuel se rapproche d'un scénario insoutenable de business-as-usual, plus l'incertitude sur l'ampleur et la probabilité des dommages subis grandit. Il est dès lors peu plausible que les agents économiques se comportent face à une telle incertitude comme ils optimiseraient leurs choix face à un risque probabiliste.

12.2 L'ignorance de l'encastrement de l'économie dans la nature

Les outils disponibles prennent-ils bien la mesure de l'encastrement de l'économie dans la nature ? Pour Dasgupta (2021), la réponse à cette question est négative. Il écrit notamment :

> "The macroeconomic models of growth and development in use in finance ministries and planning commissions, however, do not acknowledge that material must balance – from source to sink." (Dasgupta, 2021, p. 126)

Ce reproche, que l'auteur partage avec les économistes écologiques, porte sur l'ignorance

300. En particulier, dans le cas d'événements extrêmes ou en présence d'un point de basculement ("tipping point").
301. Un processus d'apprentissage au fil du temps peut toutefois réduire ce degré d'imperfection.
302. Parmi les études citées par Jensen et Traeger (2024), voir par exemple Lemoine et Traeger (2016a) et Berger et al. (2017).
303. C'est en tout cas une manière de comprendre Stern et al. (2022), p. 206.

des lois de la physique et de la thermodynamique sous-jacentes aux relations technologiques de la toute grande majorité des modélisations économiques. Dasgupta (2021) ajoute

> "Contemporary models of macroeconomic growth and development do not necessarily overlook the fact that Earth is bounded, what they explore instead are production possibilities in which, by exercising sufficient ingenuity (read technological progress), humanity will be able to free itself from the biosphere's constraints." (Dasgupta, 2021, p. 127)

Ces deux citations nécessitent une explication. Elle se fera à travers la critique des fonctions de production habituellement utilisées, notamment par les modèles macro-économiques et macro-sectoriels évoqués au chapitre 11. La présentation se centrera sur le cas de la fonction de production Cobb-Douglas avec une brève évocation de spécifications plus générales. Même si l'argument vaut aussi au niveau microéconomique, on se place ici au niveau planétaire. La brève discussion ci-dessous présente un degré élevé d'abstraction. La section 3.1 de Döhring et al. (2023) en est un complément utile.

Dasgupta (2021) distingue trois facteurs de production : le travail L, le capital produit K et un flux N de biens extraits/fournis par la nature (eau, bois, poisson, minerais, énergie, etc.)[304]. Il explique que l'insertion de l'économie dans la biosphère requiert la prise en compte d'un stock S d'écosystèmes, appelé le "capital naturel". Ce stock $S \geq 0$, qui est un bien public, se régénère partiellement d'année en année. Mais en même temps, le capital naturel se réduit au gré de "l'empreinte écologique globale" qui résulte du flux N et du flux de déchets émis dans l'environnement par l'activité humaine (ce flux croissant avec la production Y). Dans de nombreux pays S décroît de manière lancinante. Sous peine d'assister à un effondrement planétaire, S ne peut passer sous un seuil strictement positif. Dasgupta (2021) retient la fonction de production Cobb-Douglas à élasticité de substitution unitaire et à rendements d'échelle constants :

$$Y_t = A_t\, S_t^{\beta}\, K_t^{a}\, L_t^{b}\, N_t^{1-a-b}, \quad \beta > 0,\ A_t > 0, 0 < a, b < 1, \tag{12.1}$$

où t désigne le temps. La "productivité totale des facteurs" K, L et N est le produit $A_t S_t^{\beta}$, où A_t est un paramètre qui reflète l'état des connaissances (technologiques, organisationnelles, ...) et S_t^{β} représente un ensemble de services procurés par le capital naturel, sans lesquels la production de biens et de services ne serait possible (cycles du carbone et de l'azote, régulation du climat, régénération des sols, etc.)[305].

La définition habituelle de la fonction de production Cobb-Douglas postule $\beta = 0$. C'est le cas envisagé dans les articles célèbres de Solow (1974) et de Stiglitz (1974). Pour percevoir

304. L'introduction de facteurs de production hétérogènes (par exemple, plusieurs types de travailleurs) n'est pas nécessaire pour développer l'argument.

305. La nature n'est ici prise en compte qu'à travers les biens et services qu'elle procure afin de produire des biens et des services de consommation. D'autres apports de la nature sont ignorés (dimensions esthétique, récréative, spirituelle, etc.). De plus, une diminution excessive du capital naturel présente même une menace pour la vie humaine sur terre.

les implications de cette hypothèse, notons PMN_t la productivité moyenne de N au temps t. La relation (12.1) s'écrit encore comme le produit suivant :

$$Y_t = \text{PMN}_t\, N_t, \quad \text{où } \text{PMN}_t = A_t\, S_t^{\beta} \left(\frac{K_t}{N_t}\right)^{a} \left(\frac{L_t}{N_t}\right)^{b} \tag{12.2}$$

Supposons que β puisse être nul et commençons par supposer que A_t est constant. Imaginons que les services N rendus par la nature tendent vers zéro. Alors, Y tend aussi vers zéro sauf si PMN tend vers l'infini (auquel cas il y a formellement une indétermination). Or, si N tend vers zéro, par sa définition dans l'expression (12.2), PMN tend vers l'infini pour toute valeur de K et de L strictement positive. L'élasticité de substitution unitaire de la fonction de production Cobb-Douglas conduit à cette propriété. Si l'on retient une fonction de production à élasticité de substitution quelconque, cette conclusion demeure vraie si cette élasticité est supérieure à 1. Au contraire, la PMN tend vers une constante finie si l'élasticité de substitution est inférieure à 1 (Solow, 1974, Fagnart et Germain, 2012, Döhring et al., 2023). Dans ce cas, si N tend vers zéro, Y fait nécessairement de même. On voit donc que l'aisance avec laquelle il est possible de substituer les facteurs de production est extrêmement importante.

Cela dit, A_t ne reste pas constant : le progrès technique et organisationnel, qui élève A au fil du temps, vient en renfort pour permettre l'augmentation de PMN et de Y. En bref, une élasticité de substitution au moins égale à 1 et le progrès technique sont des conditions nécessaires pour que "humanity will be able to free itself from the biosphere's constraints" si l'on postule que $\beta = 0$.

En revanche, si $\beta > 0$, la diminution de S_t induite par une empreinte écologique durablement trop forte entraîne une réduction de Y_t, voire un effondrement de Y_t si S_t passe sous un seuil[306]. Au-delà de son abstraction, ce débat est aussi complexe que crucial. Il ne s'en dégage pas une conclusion tranchée. Mais, le fait que la plupart des modèles macroéconomiques postulent que $\beta = 0$ est un choix qui préoccupe un ensemble de scientifiques (économistes et non économistes).

Tout ceci rappelle le débat déjà ancien entre Daly (1997) et, notamment, Stiglitz (1997). Pour ce dernier, "as long as the limits imposed by physics are far enough away, it is hoped that a model that neglects these limits will still be able to give a satisfactory description of growth in the medium term" (Germain, 2019, p. 169). Par une analyse économique formelle, Germain (2019) montre que cet espoir est à remettre en question[307].

Pour aller plus loin, il faut se demander ce que signifierait et modifierait une prise en

306. On peut se demander en quoi la formalisation quand β est strictement positif se différencie de la présence d'une fonction de dommage introduite à l'encadré 6. La section 3.3. de Döhring et al. (2023) identifie plusieurs différences importantes.

307. D'autres disciplines produisent par ailleurs des connaissances sur l'importance des limites planétaires déjà "dépassées" (Richardson et al., 2023).

compte plus satisfaisante de l'encastrement de l'économie dans la nature et donc celle de certaines lois physiques. Sans méconnaître les travaux de la Banque Mondiale, du United Nations Environment Programme ou, plus spécifiquement, du System of Environmental-Economic Accounting des Nations Unies[308], Döhring et al. (2023) indiquent que la prise en compte du capital naturel dans la modélisation économique est complexe et encore embryonnaire :

> "For the empirical integration of natural capital in economic models, two steps are necessary. First, the bio-physical contribution of natural capital to economic output needs to be identified and measured with adequate metrics. For marketed resources (like crude oil or timber) that enter the production process directly, this is relatively straightforward though not without some practical issues. For some indirect-use ecosystem services such as pollination, the input is harder to trace, but the related economic output (e.g. fruit from an orchard) is easy to observe, while for other ecosystem services such as water purification or carbon absorption the service is also not directly relatable to a specific economic output. The second necessary step consists of the monetary valuation of the resource input or ecosystem service. When there are no market prices, this involves a number of tricky issues." (Döhring et al., 2023, p. 22)

La concrétisation de cet agenda est néanmoins entamée (voir par exemple, le chapitre 13 de OECD, 2018, Bastien-Olvera et Moore, 2021, 2022, La Notte et al., 2022, Giglio et al., 2024, OECD, 2025b). Lorsque l'évaluation monétaire des services écosystémiques est ardue, l'adoption d'objectifs quantitatifs de nature physique (par exemple des seuils à ne pas dépasser) apparaît être une alternative à deux conditions : primo, que l'impact physique de l'activité économique sur ces services écosystémiques puisse être quantifié et, secundo, que les objectifs puissent être définis à des niveaux permettant de prévenir un emballement des effets néfastes directs et induits sur l'activité humaine et sur les écosystèmes. Ces conditions présentent leurs difficultés propres. Mais, l'adoption d'un seuil d'augmentation des températures moyennes globales ou l'accord à la 15$^{\text{ième}}$ conférence des parties sur la biodiversité relèvent de cette approche.

Les modèles qui incluent les énergies solaires et éoliennes ou les voitures électriques ignorent fréquemment la contrainte matérielle que représentent les matériaux critiques (cobalt, cuivre, nickel et lithium, notamment). Cette contrainte est une facette de l'encastrement de l'économie dans la nature. Adoptant des approches bien différentes, Pommeret et al. (2022) et Boer et al. (2024) soulignent l'importance d'une prise en compte de cette contrainte matérielle. Dans un contexte de montée des tensions géopolitiques, de nombreux gouvernements ont le souci de sécuriser et de diversifier leurs sources d'approvisionnement de ces matériaux. L'enjeu est cependant plus vaste dans la mesure où des

308. https://seea.un.org/.

régions du monde connaissent durablement de graves instabilités, dont des conflits armés, en raison de l'importance que les économies avancées et certaines économies émergentes accordent à l'accès à ces matériaux critiques.

Si importantes soient-elles, les avancées et les extensions évoquées à l'instant ne s'inscrivent toutefois pas dans le périmètre de ce livre car les implications pour le marché du travail en sont peu ou prou absentes. Ceci explique pourquoi cette réflexion critique sur l'approche macroéconomique ne sera pas explorée davantage.

12.3 Des failles dans la représentation des processus de production

Même s'ils sont à bien des égards différents entre eux, les modèles économiques utilisés au chapitre 11 convergent sur deux points : les impacts d'une réduction forte des émissions de GES sur la croissance du PIB et sur l'emploi total apparaissent modestes. Des auteurs se demandent toutefois si ces modèles prennent adéquatement en compte le fait que les générations de capital productif héritées du passé n'offrent guère de possibilités de substitution quand les mécanismes de prix ou la régulation environnementale élèvent les coûts de production des utilisateurs d'énergies fossiles[309]. Ceci engendre une mise au rebut anticipée d'actifs (on parle d'"actifs échoués"[310]) qui se marque particulièrement dans les secteur industriels intensifs en énergie. Cette mise au rebut anticipée d'actifs implique des pertes d'emplois mais aussi des pertes pour les détenteurs de ces actifs (des institutions financières par exemple). Des auteurs comme Pisani-Ferry (2021) considèrent que la décarbonation des économies conduit à un choc négatif d'offre assez comparable à celui survenu lors des deux chocs pétroliers des années 1970[311]. Ces chocs provoquèrent à court terme une nette contraction de l'activité économique. L'article de Blanchard et al. (2023) paraît adhérer à ce message de Pisani-Ferry (2021)[312].

L'évocation du thème des actifs échoués permet de brièvement évoquer les risques financiers. L'absence de réponse aux dérèglements climatiques provoque des dommages environnementaux sources, notamment, de disparitions prématurées d'actifs physiques. Comme l'a indiqué le paragraphe précédent, la décarbonation de nos économies engendre

309. Parmi les modèles évoqués ci-dessus, seul le modèle IMF-ENV, décrit par Château et al. (2022), prend explicitement en compte cette limite aux substitutions. Sur l'importance de la manière de modéliser les possibilités de substitution entre les facteurs de production, voir notamment Atkeson et Kehoey (1999) et Pröbsting (2024).

310. Traduction littérale de "stranded assets" en Anglais.

311. L'absence de décarbonation entraînerait elle aussi d'importantes dépréciations de capital (voir par exemple Bilal et Rossi-Hansberg (2025), 2025, dans le cas des États-Unis).

312. Même si c'est pour d'autres raisons, la possibilité de contraction économique induite par la transition énergétique est également évoquée par Fagnart et al. (2020) et Dupont et al. (2021).

aussi des pertes d'actifs. Dans un cas comme dans l'autre, mais pas dans la même mesure ni en même temps, les actifs échoués font peser des risques sur les banques en dévalorisant les prêts et les investissements, ce qui peut entraîner une instabilité financière, des dépréciations d'actifs et des effets de contagion. Les banques centrales, qui se préoccupent de la stabilité du système financier, sont dès lors également concernées. Nous ne nous étendrons pas davantage sur ce thème renvoyant le lecteur à une littérature spécialisée traitant de ces questions (voir par exemple Carney, 2015, Giglio et al., 2021, Diluiso et al., 2021, Ferrari et Nispi Landi, 2024).

12.4 Autres critiques adressées aux modèles macroéconomiques standards

Les défaillances de marché et les externalités sont multiples. Tout travail de modélisation doit simplifier l'économie réelle en opérant une sélection parmi celles-ci. Le danger est de simplifier excessivement la réalité. Un autre aspect très important en macroéconomie est celui des attentes des agents économiques étant donné l'information disponible en un moment donné (par exemple, les attentes à une époque donnée sur l'évolution future du prix du carbone). Lorsque le modèle est développé dans un cadre déterministe, on suppose très souvent des attentes parfaites (sans erreur). Lorsque les risques sont pris en compte, l'hypothèse équivalente porte sur les distributions de probabilité. Comme l'investissement joue un rôle important dans la transition environnementale, la représentation par les modèles du système financier est un autre enjeu important. Dafermos et al. (2024), par exemple, critiquent la gamme de modèles évoquée à l'encadré 11 à propos de leur prise en compte des attentes et de leur représentation du système financier[313].

12.5 Une représentation trop grossière du marché du travail

Plusieurs modèles du chapitre précédent postulent que le marché du travail est en concurrence parfaite. C'est une simplification commode mais irréaliste qui peut avoir une grande portée. Par ailleurs, les modèles du chapitre précédent aboutissent généralement à la conclusion que l'évolution de l'emploi variera nettement d'un secteur à l'autre lorsque les émissions de GES doivent fortement diminuer. Cette hétérogénéité sectorielle entraine également une dispersion géographique des changements à l'intérieur des grands agrégats géographiques représentés. Or, les freins à la mobilité des travailleurs sont fréquemment ignorés par les modèles macroéconomiques. Ces modèles fournissent parfois des résultats de simulation par type de travailleur mais, le plus souvent, les évolutions simulées sont

313. Les modèles du chapitre précédent n'intègrent pas des développements récents au sujet de la formation des attentes. A ce propos, voir par exemple Angeletos et al. (2025).

le pur reflet des évolutions sectorielles. Des ajustements de la composition de la main d'oeuvre au sein des secteurs sont alors ignorés.

La citation suivante résume plusieurs limites des modèles évoqués au chapitre 11 :

> "Macroeconomic models are simplifications of reality and tend to generate rather smooth employment adjustment. In particular, the examples provided (E-QUEST, G-Cubed) do not distinguish between green and brown skills and their limited convertibility. Green versus brown activity is defined only at the sector level (green versus brown energy and capital goods production), not at the level of occupations or skills. The skill decomposition of labour demand tends to be the same across sectors by assumption, and workers transferring from one sector to the other are not subject to (temporary) productivity shocks that may proxy for skill mismatch and training needs. (...) By implication, aggregate employment losses during the transition remain contained, and long-run potential employment remains largely unaffected. In light of the emphasis, earlier in this paper, on job transitions and related adjustment and reskilling needs, the lack of more detailed information on labour substitutability across and within industries is a limitation to the use of macro models for evaluating the temporary employment effects of the green transition." (Vandeplas et al., 2022, p. 24)

Ces limites ont leurs raisons d'être (le manque de disponibilité de données adéquates, la complexité élevée des modèles macroéconomiques existants, etc.). Elles rendent toutefois nécessaire l'exploitation complémentaire d'autres approches, dont il sera question dans la suite.

12.6 L'approche des "Sustainability transitions" ou la critique de la logique rationaliste

Ce chapitre s'achève par l'évocation d'une remise en question plus radicale qui ne s'adresse pas qu'aux économistes :

> "The trick is simple : to decide and act rationally, one needs to isolate discrete dimensions of complex reality, that is, to select relevant elements, express cause and effect in linear form, establish the priority of goals and assign responsibilities. This pattern of productive reduction of complexity orchestrates modern science, technology development, bureaucratic organisation, project management, policy making and broader patterns of social organisation such as the differentiation of functional subsystems for economics, law, science, politics and so on." (Voss et Kemp, 2006, p. 5)

Toute approche scientifique rationnelle modélise le réel et ce, que les outils mathématique et statistique soient mobilisés ou pas. Ce faisant, toute approche scientifique simplifie le réel,

mettant en exergue seulement les mécanismes jugés les plus essentiels (ceux qui font apparaître certains acteurs socio-économiques principaux compte tenu du problème abordé). Des relations de cause à effet sont présentes ; elles peuvent être multiples et, soit-dit en passant, ces relations peuvent être fortement non linéaires. Or, la critique évoquée ici paraît remettre tout approche de ce type en question. Elle considère que les problèmes environnementaux sont trop complexes que pour être analysés de la sorte.

> "A transition is the result of the interplay of developments that sustain and reinforce each other. Transitions are not caused by single variables (a price change, policy act or a new technology) but are the result of developments in various domains which sustain each other : technology, economy, institutions, behaviour, culture, ecology and images/paradigms." (Kemp et Loorbach, 2006, p. 106)

Or, une approche scientifique rationnelle peut fort bien reconnaître la multiplicité des facteurs en jeu mais elle ne pourra prendre toutes les dimensions en compte, sans quoi elle vise la description et non l'explication ou la prédiction.

L'approche multidisciplinaire des "sustainability transitions", dont se revendiquent les auteurs cités à l'instant, est difficile à décrire succinctement. Des auteurs comme Loorbach et al. (2017) reconnaissent bien volontiers la grande hétérogénéité qui y prévaut. Un courant important en son sein considère qu'un régime socio-technique dominant émerge de l'histoire. Sur le seul plan technologique, il est par exemple caractérisé par le moteur et les centrales électriques thermiques recourant aux énergies carbonées. Ce régime dominant, qui fait intervenir une foule d'acteurs (associations industrielles, centres de recherche, gouvernements, etc.) est stable, non écologiquement soutenable, mais verrouillé : des innovations à la marge y sont possibles mais elles restent enfermées à l'intérieur de ce régime. Si des chocs extérieurs (par exemple, une crise profonde sur les marchés des énergies carbonées) ou si des innovations radicales (et non à la marge) apparaissent, le régime dominant peut être remis en question. Une fenêtre d'opportunité s'ouvre mais, si elle n'est pas immédiatement refermée par certains acteurs que le changement menace, on entre alors dans un processus de *transition* que l'approche des "sustainability transitions" décrit comme hautement incertain, non-linéaire, chaotique. Sous certaines conditions, qu'il convient d'identifier (rapports de force en jeu, etc.) et le cas échéant de promouvoir, cette remise en question peut enclencher une *transition* vers un nouveau système socio-technique (davantage soutenable sur le plan environnementale). Cette présentation, qui est clairement trop succincte que pour rendre justice à l'approche des "sustainability transitions"[314], cherche à faire entrevoir pourquoi, selon ses défenseurs, les outils de modélisation évoqués au chapitre précédent, et plus largement dans ce livre, sont incapables de traiter avec pertinence de la transition des systèmes socio-économiques complexes.

La difficulté de mener un travail scientifique rigoureux et pertinent est bien réelle. Le caractère réducteur de tout travail de modélisation doit être reconnu. Par conséquent, une

314. Pour aller plus loin, voir par exemple Loorbach et al. (2017).

approche comme celle des "sustainability transitions" contribue à la compréhension des phénomènes en jeu dans les transitions. En même temps, son rejet des approches disciplinaires rationnelles apparaît présomptueux et fondé sur un discours général et peu étayé.

Chapitre 13

Emplois verts et bruns

Ce chapitre traite de *l'identification* des professions selon qu'elles sont associées au "verdissement" de nos économies ou à des activités économiques "polluantes", ces notions étant à préciser[315]. La littérature désigne souvent les premières par l'expression "emplois verts" ("green jobs") et les secondes par l'appellation "emplois bruns" ("brown jobs"), que l'on désigne aussi parfois par les qualificatifs "sales" ou "polluants". Une fois le travail d'identification achevé, cette littérature *dénombre* les emplois (plus récemment, les offres d'emplois) correspondants au cours d'une période qui dépend de la disponibilité statistique. En plus, elle cherche à *caractériser* ces emplois. Plus précisément, la littérature collecte de l'information sur les compétences des personnes qui exercent ces professions et elle produit des statistiques sur le profil des travailleurs occupés dans ces professions et, parfois, sur la nature des emplois occupés (type de contrat, salaire, par exemple). Cette littérature poursuit donc l'objectif de décrire les évolutions en cours.

L'hypothèse sous-jacente à ces travaux est que la transition vers des émissions nettes nulles de gaz à effet de serre va s'accompagner du développement d'emplois (de professions) qui sont nécessaires à cette transition (les professions vertes) et de la raréfaction, voire de la disparition, des professions liées aux activités fortement émettrices de ces gaz (les professions brunes). Cette littérature ne cherche cependant pas à analyser les mécanismes par lesquels ces mutations de l'emploi vont se matérialiser. Notons que cette hypothèse sous-jacente se confirme au cours des dernières années. Au cours de la reprise économique post-Covid 19, l'OECD (2023) note par exemple une croissance plus rapide des emplois vacants verts comparée à celle des emplois qui ne le sont pas. Etant donné les évolutions politiques dans certains pays, rien ne garantit que cette tendance va perdurer.

Le rapport de l'UNEP/ILO/IOE/ITUC (2008) figure parmi les premiers à proposer une mesure de l'emploi vert, basée sur la définition générale suivante :

315. Etant entendu que des emplois peuvent aussi n'avoir aucun de ces deux attributs. On parlera alors par exemple de professions "autres" ou "neutres".

> "We define green jobs as work in agricultural, manufacturing, research and development (R&D), administrative, and service activities that contribute substantially to preserving or restoring environmental quality. Specifically, but not exclusively, this includes jobs that help to protect ecosystems and biodiversity ; reduce energy, materials, and water consumption through high efficiency strategies ; de-carbonize the economy ; and minimize or altogether avoid generation of all forms of waste and pollution." (UNEP/ILO/IOE/ITUC, 2008, p. 3)

Bien d'autres travaux ont depuis suivi. Il est aujourd'hui admis qu'il n'y a pas de consensus sur la définition précise de ce qu'est un emploi vert ou un emploi brun (voir par exemple Consoli et al., 2016, OECD, 2023, ou Urban et al., 2023). Le rapport du European Network of Public Employment Services (2021) montre lui aussi l'hétérogénéité des définitions adoptées par les Services Publics de l'Emploi de plusieurs nations de l'Union européenne. Quelle que soit la définition retenue, il y a lieu de pouvoir la mettre en oeuvre. Or, comme les nomenclatures existantes d'emplois n'ont pas été créées dans ce but, elles ne permettent pas d'identifier directement les métiers liés à la transition environnementale ou énergétique.

La suite présentera d'abord succinctement deux approches historiquement dominantes, qui s'appuient sur le processus de production ou sur l'objet de cette production (souvent capté à travers le secteur) pour définir les emplois verts et bruns. A leur propos, on parlera d'"approches traditionnelles". Ensuite, une place importante sera accordée à une approche, développée aux États-Unis, dont le point de départ est les professions ou les tâches des travailleurs. L'application de cette approche à l'Europe (respectivement, aux pays de l'OCDE) apparaitra dans un troisième (respectivement, quatrième) temps. Enfin, une littérature critique sera brièvement évoquée.

Parmi d'autres, l'OECD (2023), Urban et al. (2023), le deuxième chapitre du rapport de l'OECD (2024), Apostel et Barslund (2024), Granata et Posadas (2024) et Maldonado et al. (2024) proposent une synthèse de cette littérature. Par souci de concision, mis à part les États-Unis [316], ce texte ne couvre pas les analyses qui portent sur un seul pays [317]. Il apparaîtra que les estimations du nombre d'emplois verts (respectivement, bruns) varie énormément selon la définition retenue.

316. Cette exception se justifie par l'influence mondiale de l'approche développée dans ce pays.

317. Par exemple, Janser (2018) et Bachmann et al. (2024) se basent sur la banque de données allemande BERUFENET. A l'aide de cette source, un index de Greenness est définit comme suit : "the share of environment-friendly net of environment-harmful tasks in an occupation relative to all tasks performed in this occupation" (Bachmann et al., 2024, p. 7). Signalons également les travaux de la Green Jobs Taskforce et de Whittard et al. (2025) au Royaume-Uni. Pour le Japon, voir Kuai et al. (2025).

13.1 Les approches basées sur le processus de production ou sur ce qui est produit

Deux "approches traditionnelles" coexistent. Selon l'approche en termes de *processus*, sont désignés comme verts les emplois associés à des processus de production rendant l'activité économique de l'employeur plus respectueuse de l'environnement : traitement de déchets, recyclage, intensité des émissions de GES, etc. La mesure s'appuie sur une information spécifique à chaque entreprise. La mise en oeuvre de cette première approche est compliquée par l'hétérogénéité de la mesure des processus selon les entreprises, les secteurs et les pays. Une deuxième approche se base sur *l'output* produit grâce à l'emploi. Sont désignés ici comme verts les emplois dans des entreprises (des secteurs) qui produisent des biens ou fournissent des services qui profitent à (protègent) l'environnement ou préservent les ressources naturelles. On parle d'"environmental goods and services" (ou "EGSS"). Ceci englobe notamment la protection de l'air et des eaux, la gestion des forêts, de la faune, des déchets, la protection de la biodiversité et des paysages, la limitation des émissions des GES et les économies d'énergie. Cette notion d'emploi vert est utilisée par de nombreuses institutions internationales dont les Nations Unies, l'Organisation Internationale du Travail[318] et Eurostat. En 2021, au sein de l'Union européenne des 27, 2,7% de l'emploi mesuré en équivalent-temps plein était considéré comme vert selon cette définition (Maldonado et al., 2024). Selon une méthodologie proche, le Bureau of Labor Statistics ("B.L.S.") des États-Unis estimait qu'en 2011, 2,6% des emplois y étaient verts[319]. Comme l'indique le graphique 13.1, la part de ces emplois verts dans l'emploi total, mesuré en équivalents temps plein, est hétérogène d'un pays européen à l'autre. Entre 2014 et 2019 ou 2020, cette part croit modestement dans la plupart des pays européens. Un intérêt de cette notion d'emploi vert est la possibilité de la ventiler par secteur d'activité[320].

Cette notion d'emploi vert apparaît cependant restrictive car elle ne prend en compte que les emplois directement impliqués dans des activités économiques tournées vers des préoccupations environnementales. En outre, elle ne produit pas d'information au niveau micro-économique (travailleurs ou emplois).

318. Sur `https://libguides.ilo.org/green-jobs-en`, on lit : "Green jobs are decent jobs that contribute to preserve or restore the environment, be they in traditional sectors such as manufacturing and construction, or in new, emerging green sectors such as renewable energy and energy efficiency." On notera au passage l'ajout, très rare dans cette littérature, d'un critère de qualité de l'emploi, précisé notamment à la page `https://www.ilo.org/topics-and-sectors/decent-work`.

319. Cette proportion est citée par Bowen et al. (2018). La définition exacte utilisée par le B.L.S. est la suivante : "Green jobs are either :
– Jobs in businesses that produce goods or provide services that benefit the environment or conserve natural resources.
– Jobs in which workers' duties involve making their establishment's production processes more environmentally friendly or use fewer natural resources." (source : `https://www.bls.gov/green/home.htm`)

320. Ceci permet, par exemple, d'étudier le degré de spécialisation industrielle (Bontadini et Vona, 2023).

Comme l'indiquent Consoli et al. (2016), le point commun, et le défaut commun, de ces approches traditionnelles est de déduire d'une propriété du processus de production ou de son output un contenu de l'activité professionnelle des travailleurs concernés. A titre d'exemple, du personnel occupé à des tâches administratives sera ou non comptabilisé comme occupé dans un emploi vert selon ce que produit ou selon la manière de produire de son entreprise. Ceci est une source de surestimation des "emplois verts". Simultanément, un travailleur dont l'activité est centrée sur la protection de l'environnement sans être occupé dans un secteur EGSS est ignoré. Ceci illustre les limites de ces approches traditionnelles.

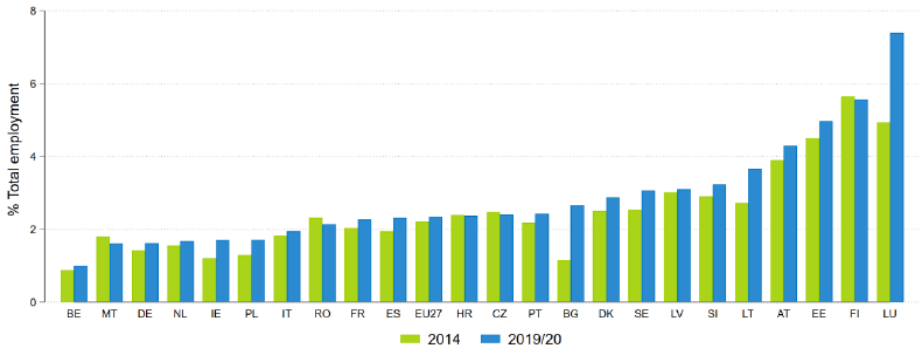


FIGURE 13.1 – Part des emplois dans les "environmental goods and services" (part dans l'emploi total en % en 2014 et en 2019 ou 2020). Source : Figure 2 de Vandeplas et al. (2022) sur base des données en lignes ENV_AC_EGSS1 d'Eurostat.

Les définitions d'emplois "bruns" s'appuient généralement sur l'identification de secteurs qui sont polluants dans un sens à préciser. Ces définitions ont donc leur place dans cette section. Commençons par Vona et al. (2018) qui proposent une définition des emplois bruns appliquée aux États-Unis. Celle-ci part d'une identification des secteurs (finement désagrégés) particulièrement polluants en termes d'émissions par travailleur en 2011. Outre le CO_2, ils retiennent six (groupes de) polluants[321]. Un secteur est classé parmi les plus polluants si pour au moins trois des six polluants il se classe parmi les 5% les plus polluants. Au total, cette approche dénombre 62 secteurs particulièrement polluants. Ensuite, Vona et al. (2018) s'intéressent aux professions parmi ces 62 secteurs.

321. Les particules fines, le CO, les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO_2), les composés organiques volatils et le plomb.

Définition 1 *Selon Vona et al. (2018), une profession est dite brune si la part de celle-ci dans les 62 secteurs les plus polluants est au moins sept fois supérieure à celle des travailleurs, tous métiers confondus, dans ces mêmes secteurs.*

Ce rapport de 7 apparaît arbitraire. Les auteurs en ont considéré d'autres, mais retiennent le rapport de sept car il est le premier à englober des professions selon eux "manifestement brunes" tout en évitant d'en inclure qui ne le sont "manifestement" pas (p. 730 de Vona et al., 2018). Ils identifient ainsi 85 professions brunes aux États-Unis[322]. Appliquant la définition 1, Bergant et al. (2022) concluent que la part des emplois bruns avoisine 3% aux États-Unis. Bien qu'elle décline légèrement depuis 2015, cette proportion apparaît assez stable sur la période 2004-2019.

De son côté, l'OECD (2024) définit une notion de secteur à haute émission de GES :

Définition 2 *Un secteur est considéré comme fortement émetteur s'il se situe dans les deux déciles supérieurs de la distribution moyenne de l'intensité des GES (tonnes rapportées à la valeur ajoutée) dans au moins 10 des 32 pays considérés (OECD, 2024, p. 140).*

Une fois les secteurs identifiés, l'emploi est mesuré en nombre de travailleurs. Selon cette définition, en 2016, la part de l'emploi dans ces secteurs à haute émission s'élevait à 5,6% aux États-Unis. C'est donc quasi le double de la part obtenue à partir de la définition 1. Il existe encore d'autres définitions d'emplois bruns, qui s'appuient sur les émissions sectorielles de polluant. Elles seront évoquées le moment venu.

13.2 L'approche basée sur les professions ou les tâches des travailleurs

Une approche différente, développée aux États-Unis (le "Green Economy program"[323]), a pris, dans une première phase, les *professions* comme *point de départ*. Une seconde phase de ce programme d'étude a pris comme point de départ les *tâches* accomplies par les travailleurs[324]. Cette approche requiert un appareil statistique fin. En l'occurrence, le dictionnaire des fonctions aux États-Unis (O*NET apparu en l'an 2000) contient pour chaque profession[325] de l'information sur les tâches réalisées[326] et sur les compétences et aptitudes[327]

322. La liste est consignée au tableau 32 de cet article.
323. Developpé par l'Occupational Information Network (O*NET) sous les auspices de l'US Department of Labor.
324. Cette approche se situe dans un courant plus large qui voit en les tâches une unité d'activité professionnelle qui contribue à la production. Quant à elles, les compétences des travailleurs sont vues comme des capacités incarnées leur permettant de réaliser plus ou moins correctement les tâches (voir Acemoglu et Autor, 2011).
325. La version datant de 2019 distingue 1016 professions. Plus de détails sur `https://www.onetcenter.org/taxonomy.html`.
326. Il s'agit d'une description sous forme de texte.
327. Un score allant de 1 à 5 ou de 1 à 7 est associé à chacune d'elles pour chaque profession.

que les travailleurs sont sensés avoir pour exercer ces professions. Plus de précisions sur le contenu de cette source d'information seront fournies par la suite. Comme cette approche s'est développée à partir de la source O*NET, cette section limitera l'application des indicateurs aux États-Unis. Les sections ultérieures permettront d'évoquer l'application des mêmes indicateurs à d'autres parties du monde.

13.2.1 L'approche préconisée par Dierdorff et al. (2009)

Dierdorff et al. (2009) est le rapport de base de la première phase du "Green Economy program". Ce rapport part d'une définition d'"économie verte" qui présente une analogie avec l'approche par l'output introduite à la section 13.1 [328]. L'objectif de Dierdorff et al. (2009) est d'identifier les professions modifiées par le verdissement de l'économie et d'identifier des professions nouvelles ou en cours d'apparition au sein de cette "économie verte". Dans ce but, le rapport identifie douze secteurs d'activités impliqués par cette économie [329]. Ensuite, les auteurs du rapport ont compulsé la littérature relative à ces secteurs, ils y ont identifié des dénominations de fonctions existantes, émergeantes ou nouvelles ; ils les ont regroupées en professions puis les ont associées aux noms de professions dans la nomenclature O*NET-SOC. Ceci conduit à la définition suivante :

Définition 3 *Selon Dierdorff et al. (2009), la notion de profession "verte" recouvre les trois catégories suivantes :*

1. *Les professions existantes dont les tâches se modifient et qui requièrent des changements de connaissances et de compétences dans le contexte de la transition écologique. On parle de "**Green Enhanced Skills**" (abréviation : "**GES**").*
2. *Les professions qui se créent pour accompagner la transition écologique. On parle de "**Green New and Emerging**" (abréviation : "**GNE**").*
3. *Les professions existantes, peu modifiées mais en augmentation du fait de la transition écologique. On parle de "**Green Increased Demand**" (abréviation : "**GID**").*

Au bout de l'exercice, beaucoup de professions entrent dans une de ces trois catégories. A titre d'exemples [330],

328. "The green economy encompasses the economic activity related to reducing the use of fossil fuels, decreasing pollution and greenhouse gas emissions, increasing the efficiency of energy usage, recycling materials, and developing and adopting renewable sources of energy" (p. 8 de Dierdorff et al., 2009). Cette définition est cependant plus large que celle des "environmental goods and services" exploitée pour produire la figure 13.1.

329. 1. Production d'énergie renouvelable ; 2. transport ; 3. efficacité énergétique ; 4. construction écologique ; 5. commerce de l'énergie ; 6. capture et stockage de l'énergie et du carbone ; 7. recherche, conception et services de conseil ; 8. protection de l'environnement ; 9. agriculture et sylviculture ; 10. industrie manufacturière ; 11. recyclage et réduction des déchets ; 12. administration gouvernementale et réglementaire.

330. Tirés de la mise à jour du rapport de 2009 par Dierdorff et al. (2011).

— Parmi les professions "GES" figurent notamment les mécaniciens automobiles de véhicules ayant un moteur électrique ou encore les couvreur (à former pour le placement de panneaux photovoltaïques) mais aussi les analystes financiers, les managers en marketing, les ingénieurs électriciens et mécaniciens, les plombiers, les tôliers, les opérateurs de centrale électrique, les ouvriers de la construction et les techniciens agricoles [331].
— Parmi les professions "GNE" figurent les techniciens en géothermie, les ingénieurs spécialisé en piles à combustible à hydrogène, les ingénieurs biochimistes, les techniciens en nanotechnologie, les auditeurs énergétiques, une série de métiers liés aux énergies solaire et éolienne, à la production d'énergie à partir de la biomasse et à la capture de gaz à effets de serre [332].
— Parmi les professions "GID", on trouve les chauffeurs de bus, les maçons et les finisseurs de béton, les électriciens, les soudeurs et ajusteurs, les installateurs d'isolation thermique, les charpentiers et leurs aidants, les développeurs de software, les chimistes et les gestionnaires de production [333].

Alors que les professions "GNE" sont souvent par essence en lien étroit avec des processus de décarbonation de nos économies, les professions "GES" et "GID" peuvent y contribuer si des conditions sont remplies (formation appropriée dans un cas, accroissement de la demande de biens et services dans l'autre). La contribution de ces deux derniers groupes de professions à la décarbonation apparaît donc davantage potentielle. En outre, on est amené à s'interroger sur ce qui motive la présence de certaines professions dans ces catégories vertes [334]. Enfin, puisque de nombreux métiers reçoivent le label "vert", on doit craindre une surestimation de la réalité.

Consoli et al. (2016) estiment que la part des seuls emplois verts GES et GNE dans le total de l'emploi s'élève à 11% en 2011-2012 aux États-Unis. A titre de comparaison, la part des emplois verts était seulement de 2,6% selon les approches traditionnelles de la section 13.1. Consoli et al. (2016) notent également qu'environ les trois-quarts des professions GES et GNE se retrouvent dans quelques groupes bien particuliers : les professions du management et de la finance, les architectes et les ingénieurs. Bowen et al. (2018) estiment qu'en 2014 aux États-Unis, 19,4% des emplois étaient verts, avec la ventilation suivante par type :

331. La liste nord-américaine est disponible à cette adresse https://www.onetcenter.org/green/skills.html.
332. La liste nord-américaine est disponible à cette adresse https://www.onetcenter.org/green/emerging.html. Son intitulé indique clairement que cette liste englobe l'impact du verdissement de l'économie mais aussi des développements technologiques (on y retrouve par exemple les ingénieurs et les techniciens en robotique).
333. La liste nord-américaine est disponible à cette adresse : https://www.onetcenter.org/green/demand.html. Que la transition écologique ne modifie pas ces professions n'exclut évidemment pas que d'autres phénomènes, comme le progrès technique et l'automatisation, le fassent.
334. Par exemple, quels arguments conduisent à considérer la profession d'analyste financier ou celle de manager en marketing comme appartenant au groupe "GES" ? Il en va de même pour les tôliers. Si ces derniers travaillent à la préparation d'éoliennes, on peut comprendre. Mais en va-t-il ainsi de tous les tôliers ?

1,2% GNE, 10,3% GES et 7,9% GID.

	Greenness=1	Greenness btw 0.5 and 0.3	Greenness<0.3
Green Enhanced Occupations	Environmental Engineers, Environ Science Technicians, Hazardous Material Removers	Aerospace Engineers Atmospheric and Space Scientists, Automotive Speciality Technicians, Roofers	Construction Workers, Maintenance & Repair Workers, Inspectors, Marketing Managers
New and Emerging Green Occupations	Wind Energy Engineers, Fuel Cell Technicians, Recycling Coordinators	Electrical Engineering Technologists, Biochemical Engineers, Supply Chain Managers, Precision Agriculture Technicians	Traditional Engineering Occupations, Transportation Planners, Compliance Managers

FIGURE 13.2 – Exemples de professions "Green Enhanced Skills" et "Green Increased Demand" par degré de Greenness. Source : Tableau 1 de Vona et al. (2018) s'appuyant sur des données américaines d'O*NET.

Cette nomenclature en trois groupes (GES, GNE et GID) est donc souvent utilisée. Mais le caractère binaire de ce classement (soit une profession appartient à une des trois catégories GID, GES ou GNE, soit elle n'est pas verte) est fort schématique. En outre le caractère vert de certaines professions vertes est discutable.

13.2.2 L'approche par les tâches préconisée par Vona et al. (2018)

Une approche plus fine, appelée ci-dessus "la seconde phase", a consisté à remonter au niveau des tâches accomplies par les travailleurs (Vona et al., 2018). Elle s'appuie sur le "Green Task Development Project" de O*NET [335] développé seulement pour les professions GES et GNE. Ce projet porte sur 138 professions. Pour chacune, une liste de tâches existe. Il y a d'un côté des tâches générales (communes à toutes les professions), de l'autre des tâches spécifiques à la profession. Chaque tâche spécifique a été classée verte ou non [336]. Au total, l'approche a identifié 1369 tâches vertes. Ce travail préparatoire permet à Vona et al. (2018) de définir un indicateur *continu* de "degré de greenness" :

Définition 4 *Le "degré de greenness" d'une profession est un nombre compris entre 0 et 1 obtenu en rapportant le nombre de tâches spécifiques vertes au total des tâches spécifiques de cette profession.*

La figure 13.2 illustre les résultats obtenus. Ce tableau mentionne des noms de professions classifiées GES et GNE et les regroupe en trois catégories par degré de greenness.

335. https://www.onetcenter.org/reports/GreenTask.html.

336. Cette classification s'appuie sur un travail d'experts basé sur des rapports, des livres, des contacts directs avec des associations professionnelles, etc. L'opacité éventuelle du processus s'est donc déplacée du niveau de la profession à celui des tâches.

Un premier ensemble de professions ne réalise que des tâches spécifiques qualifiées vertes (greenness = 1). La dernière colonne mentionne des professions dont l'indicateur de greenness est bas (greenness < 0.3). Marin et Vona (2019) expliquent que la part des seuls emplois verts GES et et GNE dans le total de l'emploi passe de 11 à 2 ou 3% aux États-Unis lorsqu'on remplace l'approche binaire par une approche qui pondère la part des emplois par le degré de greenness selon la formule :

$$\sum_{k=1}^{K} \text{greenness}_k \, \frac{L_{kt}}{L_t}, \tag{13.1}$$

où l'indice $k = 1, ..., K$ désigne les professions, greenness_k est l'indice de greenness de la profession k (voir la définition 4) et L_{kt}/L_t est la part de la profession k dans l'emploi en t.

Notons que le degré de greenness est attaché à une profession sans aucune prise en compte des caractéristiques de l'emploi. C'est une limite de cette approche par les tâches. Deux exemples permettent de comprendre cette affirmation. Le tableau I.1. de Bluedorn et al. (2023) indique que dans la nomenclature nord-américaine, l'indicateur de greenness est nul pour toutes les professions de l'agriculture, de la sylviculture et de l'élevage. Que le processus de production émette peu ou beaucoup de GES, qu'il soit intensif en intrants chimiques[337] ou non, le degré de greenness est nul. De même, le degré de greenness de la profession de couvreur est le même quel que soit la part de temps de travail consacrée dans un emploi donné à réparer les toitures, poser des isolations thermiques, installer des fenêtres de toit ou encore des panneaux photovoltaïques.

13.2.3 L'utilisation des emplois vacants

Une littérature apparue plus récemment aux États-Unis s'intéresse aux *offres d'emploi* et non plus aux emplois occupés. Parmi les raisons de ce glissement figure la volonté de suivre plus rapidement l'évolution du marché de l'emploi. Une autre motivation est de mieux distinguer un emploi vert d'un emploi qui ne l'est pas au sein d'une même profession. Cette littérature récente exploite de l'information disponible sur des plateformes informatiques collectant et traitant des données sur les offres d'emploi et sur les travailleurs inscrits sur ces plateformes[338]. La représentativité statistique de ces sources de données doit être un point d'attention (Saussay et al., 2024, Curtis et Marinescu, 2023, Curtis et al., 2024) : elles sur-représentent certains types d'entreprises et les professions de certains secteurs. Sans entrer dans les détails, la classification des emplois dits "bas carbone" (≈ verts) et et celle

337. Souvent réalisés en recourant aux énergies fossiles.

338. Curtis et Marinescu (2023) exploitent la plateforme Burning Glass Technology. Curtis et al. (2024) et Saussay et al. (2024) exploitent la plateforme Lightcast, fusion de Burning Glass et de la plateforme Economic Modeling Specialist International. Dans le cas européen, signalons l'initiative Skills-OVATE du CEDEFOP (voir `https://www.cedefop.europa.eu/en/tools/skills-online-vacancies`). Au Royaume-Uni, signalons les rapports périodiques de PricewaterhouseCoopers (Price Waterhouse Cooper, 2023).

des emplois "intensifs en carbone" (≈ bruns ou sales) combinent diverses sources d'information : des mots-clés présents dans l'intitulé des offres d'emploi, le nom et le secteur de l'employeur et, parfois, l'avis d'experts. Il s'agit à chaque fois de procédures complexes, exploitant les techniques de traitement automatique du langage naturel dans le cas de Saussay et al. (2024). Chez ces derniers, l'objectif est d'identifier les *compétences* les plus pertinentes d'un point de vue sémantique pour la décarbonation [339]. Aux États-Unis, Saussay et al. (2024), dont l'analyse couvre l'ensemble des emplois et des secteurs entre 2010 et 2019 [340], concluent que la part des "emplois vacants bas-carbone" dans le total avoisine 0,9%, *sans tendance claire entre 2010 et 2019* [341]. Cette part moyenne cache une hétérogénéité importante selon les groupes de professions. Elle est par exemple plus élevée et plus clairement en croissance en fin de période parmi les emplois vacants de professions moins qualifiées [342] que parmi les autres emplois ; on discerne même une légère décroissance de la part des emplois vacants bas-carbone au sein des professions dites hautement qualifiées (gestionnaires, ingénieurs, architectes et professions assimilées) [343].

La part des emplois vacants "intensifs en carbone" [344] s'élève aux États-Unis à environ 0,3% du total et est, elle, en diminution sur la période [345]. Cette proportion est bien moindre que celle observée parmi les emplois. Rappelons en effet qu'appliquant la définition 1, Bergant et al. (2022) concluent que la part des emplois bruns avoisine 3% durant la seconde moitié de la décennie 2010 aux États-Unis.

339. Au terme de cette procédure complexe, les auteurs disposent de 389 identifiants d'emplois bas-carbone. Les emplois intensifs en carbone sont, eux, identifiés en croisant l'appartenance sectorielle et des noms de professions. Au total 1,8 millions d'emplois vacants sont classifiés bas carbone et 200.000 sont catégorisés intensifs en carbone (sur 200 millions d'offres d'emploi). A côté de ces deux types d'emplois, on trouve les emplois génériques. On notera au passage que ces approches réintroduisent un classement binaire (portant cette fois sur les emplois vacants), alors que l'approche en termes degré de greenness avait évité cela.

340. Alors que Curtis et Marinescu (2023) et Curtis et al. (2024) s'intéressent plus particulièrement aux secteurs énergétiques et de l'automobile.

341. Afin de limiter les problèmes de représentativité, les auteurs pondèrent les emplois vacants à l'aide des parts dans l'emploi. Rappelons que la part des emplois GES et GNE pondérés par l'indicateur de greenness est estimée à 2 ou 3% aux États-Unis (Marin et Vona, 2019, Bergant et al., 2022). La notion d'emploi bas carbone, plus restrictive que celle d'emploi vert, explique, selon Saussay et al. (2024), le constat que la part des emplois vacants bas carbone est plus basse que celle des emplois GES et GNE pondérés.

342. Appartenant principalement aux code SOC 47 des métiers de la construction et de l'extraction et au code 49 des professions de l'installation, de l'entretien et de la réparation. La liste de ces codes est disponible à l'adresse `https://www.bls.gov/oes/current/oes_stru.htm`.

343. Appliquant une méthodologie analogue au Royaume-Uni aux cours des années 2012 à 2021, Sato et al. (2023) obtiennent que la part des emplois vacants bas-carbone s'élève à 1,4% sur cette période.

344. Où dominent les métiers de l'extraction.

345. Selon Sato et al. (2023), cette part n'est que de 0,08% au Royaume-Uni.

13.2.4 Résumé relatif aux emplois verts aux États-Unis

En résumé, l'identification des emplois dits "verts" selon l'approche des tâches (Vona et al., 2018, Marin et Vona, 2019) apparaît plus satisfaisante que celle qui part d'emblée des professions (Dierdorff et al., 2009, Dierdorff et al., 2011, Bowen et al., 2018). Quand cette approche par les tâches pondère chaque emploi par un degré de greenness (nombre entre 0 et 1 ; voir la définition 4), une part d'emplois verts se situant entre 2 et 3% est un ordre de grandeur aux États-Unis pour la décennie 2010. Bien que totalement distincte de celle du de la section 13.1, cette approche aboutit à une part des emplois verts analogue aux États-Unis. Lorsqu'on s'intéresse aux emplois vacants (repris sur des plateformes informatiques) et qu'on adopte une notion d'emploi vacant dit "bas-carbone", la part de ceux-ci demeure assez stable juste au-dessous d'1% entre 2010 et 2019 (Saussay et al., 2024).

13.3 Quantification des emplois verts et bruns en Europe

Cette section débutera par l'identification et la quantification des emplois verts. Vu l'hétérogénéité des approches, un résumé fera le point sur les éléments les plus fiables et sur quelques inconnues. Les emplois bruns seront considérés en fin de section.

13.3.1 Les emplois verts en Europe : défis et essais de mise en oeuvre

Appliquer la classification nord-américaine (introduite à la section 13.2) aux pays européens présente des difficultés [346]. Il y a lieu d'abord de supposer que chaque profession ou tâche (non) verte l'est des deux côtés de l'Atlantique. Cette hypothèse ne va pas nécessairement de soi. Ensuite, la classification ISCO à 4 chiffres des professions en Europe est moins fine que l'américaine (SOC-10) [347]. Les possibilités de conversion entre ces deux classifications se situent dès lors à des niveaux où, dans la classification ISCO, professions vertes et non vertes de la classification américaine coexistent. Les choix à faire ont des conséquences illustrées ci-dessous. Enfin, l'Enquête sur les Forces de Travail, seul outil permettant une comparaison quantitative entre pays européens, ne renseigne le nombre d'emplois par profession qu'au niveau d'une nomenclature à 3 chiffres [348]. Ceci renforce la deuxième difficulté évoquée à l'instant. Néanmoins, un nombre croissant d'auteurs, comme Bowen et Hancké (2019), Valero et al. (2021), Sofroniou et Anderson (2021), Bluedorn et al. (2023) et Maldonado et al. (2024), Scholl et al. (2023) a tenté l'exercice de transposition (voir ci-dessous). Enfin, Maldonado et al. (2024) exploitent une classification nouvelle des professions et des compétences requises (ESCO) [349]. Comme nous le verrons, les divergences

346. La section 3.2.2. d'Apostel et Barslund (2024) présente une vue d'ensemble de la question.
347. Voir l'information sur la classification ISCO proposée dans l'encadré 5.
348. Voir Valero et al., 2021, p. 52 ou Vandeplas et al., 2022, p. 12.
349. Plus de précisions sur les sites `https://esco.ec.europa.eu/en/classification` et `https://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=1326&langId=en`.

entre ces deux sources d'identification des emplois verts sont considérables. Ceci suscite une grande perplexité.

Valero et al. (2021) adoptent la nomenclature nord-américaine des emplois verts évoquée à la section 13.2 et la définition 3. Leur transposition à la classification européenne (ISCO) implique une série de choix[350]. Ensuite, ils calculent les parts des emplois GNE, GES et GID dans un éventail de pays européen en 2019. Toutes catégories confondues, la figure 13.3 indique que la part globale des emplois verts est voisine de 20%[351]. Les auteurs précisent que les parts nationales sont assez stables entre 2014 et 2020. Comme l'approche de Valero et al. (2021) inclut les emplois GID et ne pondère pas les emplois par le degré de greenness de la définition 4, il n'est pas surprenant que les parts obtenues soient (déraisonnablement) élevées. Maldonado et al. (2024) s'appuient également sur la nomenclature nord-américaine des emplois verts mais ils exploitent le degré de greenness. Ils privilégient une approche binaire puisque, pour être considérée comme verte, une profession doit être caractérisée par un degré de greenness[352] qui dépasse le seuil arbitraire de 0,1. Avec ce critère, 11 groupes de professions sur les 130 de la classification ISCO à 3 chiffres sont verts[353]. En 2022, Maldonado et al. (2024) concluent que 7,5% des emplois sont verts au sein de l'Union européenne des 27 (voir la figure 13.4). A titre de comparaison, à la figure 13.3, la somme des emplois GNE et GES représente selon les pays de 10 à 15% de l'emploi total.

Regroupant les données individuelles de l'enquête sur les forces de travail des 15 pays de la figure 13.3, Valero et al. (2021) caractérisent les travailleurs occupés dans les emplois

350. Le plus important est expliqué ici. La classification européenne étant moins fine, à une profession au sein de celle-ci correspond, généralement, plusieurs professions de la classification américaine. Prenons un exemple. Si, à une profession de la classification européenne correspondent trois professions de la classification américaine, dont deux seulement sont vertes, alors Valero et al. (2021) vont attribuer un score de 2/3 à cette profession en Europe. Et la valeur apparaissant à la figure 13.3 est la moyenne des scores des professions reprise dans chacune des catégories GNE, GES et GID.

351. Bowen et Hancké (2019) suivent, apparemment, la même démarche et obtiennent qu'au niveau de l'Union européenne, en 2016, 40% de l'emploi était vert (p. 23). L'écart fort important entre cette quantification et celle de Valero et al. (2021) s'explique. Dans la classification européenne, Bowen et Hancké (2019) attribuent un label vert à une profession si au moins une profession correspondante dans la classification d'O*NET est verte. Ce choix comparé à celui fait par Valero et al. (2021) (voir la note de bas de page 350) expliquerait que l'estimation de Bowen et Hancké (2019) est le double de celle de Valero et al. (2021).

352. Voir la définition 4.

353. A savoir, les directeurs généraux et les chefs d'entreprise, les responsables des ventes, du marketing et du développement, les directeurs de l'industrie manufacturière, de l'exploitation minière, de la construction et de la distribution, les professionnels des sciences physiques et de la terre, ceux des sciences de la vie, les ingénieurs (hors électro-technologie), les architectes, planificateurs, géomètres et concepteurs, les techniciens des sciences de la vie et professionnels assimilés, les finisseurs en bâtiment et les métiers connexes, les ouvriers des mines et de la construction, ainsi que les ouvriers de l'industrie des déchets. La présence de certaines professions dans cette liste surprend. L'absence de certaines autres sans doute aussi.

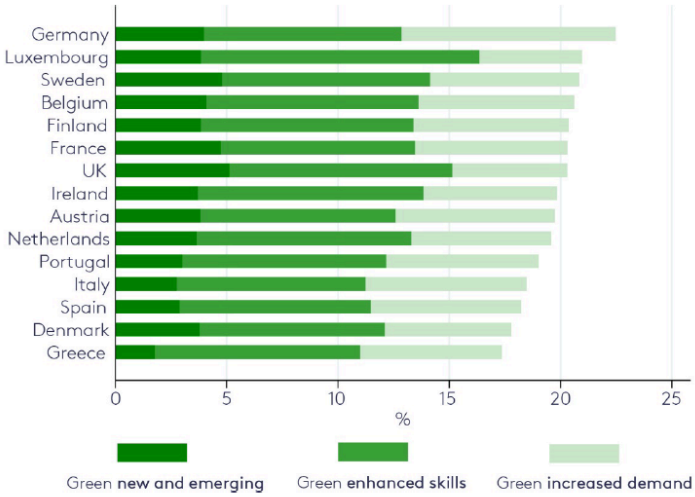


FIGURE 13.3 – Part des emplois GNE, GES et GID dans l'emploi total de divers pays d'Europe en 2019. Source : Valero et al. (2021).

verts sous l'angle de l'âge, du genre, du niveau de diplôme. Ils régressent successivement chacune de ces caractéristiques sur le caractère vert de la profession du travailleur [354] et un ensemble de variables binaires de contrôle [355]. Les travailleurs des professions vertes sont plus âgés et plus fréquemment de genre masculin [356], ils ont plus souvent un diplôme universitaire et ont plus souvent un contrat à durée indéterminée. La désagrégation par catégorie révèle que ces effets sont en réalité plus importants (en valeur absolue) et plus souvent statistiquement significatifs au sein des professions de type GNE. De plus, le signe des coefficients est à plusieurs reprises opposé parmi les professions GID. Soulignons qu'il ne s'agit que de corrélations marquées par les limites de la classification retenue.

Maldonado et al. (2024) exploitent également la classification européenne ESCO. ESCO présente une description de 3 000 professions et les exigences de *compétences et de connaissances* associées. Les compétences et les connaissances liées à la réduction de l'impact de l'activité humaine sur l'environnement ont été qualifiées de "vertes" [357]. Dans la logique

354. Concernant la mesure, voir la note de bas de page 350.
355. Les auteurs prennent en compte le temps, le secteur et la région du travailleur.
356. Comme le montre la figure 2 de Causa et al. (2024b), cette conclusion apparaît robuste à la prise en compte d'une autre définition, à savoir un seuil de 10% de l'indicateur de greenness de la définition 4.
357. Le rapport de la European Commission (2022a) détaille la procédure suivie. En bref, l'identification des compétences et des connaissances vertes dans ESCO s'est appuyée sur un processus combinant l'étiquetage et la validation humaine (appliquant la définition du CEDEFOP "the knowledge, abilities, values and attitudes needed to live in, develop and support a society which reduces the impact of human activity on the environment"), ainsi que l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique (Machine Learning).

de la définition 4, une proportion de compétences et connaissances vertes peut être calculée pour chaque groupe de professions de la classification ISCO à 4 chiffres. Ensuite, lors du passage à la quantification des emplois, une agrégation est opérée puisque la classification à 3 chiffres est la plus fine disponible. Maldonado et al. (2024) retiennent comme "verts" quinze groupes de professions (sur les 130) dont la proportion évoquée à l'instant dépasse le seuil de 0,1[358]. Une réelle source de préoccupation est le constat que seules quatre groupes de professions se retrouvent également dans la liste de professions créée à partir de la nomenclature américaine[359]. Une différence marquante est la présence plus forte de professions de l'agriculture lorsqu'on recourt à ESCO. Cela dit, ces quinze groupes de professions représentent en 2022 en tout 7,1% de l'emploi au niveau de l'Union européenne. Maldonado et al. (2024) notent que cette proportion est en *diminution* constante depuis 2011, année où cette même proportion était voisine de 8,5% alors que la proportion basée sur la nomenclature américaine est en légère croissance. Selon les auteurs, ceci provient de la présence de groupes de professions du secteur de l'agriculture lorsque ESCO est utilisé. L'emploi dans ce secteur suit en effet une tendance à la baisse. La figure 13.4 révèle la situation hétérogène des pays européens.

358. Directeurs de la production dans l'agriculture, la sylviculture et la pêche, Directeurs d'hôtels et de restaurants, Professionnels des sciences de la vie, Professionnels de l'ingénierie (à l'exception de l'électro-technique), Vétérinaires, Techniciens du contrôle des processus, Techniciens des sciences de la vie et assimilés, Maraîchers et producteurs de cultures, Producteurs de cultures mixtes et d'animaux, Ouvriers forestiers et assimilés, Producteurs de cultures de subsistance, Producteurs de cultures mixtes et d'animaux de subsistance, Peintres, nettoyeurs de bâtiments et assimilés, Manœuvres de l'agriculture, de la sylviculture et de la pêche, Ouvriers de l'industrie des déchets

359. Les voici : les Professionnels de l'ingénierie, les Professionnels des sciences de la vie, les Techniciens des sciences de la vie et assimilé et les Ouvriers de l'industrie des déchets.

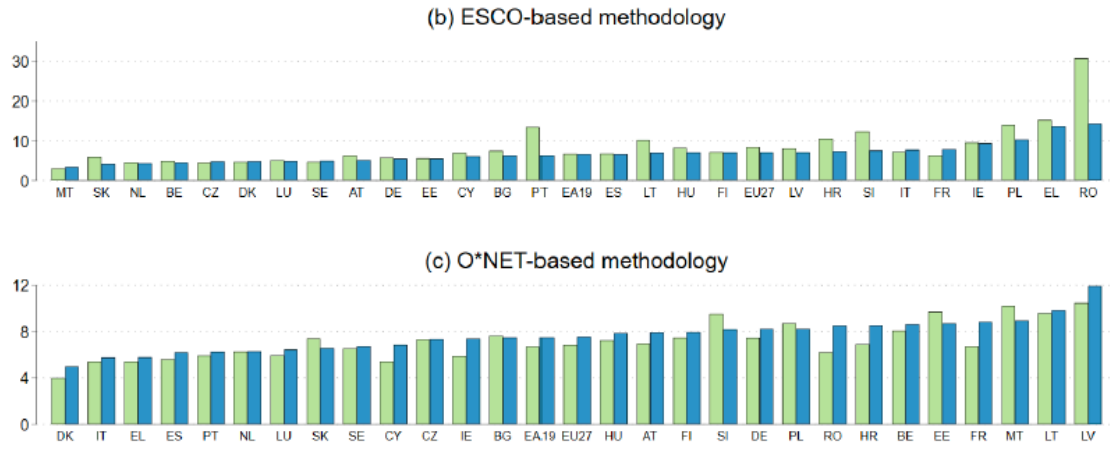


FIGURE 13.4 – Part, en %, des emplois "verts" dans l'emploi total par pays d'Europe en 2014 (en vert) et durant la dernière année disponible (période 2021-23, en bleu) quand on recourt aux données d'O*NET ou d'ESCO en retenant un seuil respectivement de greenness de 10% ou de 10% de de compétences et connaissances "vertes". Source : Figure 5 de Maldonado et al. (2024).

Imposer une proportion de 10% de compétences et de connaissances favorables à l'environnement dans le total de celles-ci est un choix arbitraire. Quand ce seuil n'est pas imposé, Maldonado et al. (2024) pondèrent simplement les emplois par la proportion de compétences et de connaissances dites vertes. Ce faisant, ce rapport se rapproche de la logique suivie par la définition 4 dans le cas de la nomenclature américaine. La part des emplois verts apparaît alors plus faible puisqu'elle ne s'élève plus qu'à 4,0% en 2022.

SIA (2024) étudient les offres d'emploi de 2023 provenant du site de recrutement en ligne Indeed dans cinq pays [360] et quatre secteurs [361] à l'aide de la notion de compétence et de connaissance verte d'ESCO. Si le texte décrivant un emploi vacant contient au moins une telle compétence/connaissance, celui-ci est déclaré être vert. Au sein des secteurs couverts, la fréquence d'offres d'emplois vertes était en 2023 de 9,4% en Belgique, 6% en France, 5,3% aux États-Unis, 4,0% aux Pays-Bas et 2,8% au Canada. L'hétérogénéité sectorielle est grande. Le secteur englobant l'énergie, l'eau et le traitement des eaux usées présente la fréquence la plus élevée d'offres d'emploi verts.

360. Belgique, France, Pays-Bas, États-Unis et Canada.
361. Le secteur englobant l'énergie, l'eau et le traitement des eaux usées ; les services financiers ; le commerce de détail ; le transport et la logistique.

13.3.2 Résumé relatif aux emplois verts au sein de l'Union européenne

La transposition de la nomenclature des professions vertes des États-Unis (Dierdorff et al., 2009, 2011) à l'Union européenne présente une complexité certaine. Le choix des hypothèses de mise en oeuvre peut aboutir à des proportions d'emplois verts (au sens de la définition 3) pouvant varier du simple au double (de l'ordre de 20% chez Valero et al., 2021, et de 40% chez Bowen et Hancké, 2019). Si l'on retient l'approche par les tâches et la notion de greenness de la définition 4, la proportion d'emplois verts chute et avoisine 7,5% au sein de l'Union lorsque l'on retient un seuil de greenness de 10% pour déclarer qu'une profession est verte (Maldonado et al., 2024).
Une alternative récente, qui évite cette délicate tâche de transposition, consiste à exploiter la classification européenne des compétences et connaissances ESCO. La part des emplois pondérée par la proportion de compétences et de connaissances dites vertes, s'élève à 4,0% en 2022. Rappelons, à titre de comparaison, qu'aux États-Unis au cours des années 2010, une approche analogue, mais en termes de tâches, basée sur la définition 4 aboutissait à une part aux alentours de 2 à 3%.
L'approche par les tâches (la nomenclature nord-américaine utilisant O*NET), appliquée à l'Europe, et celle exploitant la source européenne ESCO conduisent à deux listes de groupes de professions vertes ayant une intersection étroite. C'est une première grande source de préoccupation et de perplexité face à cette littérature. Même si ces deux listes conduisent à des constats communs, comme la sous-représentation des femmes dans les emplois dits verts, elles génèrent malheureusement aussi des conclusions opposées sur des aspects essentiels. La citation suivante en est une illustration préoccupante :

> "While still representing a minor proportion of green jobs overall, low-skilled jobs take up a larger proportion of green jobs than of nongreen jobs according to the ESCO-based methodology ; while high-skilled jobs are strongly overrepresented among green jobs when using the O*NET-based methodology. (...) While the O*NET-based methodology identifies in particular managerial and professional occupations as green, the ESCO-based methodology identifies several agriculture-related jobs as green that are not identified as green in the O*NET-based methodology presented in this paper. Accordingly, green jobs identified by the O*NET methodology used in this paper have higher skills requirements than those identified using ESCO information." (Maldonado et al., 2024, p. 21)

13.3.3 Les emplois bruns en Europe

Vandeplas et al. (2022) définissent les emplois bruns en Europe comme ceux situés dans les secteurs aux émissions *par travailleur* les plus intensives en gaz à effet de serre[362]. Le

362. Exploitant les "Air Emission Accounts" d'Eurostat, la mesure concerne les émissions réalisées par les entités économiques résidant sur le territoire de l'Union européenne, peu importe où les émissions sont pro-

classement des secteurs concernés est assez semblable d'un pays à l'autre au sein de l'Union européenne. La part des emplois bruns dans l'Union européenne des 27 a décru de 8,1 à 5,7% entre 2008 et 2021. Au sein de ceux-ci, la part de l'emploi dans les mines de charbon et de lignite a baissé sur la même période de 0,17 à 0,11%. La figure 13.5 montre que les pays membres de l'Union ont cependant des proportions d'emplois bruns hétérogènes. Cette proportion peut encore se situer entre 25 et 30% dans certaines régions de Grèce et de Roumanie. L'emploi dans les mines de charbon et de lignite demeure, lui, important en Pologne (0,8% de l'emploi total) et en Bulgarie, Roumanie et Tchéquie.

Selon Vandeplas et al. (2022), les femmes et les jeunes travailleurs sont sous-représentés dans les emplois bruns. Sans donner de précision sur la mesure, les auteurs indiquent aussi : "Patterns of job-specific skill requirements suggest that there are less high-skilled jobs, but more medium- and low-skilled jobs in brown sectors than in the aggregate economy (...). In coal mining, medium-skilled jobs prevail, and there are less high- as well as low-skilled jobs (and workers) than in the aggregate economy. Fairly similar results obtain when considering workers' qualification levels instead of jobs' skill requirements" (p. 17).

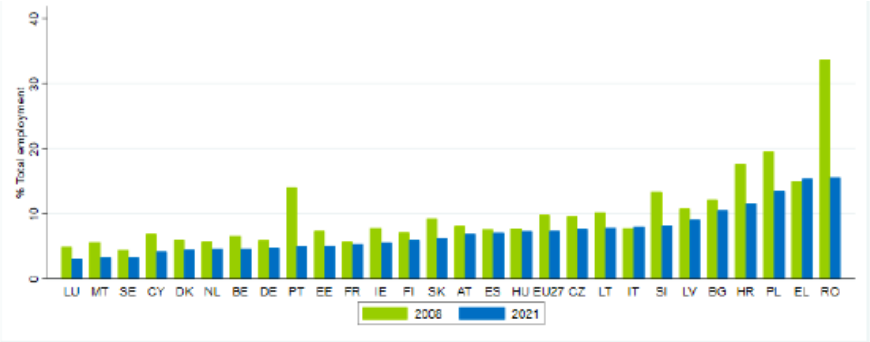


FIGURE 13.5 – Part des emplois bruns selon les pays de l'Union européenne des 27 en 2008 et 2021). Source : Figure 5 de Vandeplas et al. (2022).

Causa et al. (2024a) considèrent la même liste de polluants que Vona et al. (2018) (voir la définition 1). Causa et al. (2024a) développent une mesure propre à chaque pays européen. Au cours des années 2011 à 2019, environ 4 % des travailleurs occupent des emplois à forte intensité de pollution, avec une proportion allant de 9 % en Tchéquie et en République

duites. Par exemple, les émissions d'avions d'une compagnie aérienne européenne sont comptabilisées sans tenir compte de l'espace géographique où le vol a lieu. Selon la même logique les émissions d'un navire non européen dans les eaux territoriales européennes sont ignorées. Comme Vandeplas et al. (2022) ventilent les émissions par secteur d'activité, les émissions liées à la production pourraient être corrigées pour tenir compte de celles liées aux exportations et aux importations, mais le document ne le précise apparemment pas. On notera au passage que la définition 2 de l'OECD (2024) est différente de celle de Vandeplas et al. (2022).

slovaque à environ 2 % en Autriche. Ces proportions sont assez stables au cours de la période considérée. La part régionale des emplois dans des secteurs intensifs en carbone est un élément pris en compte par Vrontisi et al. (2024) pour identifier finement les régions européennes qui risque le plus d'être exposées à des perturbations socio-économiques du fait de la transition énergétique.

13.4 Quantification des emplois verts et bruns au sein de l'OCDE

Après avoir traité des États-Unis, puis de l'Europe, élargissons à présent la perspective aux pays de l'OCDE [363]. L'OCDE a produit récemment deux rapports qui exploitent des définitions différentes : OECD (2023) et OECD (2024). Le premier s'inspire des définitions proposées Vona et al. (2018), le second s'en écarte. Ce manque de stabilité est source de confusion.

Le rapport de l'OECD (2023) adopte une approche binaire : un emploi est vert (et désigné de l'appellation "green-task job") si l'indicateur de greenness (de la définition 4) est au moins égal au seuil (arbiraire) de 0,1. Par ailleurs, ce rapport recourt à la définition 1 des emplois bruns et parle de "polluting jobs". Au niveau de l'ensemble de l'OCDE, en 2021 [364], l'OECD (2023) estime que 18% des emplois étaient des "green-task jobs" et 12% étaient des "polluting jobs" [365]. Ces pourcentages, qui apparaissent fort élevés, recouvrent une grande dispersion régionale (Figure 2.3 du rapport). Exploitant l'indicateur de greenness mais sans imposer un seuil, Tyros et al. (2023) appliquent la formule (13.1) aux pays de l'OCDE à partir de données relatives aux années 2017–2019. La figure 13.6 montre qu'en moyenne au sein de l'OCDE, la proportion d'emplois verts n'est plus que de 3% environ. Cette figure met aussi en évidence une hétérogénéité assez importante d'un pays à l'autre.

Ayant opté pour la définition 3, l'OECD (2024) estime que 20% des emplois de l'OCDE étaient verts entre 2015 et 2019 (ces emplois se ventilant en 40% de professions GES, 46% GID et 14% GNE). Pour les raisons fournies à la section 13.2, on doit cependant mettre ce mode de calcul en doute et préférer les quantifications présentées à la figure 13.6. Le même rapport de l'OECD (2024) s'écarte aussi du rapport de 2023 en ce qui concerne les emplois "bruns". L'OECD (2024) exploite en effet la notion d'emploi dans les secteurs à

363. Alexander et al. (2024) s'intéressent à la même question dans le cas de l'Afrique du Sud, du Brésil et de la Colombie, des États-Unis et du Royaume-Uni. Reflet des différences de structures d'emploi entre les économies avancées et les économies émergentes, les auteurs concluent que les professions vertes sont davantage qualifiées dans les premières que dans les secondes. La présence dominante d'hommes dans les emplois verts est en revanche une caractéristique commune.

364. Selon les pays, la dernière année disponible est en réalité 2019, 2020 ou 2021.

365. Cet ordre de grandeur est surprenant. En effet, l'application de la même définition 1 par d'autres auteurs aboutit à des proportions plus basses voisines de 3 à 4%. C'est le cas de Bluedorn et al. (2023) pour une entité géographique regroupant l'Europe et l'Amérique du Nord. Bergant et al. (2022) concluent que la part des emplois bruns avoisine 3% aux États-Unis.

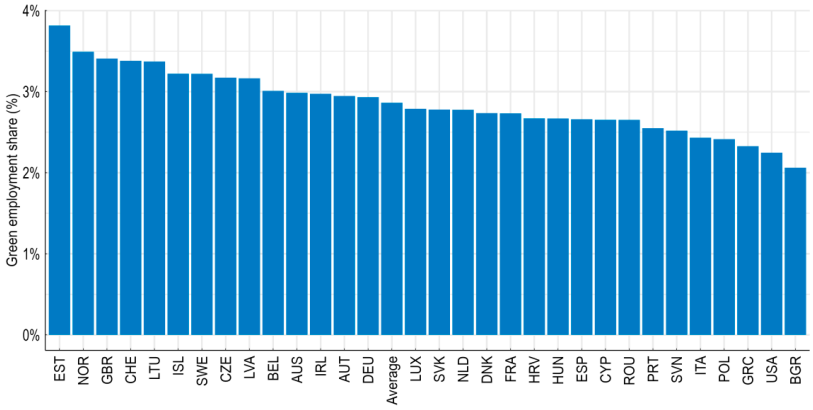


FIGURE 13.6 – Part des emplois verts dans les pays de l'OCDE (2017–2019) par application de la formule (13.1) de Vona et al. (2018). Source : Figure 3 de Tyros et al. (2023).

haute émission de GES (voir la définition 2 rappelée en légende de la figure 13.7). Alors que leurs contributions aux émissions de GES sont très élevées (échelle de droite de la figure), la part de ces emplois n'est que de 7% en moyenne au sein des 26 pays l'OCDE présents sur cette figure (avec un minimum de 4,6% aux Pays-Bas et un maximum de 11,5 % en Pologne, le Royaume-Uni et les États-Unis se trouvant dans le bas de la distribution et le Mexique dans le haut).

Au niveau de l'agrégat formé par l'Australie, le Canada, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, le Royaume-Uni et l'Union européenne, l'OECD (2023) estime que la part des hommes dans les emplois verts s'élève à 71,7% et celle des femmes à 28,3% en 2021[366]. La disparité de genre se retrouve au niveau des emplois bruns puisqu'au même niveau géographique, 83% de ces emplois sont occupés par des hommes. Au niveau de l'agrégat formé de l'Union européenne, du Royaume-Uni, de la Norvège et de la Suisse, l'OECD (2023) compare la proportion des emplois verts d'une part, des autres emplois d'autre part, selon la taille de l'employeur. La proportion d'emplois verts est relativement plus importante dans les grandes entreprises (30,6% en 2019 ou 2021 selon les pays) contre 24,5% pour les emplois non-verts. Le classement de ces mêmes proportions s'inverse dans les entreprises de tailles moyenne et petite (voir la figure 2.12 du rapport).

Bluedorn et al. (2023) exploitent des données individuelles annuelles issues de 31 pays d'Europe et d'Amérique du Nord entre 2005 et 2018. Ils utilisent la définition 4 de "degré de greenness" des professions aux États-Unis et l'appliquent à la nomenclature des professions ISCO à 3 digits[367]. Ils s'inspirent par ailleurs de la définition 1 des emplois bruns (Vona

366. Au Japon, Kuai et al. (2025) constate également une sous-représentation des femmes dans les emplois verts en 2021 (par application de la définition du B.L.S. ; voir la note de bas de page 319).
367. Comme l'a expliqué la section 13.3, cette transposition requiert de faire certaines hypothèses.

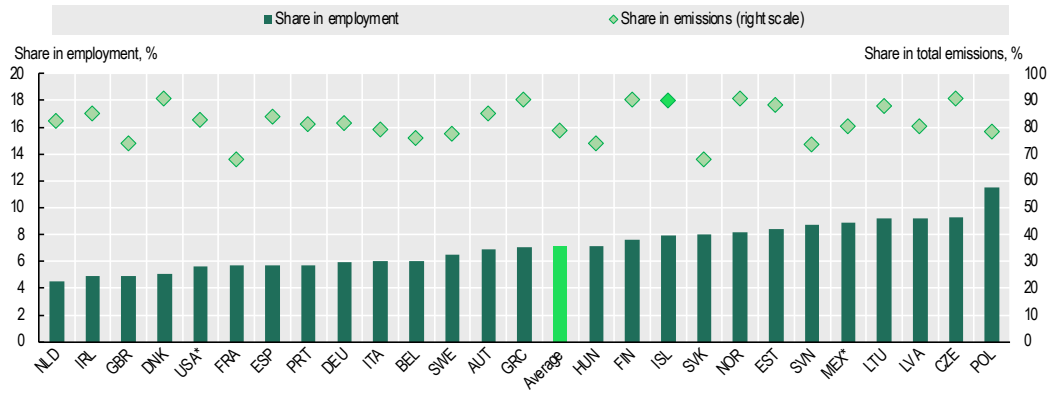


FIGURE 13.7 – Part des emplois dans les secteurs à haute émission de GES en 2019 et part de ces secteurs dans les émissions de GES. Source : Figure 3.2 de OECD (2024).

Pour le Mexique et les États-Unis, les données sont relatives à 2016. L'agriculture est exclue. Un secteur est considéré comme fortement émetteur s'il se situe dans les deux déciles supérieurs de la distribution moyenne de l'intensité des GES (tonnes rapportées à la valeur ajoutée) dans au moins 10 des 32 pays considérés (p. 140). Une fois les secteurs identifiés, l'emploi est mesuré en nombre de travailleurs.

et al., 2018) mais seulement pour la construction d'un indicateur d'intensité polluante de chaque profession de la nomenclature ISCO à 3 digits[368]. D'un pays à l'autre, la part des emplois verts se situe entre 2 et 3 %[369]. En moyenne parmi les pays considérés, cette part croît peu au cours de la décennie 2010 et est voisine de 2,5% en 2019. Une fois de plus, le recours à une définition binaire des emplois verts et l'utilisation d'une pondération par le degré de greenness conduisent à des ordres de grandeur bien différents. D'un pays à l'autre, la moyenne (pondérée) de l'intensité polluante des professions se situe, quant à elle, dans la fourchette allant de 2 à 6 %[370]. En moyenne parmi les pays considérés, cette intensité moyenne décroît lentement au cours de la décennie 2010 et elle est voisine de 4% en 2019. Bluedorn et al. (2023) rappellent que l'essentiel des professions est neutre au sens

368. Juste avant la définition 1, le texte a expliqué que six polluants ont été retenus par Vona et al. (2018). L'émission de ces polluants par travailleur est connue par secteur (d'une nomenclature à 4 digits) aux États-Unis. A partir de cette information, Bluedorn et al. (2023) construisent un indice de pollution entre 0 et 100 par profession de la nomenclature ISCO. A titre d'illustration, la profession 814 des conducteurs de machines pour la fabrication de produits en caoutchouc, en matières plastiques et en papeterie (exemple cité ci-dessus dans l'encadré 5 relatif à la nomenclature ISCO) a un degré de greenness de 0 et une intensité polluante de 73,2 sur cette même échelle.

369. Calculée au départ de données individuelles de travailleurs, cette part est la moyenne du degré de greenness pondérée par l'emploi.

370. Calculée au départ de données individuelles de travailleurs, cette part est la moyenne de l'indice de pollution (décrit dans la note de bas de page 368) pondérée par l'emploi.

où tant leur degré de greenness que leur intensité polluante sont nuls.

En résumé, comme ce fut le cas pour les autres entités géographiques, dans le cas de l'OCDE, la quantification des emplois "verts" dépend beaucoup de la définition retenue. Même si l'étude de Bluedorn et al. (2023) se limite à l'agrégat formé de 31 pays d'Europe et d'Amérique du Nord entre 2005 et 2018, elle est actuellement la référence. En exploitant la définition 4, ces auteurs obtiennent une part des emplois verts voisine de 2 à 3 %. Comme d'autres études, il est frappant que la part des emplois verts croît peu au fil du temps. Quant aux emplois bruns, trois études citées utilisent chacune leur propre définition. A la fin de la décennie 2010, de 12 à 4 % des emplois étaient bruns au sein, respectivement, de l'OCDE et d'un sous-ensemble de ses pays.

13.5 Réflexions critiques

Comme l'écrit le rapport de l'OECD (2023), l'approche basée sur les professions et les tâches de la section 13.2 n'est mise à jour que périodiquement [371]. L'apparition de nouvelles professions ne peut donc être prise en compte qu'avec un délai. La nomenclature des professions vertes évoquées dans cette même section 13.2 est aussi propre aux États-Unis : la section 13.3 a expliqué pourquoi sa transposition à d'autres parties du monde ne va pas de soi. Quelle que soit la zone géographique considérée, les ordres de grandeur obtenus varient en outre fortement d'une étude à l'autre. Face à cette difficulté, les résumés ont proposé un guide de lecture. Un constat génère cependant une source de grande perplexité : dans le cas européen, il est en effet fort préoccupant de constater que l'approche par les tâches (la nomenclature nord-américaine utilisant O*NET) et celle exploitant la source européenne ESCO conduisent à des listes d'emplois verts si différentes. On en vient à douter de la robustesse des messages des résumés ci-dessus.

Une fois le degré de finesse de la nomenclature des professions déterminé, l'approche de la section 13.2 ne peut distinguer la nature des emplois (vert ou non) à l'intérieur d'une profession. Cette limitation est à présent dépassée par le recours à l'information disponible dans les déclarations d'emplois vacants disponibles en ligne. La sous-section 13.2.3 a illustré l'utilisation de cette nouvelle source d'information.

Une littérature récente critique plus globalement l'ensemble des manières de définir les emplois verts et bruns décrites ci-dessus. Elle propose d'autres approches pour cerner ces emplois. La suite illustre cette littérature critique par l'évocation de deux articles de nature très différente [372].

Pour Ounnas (2025), la difficulté principale résulte de ce que la définition assez gé-

371. Le premier dénombrement réalisé identifiait 111 professions de type GNE ou GES (Consoli et al., 2016). Plus récemment, ce nombre était de 142 (Urban et al., 2023).

372. On peut aussi se référer à Kwauk et Casey (2021) et Janta et al. (2023).

nérale d'un emploi vert, telle qu'énoncée par UNEP/ILO/IOE/ITUC (2008) au début de ce chapitre, est multidimensionnelle. Résumer ces multiples dimensions en un indicateur "vert ou non-vert" a, dans la littérature, généralement consisté à privilégier une dimension (par exemple, l'output du secteur ou la profession) [373]. Si l'on admet que chacun des indicateurs retenus par les auteurs évoqués ci-dessus contient une part de l'information recherchée, Ounnas (2025) propose la construction d'un indicateur composite basé sur un éventail d'indicateurs de mesure pertinents. Il exploite donc les divers indicateurs évoqués plus haut et d'autres encore qui sont disponibles au niveau européen (au mieux sur la période 2006–2023). Chacun d'eux est standardisé de telle sorte qu'il ait une moyenne nulle et une variance unitaire. Ensuite, sachant qu'il y a des corrélations entre ces indicateurs et tenant compte d'observations manquantes, l'auteur construit petit à petit un indicateur agrégé au niveau de chaque pays membre de l'Union européenne (le Green Employment Index). Plus celui-ci est élevé, plus la part d'emplois verts est importante dans le pays correspondant. Il s'agit donc ici de classer les pays et la progression de chacun au fil du temps et, non, de dénombrer les emplois verts de chaque pays. La figure 13.8 présente le classement des pays obtenus en 2022.

Bohnenberger (2022) reproche à toutes les notions d'emplois verts et bruns évoquées jusqu'ici de ne pas questionner notre système économique et la place qu'y occupe la consommation et l'objectif de production. Bohnenberger (2022) propose une taxinomie de "l'emploi soutenable" qui n'octroie le label vert à un emploi que s'il rencontre les exigences selon quatre dimensions. Les trois premières superposent des éléments centraux des définitions vues tout au long de ce chapitre. La quatrième dimension concerne le lien entre les caractéristiques de l'emploi et le style d'existence que le travailleurs mène ou est en mesure de mener. Il faut que le contenu de l'emploi permette un style de vie soit soutenable. Cette quatrième dimension se traduit en conditions sur notamment les rémunérations et sur le temps de travail. Le rapport de Urban et al. (2023) est une étape dans la mise en oeuvre de la définition exigeante de Bohnenberger (2022).

373. Les articles exploitant des emplois vacants (par exemple, Saussay et al., 2024) les catégorisent en revanche à partir d'un éventail de caractéristiques.

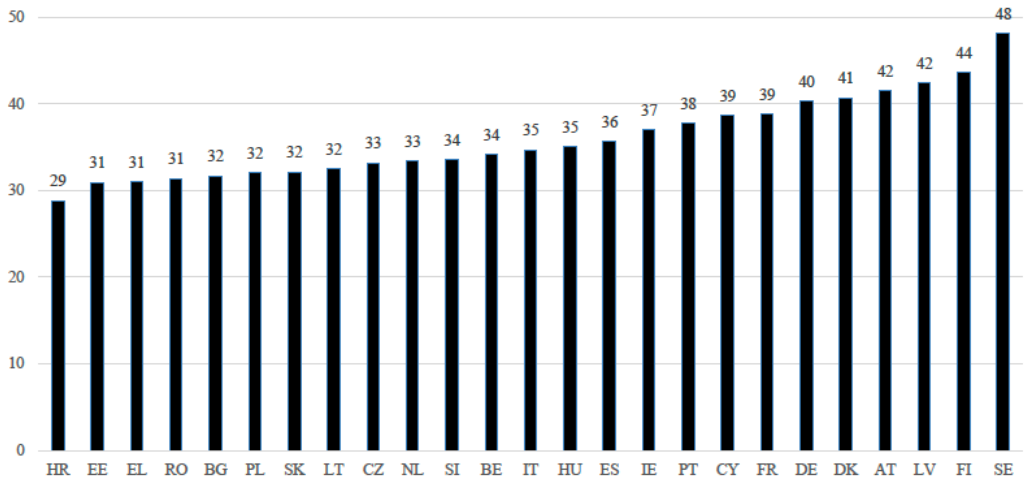


FIGURE 13.8 – Green Employment Index des pays de l'Union européenne en 2022. Source : Ounnas (2025).

Plus le Green Employment Index est élevé, plus la part d'emplois verts est importante dans le pays correspondant. Le score maximal est de 100.

Chapitre 14

L'économie circulaire

Le modèle d'**économie linéaire** consiste à absorber des ressources naturelles [374] dans les processus de production de divers biens et services. Après avoir acheté ceux-ci, les utilisateurs finaux les éliminent [375] une fois qu'ils sont consommés, qu'ils ne remplissent plus leur fonction ou qu'ils deviennent démodés. Le modèle d'économie linéaire, qui a longtemps été le seul dans bien des pays, est intensif en ressources naturelles et les diverses étapes de ce modèle linéaire sont notamment émettrices de gaz à effet de serre. L'appellation **économie circulaire** n'a pas une signification unique [376]. Néanmoins, en termes généraux, cette alternative au modèle linéaire cherche à limiter les besoins en ressources naturelles et à réduire la quantité de déchets. Dans ce but, l'économie circulaire promeut une série d'activités dont la première lettre est un 'r' [377] :

— D'une part, la réparation, le réaffectation et le réemploi et
— D'autre part, le recyclage et la réutilisation.

Le premier groupe de termes en 'r' allonge la durée d'utilisation de matières, de substances, d'objets qui ne sont pas des déchets. Le second groupe, lui, concerne des déchets qui trouvent un nouvel usage. Il importe de noter que le recyclage ne peut être total car des pertes sont inévitables. La réutilisation ne peut par ailleurs être infinie. Autrement dit, la dématérialisation de l'activité économique atteint tôt ou tard ses limites [378].

Tant le modèle linéaire que le circulaire utilisent des ressources naturelles et ils sont tous

374. Biomasse, minerais métalliques, minéraux non métalliques, énergies fossiles, eau, sols, etc. On reconnaît ici le terme Y/α_X du chapitre 8.
375. On reconnaît ici le terme Y/α_Z du chapitre 8.
376. A ce propos, voir par exemple Korhonen et al. (2018), Grafström et Aasma (2021) ou Multani et al. (2022).
377. Ci-dessous, la régénération des ressources biotiques renouvelables (comme le bois) est omise. L'accent est implicitement mis sur les ressources naturelles abiotiques (comme les minéraux - par exemple, les roches - et les minerais - par exemple, les métaux).
378. Les possibilités de recyclage et de réutilisation sont très différentes d'une matière à l'autre. La manière de concevoir les équipements (appareils électro-ménagers, etc.) peut compliquer ou au contraire simplifier la tâche (Grafström et Aasma, 2021).

deux à l'origine de diverses types d'émissions[379]. En substituant un modèle circulaire au linéaire, on cherche à réduire le volume de (certaines) ressources naturelles absorbées par la production et les émissions de gaz à effet de serre. Des outils de mesure sont nécessaires pour vérifier qu'il en est bien ainsi[380]. Au-delà de ces objectifs, certains ont encore d'autres visées : un développement de l'emploi local[381], un découplage relatif entre la croissance économique et l'usage de ressources naturelles[382], une moins grande dépendance stratégique vis-à-vis d'une série de pays exportateurs de matières premières, par exemple.

Les chapitres précédents n'ont pas fait abstraction de l'économie circulaire. Son rôle n'était cependant pas souvent explicite. Dans la mesure où le remplacement du modèle linéaire par le modèle circulaire a des répercussions sur le marché du travail, il vaut la peine d'y accorder une place propre. C'est l'objet de ce chapitre. Il se structure de la manière suivante. Une première section porte sur la mesure de l'économie circulaire. Une deuxième évoque les mécanismes économiques qui lient le développement de cette économie et celui de l'emploi. Une troisième résume quelques essais de quantification des effets de cette économie sur l'emploi. La dernière section est un résumé.

14.1 La situation de départ

Laubinger et al. (2020) établissent un premier constat qui est informatif, bien qu'il date de 2011. Une analyse des données économiques sectorielles mondiales révèle en effet qu'à l'époque seulement cinq secteurs à forte "intensité matérielle"[383] représentaient près de 90% de l'utilisation mondiale de matières, tout en n'employant qu'environ 15% de la main-d'oeuvre (voir la figure 14.1).

Connaître l'importance de l'emploi dans l'économie circulaire est un préalable avant de

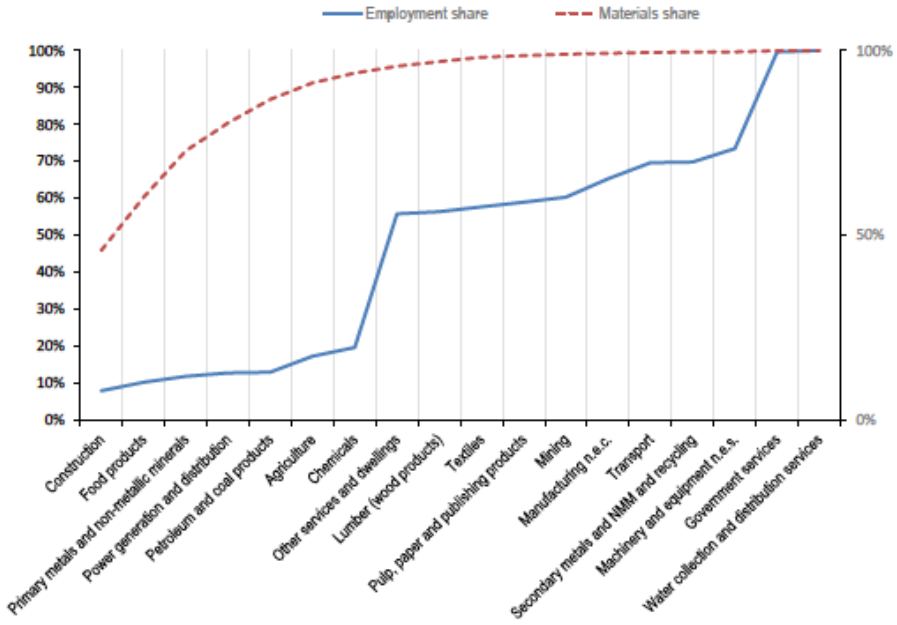
379. Vapeur d'eau, chaleur, gaz à effet de serre, SO_2, etc.

380. Fullerton et al. (2022) insistent sur ce point à la p. 500 de leur article. En Europe, Eurostat mesure la consommation intérieure apparente de matières (Domestic Material Consumption). Ce concept somme, en tonnes, les combustibles fossiles, les produits minéraux et agricoles, extraits du territoire national ou importés sous forme de matières premières ou de produits finis, moins les exportations de ces matières (plus de détails à l'adresse `https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material_flow_accounts_and_resource_productivity`). Adewale Alola et al. (2021), par exemple, exploitent cette source de données.

381. Ceci se comprend dans la mesure où une part non négligeable des ressources naturelles sont importées par les pays européens et sous la condition que les activités en 'r' soient plus intensives en main d'oeuvre locale que la gestion des déchets (enfouissement, etc.).

382. Fullerton et al. (2022) écrivent en effet : "Scholars of the CE (...) believe that technological change can help decouple growth from environmental harm" (p. 505), où "CE" est l'abréviation de circular economy. A propos de ce thème, voir l'encadré 14.

383. En bref, il s'agit de la biomasse, des minerais métalliques, des minéraux non-métalliques et des combustibles fossiles. Pour plus de précisions voir la source de Laubinger et al. (2020), à savoir la Global Material Flows Database du programme environnemental des Nations unies.



Note: The individual sectors in the figure are sorted by materials use, showing the sectors with the highest materials footprint on the left and sectors with small materials footprint on the right. The figure illustrates the cumulative shares of materials and employment per sector in a 0-100% scale.

FIGURE 14.1 – Parts cumulées de matériaux utilisés et d'emploi au niveau mondial en 2011. Source : Figure 2 de Laubinger et al. (2020).

tenter de prévoir son évolution. Or, cerner les limites de cette économie n'a rien d'évident. L'appareil statistique n'a pas été conçu pour mesurer un phénomène aussi transversal. Néanmoins Eurostat produit une série statistique par pays de l'emploi se situant dans le secteur du recyclage, le secteur de la réparation et de la réutilisation et le secteur de la location et du leasing (voir la figure 14.2) [384]. Entre 2014 et 2023 la part de l'emploi circulaire ainsi défini stagne à 2% au sein de l'Union européenne. Elle varie peu dans les grands pays mais croît dans certains pays plus petits.

384. Le point commun des indicateurs mentionnés ci-dessous est de circonscrire le périmètre de l'économie circulaire à partir des branches d'activité. La liste des branches retenues par Eurostat peut être téléchargée au bas de la page `https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/cei_cie011_esmsip2.htm`. Tout emploi d'une branche retenue est donc considéré comme une contribution à l'économie circulaire. Eurostat produit aussi de l'information sur les investissements privés et valeur ajoutée brute dans ces mêmes secteurs. A propos de l'emploi dans l'économie circulaire, on peut aussi consulter Llorente-González et Vence (2020) et l'e-book disponible à l'adresse `https://just2ce.eu/e-book/`. Ce dernier couvre notamment l'Afrique, la Chine et l'Inde.

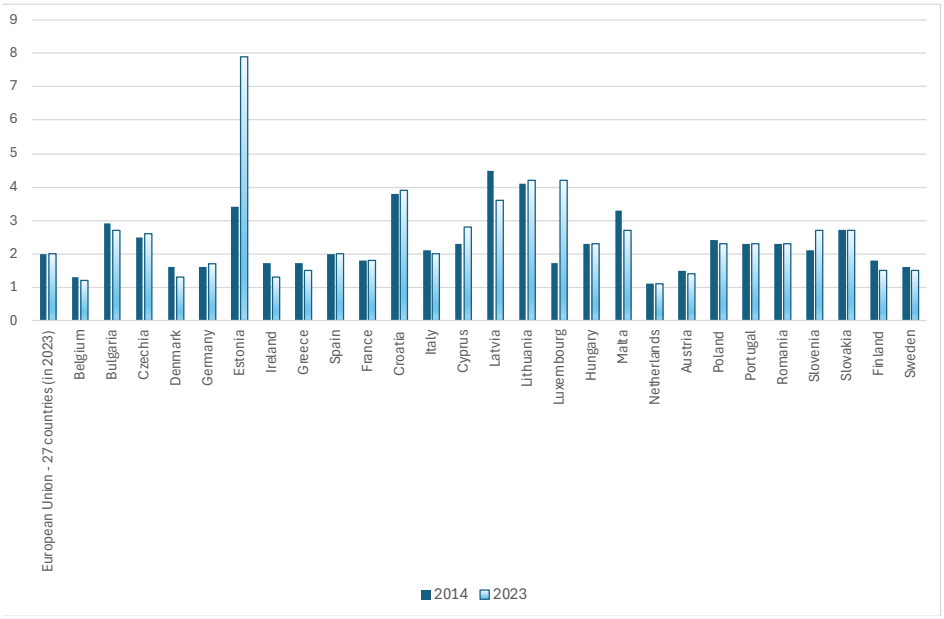


FIGURE 14.2 – Par de l'emploi se situant dans le secteur du recyclage, le secteur de la réparation et de la réutilisation et le secteur de la location et du leasing (ou crédit-bail) : comparaison entre 2014 (première observation) et 2023 (%). Source : Eurostat à l'adresse https://doi.org/10.2908/CEI_CIE011.

14.2 Mécanismes économiques

A moyen ou à long terme, la raréfaction de certaines ressources naturelles et la hausse des coûts d'extraction de celles qui restent accessibles va entraîner des changements de prix relatifs entre les différents inputs. Toute chose égale par ailleurs, ceci devrait accroître l'attrait du modèle circulaire au détriment du linéaire. Comme l'expliquent notamment Laubinger et al. (2020), le remplacement (progressif) du modèle linéaire de production par le modèle circulaire s'accompagne d'un changement dans les modes de production.

Rien ne permet cependant de supposer que les acteurs économiques privés prennent spontanément et suffisamment en compte les externalités liées à l'extraction des matières premières, à la production, la consommation et la mise au rebut[385]. La collectivité bénéficierait donc d'interventions bien conçues visant à internaliser ces externalités. On observe que diverses interventions publiques cherchent à accroître l'attractivité du modèle circu-

385. L'analyse économique appliquée à l'économie circulaire est synthétisée par Fullerton et al. (2022) et, plus récemment, par Fullerton (2024). Ces articles évoquent notamment les défaillances de marché présentes dans ce secteur et les réponses correctrices possibles.

laire[386] via notamment la taxation[387] et l'octroi de subventions[388]. Les interventions publiques visant à stimuler le développement de l'économie circulaire ou des changements dans les préférences des acteurs économiques modifient la demande de biens et services (par exemple, en faveur d'équipements plus aisés à réparer).

Ces évolutions ont des effets induits au niveau macroéconomique. Par exemple, si le modèle circulaire permet de réduire les coûts, et si ceci se traduit dans une baisse de certains prix, le pouvoir d'achat d'un revenu nominal inchangé augmente. Ceci devrait accroître la demande globale de biens et services et donc stimuler le recours aux ressources naturelles. On parle d'un "effet de rebond" de l'économie circulaire (voir par exemple Zink et Geyer, 2017). Si toutes ces évolutions s'observent à des rythmes différents d'un pays à l'autre, elles devraient avoir des implications sur le commerce international (via des différentiels de compétitivité internationale).

Tout ceci concerne la sphère économique. Mais tout changement dans cette sphère peut se heurter à des contraintes physiques (comme la conservation de la quantité physique de matière) que la plupart des modèles économiques ignorent[389]. En outre, un changement dans la sphère économique a des effets induits sur l'environnement qui l'entoure et ceci, en retour, a des répercussions sur cette sphère[390].

Suivant Laubinger et al. (2020), les mécanismes évoqués à l'instant affectent l'emploi de diverses manières :

1. La développement d'activités nouvelles dont le nom commence par 'r' devrait s'accompagner de l'expansion de certains secteurs et/ou de certaines entreprises, qui est créatrice nette d'emploi.
2. Des emplois prendront la place d'autres (substitution) ; par exemple, le moindre recours à l'enfouissement de déchets du fait du recours accru au recyclage engendre une substitution d'emplois dont l'effet net dépend de l'intensité des deux procédés en main d'oeuvre.
3. La moindre extraction de ressources naturelles, la moins rapide obsolescence de divers biens, etc. devraient entraîner des contractions d'activité économique, qui sont destructrices nettes d'emploi. Les secteurs concernés vont cependant réagir à la baisse de leurs débouchés. Si, par exemple, le recyclage généralisé des plastiques permet de

386. Voir, par exemple, les "Circular economy action plan" européen introduits aux pages `https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/first-circular-economy-action-plan_en` et `https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en`. Concernant la Chine, voir par exemple Bleischwitz et al. (2022).

387. Par exemple, une taxe payée lors de l'achat d'un bien en vue de financer le recyclage ou encore une taxation de la mise en décharge.

388. Par exemple afin de soutenir les collectivités locales dans la mise en place du tri et du recyclage.

389. Parmi les contre-exemples, citons les modèles EXIOMOD (Bulavskaya et al., 2016) et Vulcain (Godzinski, 2016), évoqués dans le rapport de l'ADEME et al. (2018).

390. Par exemple, le rythme des émissions de gaz à effet de serre affecte la température atmosphérique et celle des océans, ce qui engendre des cataclysmes naturels qui en retour endommagent la sphère économique.

réduire la demande de pétrole, les pays exportateurs vont probablement développer des stratégies pour contrecarrer cette tendance.

4. La nature des emplois peut aussi se modifier. La production d'un équipement à partir de pièces nouvelles ou à partir de pièces détachées analogues récupérées peut, par exemple, requérir des compétences différentes. Il en va de même dans l'exemple évoqué au second point.

14.3 Quantification des effets de l'économie circulaire sur l'emploi et sa structure

Afin de quantifier les effets sur l'emploi du développement de l'économie circulaire [391], les économistes se basent sur des modèles de l'économie. Laubinger et al. (2020) ont identifié une quinzaine d'études différentes. Il faut cependant être conscient des limites de ces outils :

> "The scenario design among the studies varies widely, but in general, most simulations revolve around economic instruments, as it remains complex to translate 'soft policies' (e.g. R&D funding, education awareness, labelling) and the uptake of new business models (e.g. sharing economy [392]) into quantifiable macroeconomic model configurations." (Laubinger et al., 2020, p. 23)

Parmi les instruments économiques, figurent au premier chef les outils de taxation. Plusieurs études développent des scénarios de taxation de (certaines) matières premières. Les effets en termes d'emploi varient notamment selon la manière d'allouer les recettes fiscales correspondantes. Les études adoptent assez souvent une réduction de la fiscalité sur le travail. En règle générale, les effets simulés sur l'emploi sont positifs [393].

Château et Mavroeidi (2020) utilisent le modèle ENV-Linkages [394] pour simuler les conséquences de l'introduction d'accises (croissantes au fil du temps) sur l'utilisation des

391. Les études évoquées ci-dessous s'appuient chacune sur une définition de l'économie circulaire qui leur est propre.

392. Ou "économie de partage". Grâce le plus souvent à des plateformes numériques, des biens y sont partagés entre des propriétaires/des producteurs et des utilisateurs. L'"économie de la fonctionnalité" ("functional or usage economy") aurait pu être ajoutée à la liste. Ce modèle économique consiste à vendre un service rendu par un bien (par exemple, des photocopies) plutôt que de vendre le bien (dans l'exemple, une photocopieuse). L'usage du bien, dont le vendeur reste propriétaire, est assorti d'un contrat qui permet d'assurer la longévité du bien. Les incitations pour le producteur-vendeur du bien sont aussi modifiées. Pour ces raisons, ce modèle influence la quantité de matière utilisée.

393. Voir la figure 1 de Laubinger et al. (2020). Rappelons que par effet on entend la comparaison de l'évolution de l'emploi par rapport à un scénario de base (propre à chaque étude), qui prolonge les tendances historiques tout en intégrant les éléments pertinents de législation adoptés avant une date qui précède la période de simulation des modèles.

394. Modèle d'équilibre général calculable de la direction environnement de l'OCDE, qui quantifie les flux physiques de matière associés aux flux économiques. Le monde est représenté par 29 régions. Au sein de

matières premières pour tous les métaux et minéraux non-métalliques. L'usage qui est fait des recettes fiscales est important. Ci-dessous, elles permettent l'octroi de subventions au recyclage et à la récupération de matériaux (avec maintien d'une neutralité budgétaire du secteur public). Ce scénario combinant accises et subventions porte le nom de "réforme fiscale matérielle". Il importe aussi de savoir que la version du modèle utilisée par Château et Mavroeidi (2020) suppose un marché du travail en concurrence parfaite où les travailleurs sont homogènes. La mobilité (sectorielle et géographique) est donc parfaite et les salaires réels sont flexibles. L'offre de travail réagit au salaire net (l'élasticité étant de 0,15). La productivité du facteur travail peut différer d'un secteur à l'autre.

La simulation de référence de Château et Mavroeidi (2020) requiert un ensemble d'hypothèses. En bref, avec des différences selon les régions du monde, la croissance de la population se ralentit et son vieillissement s'accompagne d'une baisse des taux de participation au marché du travail. La productivité totale des facteurs continue à croître. Dans les économies émergentes, il en va de même pour le rapport capital - travail. Une croissance économique se maintient mais elle varie selon le secteur et la région. Ce scénario de prolongement des tendances historiques s'accompagne d'un découplage relatif exprimé, ici, en termes de quantité de matières premières[395] par unité d'output. Toutefois, le volume mondial de prélèvement de ces matières continue à augmenter. La structure sectorielle se modifie : les créations d'emplois s'observent dans le secteur le plus intensif en matières (la construction), la production d'électricité renouvelable et les services. Des pertes d'emplois s'observent dans d'autres secteurs intensifs en matières premières (production d'énergie fossile, équipements électroniques, machines,...).

L'introduction d'accises sur les matières premières pour tous les métaux et minéraux non-métalliques entraîne notamment des substitutions entre inputs de production (ce qui a une répercussion sur les coûts de production) et une substitution d'une demande de services à la demande de certains biens. Lorsque les recettes de la taxe financent des subventions au recyclage et à la récupération, un renforcement de l'investissement apparaît. L'impact macroéconomique mondial sur la période simulée (2018-2040) est cependant faible car, écrivent Château et Mavroeidi (2020), l'ambition de la politique d'accises est modeste et les secteurs le plus immédiatement affectés pèsent en moyenne peu dans l'économie mondiale. L'impact sur l'emploi mondial du scénario de "réforme fiscale matérielle" est quasi nul à l'horizon 2040 : comparé à l'évolution dans la simulation de référence, le nombre de personnes en emploi augmente de 0,05% au sein de l'OCDE et parmi les BRICS[396] et de

chacune, il y a 22 secteurs. Château et al. (2014) proposent une description de ce modèle (voir aussi l'annexe de OECD et UNDP, 2025). Il s'agit d'un modèle dynamique récursif néo-classique. Tous les marchés sont en concurrence parfaite. En particulier, le marché du travail y est à chaque période en équilibre. Le modèle ENV-Linkages prend en compte l'éventail des politiques régionales d'atténuation des émissions de GES (tarification du carbone, subventions et réglementations). Ce modèle a été étendu afin d'y introduire la substitution entre les matières premières et les matières recyclées.

395. C'est à dire non recyclées. A propos de la notion de découplage relatif, voir l'encadré 14.

396. Acronyme qui désigne l'ensemble formé par les pays suivants : le Brésil, la Russie, l'Inde, la Chine et

seulement 0,01% dans le reste du monde. Comme cette réforme a deux volets, considérons les séparément. L'introduction des accises entraîne une faible baisse de l'emploi dans toutes les régions du monde : les d'emplois détruits dans les secteurs intensifs en matières premières sont plus nombreux que ceux créés dans les secteurs moins intensifs en ces matières et dans les secteurs valorisant les matières réutilisées ou recyclées. Les subventions aux activités de recyclage et de réutilisation (financées exclusivement par les recettes générées par les accises) permettent d'inverser le signe des effets sur l'emploi. Au total, une réallocation sectorielle de l'emploi s'opère entre un nombre limité de secteurs en décroissance (peu intensifs en main d'oeuvre) et un nombre lui aussi limité de secteurs en croissance. Les régions où l'extraction de matières premières représente une part importante de l'activité économique sont naturellement plus affectées (Afrique du Sud, Indonésie, etc.). La figure 14.3 illustre l'hétérogénéité géographique des effets bruts sur l'emploi du scénario de "réforme fiscale matérielle". L'ensemble de ces résultats suppose une introduction des accises dans toutes les régions du monde [397].

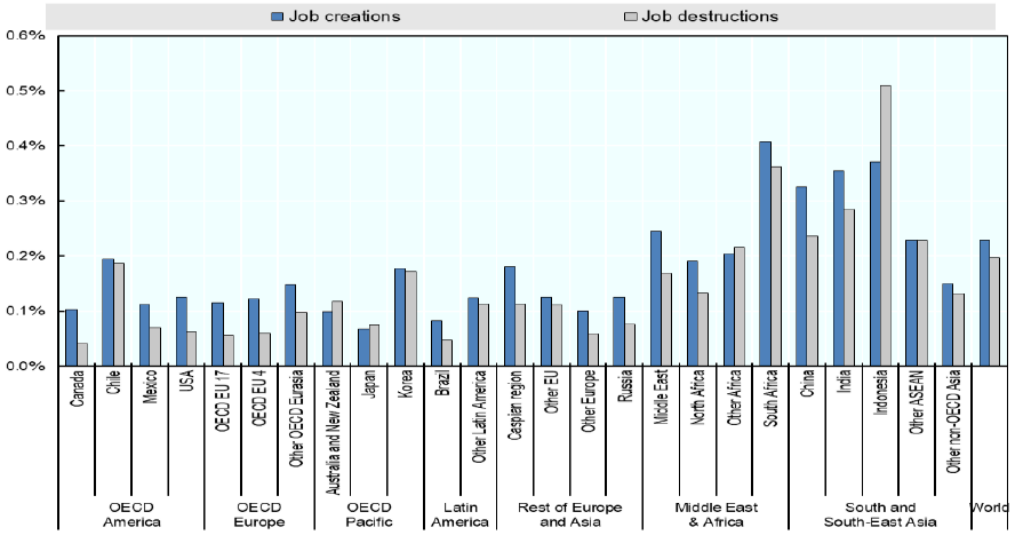


FIGURE 14.3 – Créations et Destructions brutes d'emplois par région en 2040 : impact régional relatif du scénario de "réforme fiscale matérielle" par rapport au scénario de référence (en %). Source : Figure 7 de Château et Mavroeidi (2020).

Selon Laubinger et al. (2020) et Château et Mavroeidi (2020), il y a un manque de connaissances sur les effets d'une transition vers l'économie circulaire sur la distribution

l'Afrique du Sud.

397. Château et Mavroeidi (2020) évoquent aussi le cas où seuls les pays de l'OCDE le font.

des métiers et surtout des compétences. A l'évidence, une telle transition engendre en tout cas une recomposition sectorielle de l'emploi. Le rapport de la European Commission, Cambridge Econometrics, Trinomics and ICF (2018) estime que "in terms of skills needs across the various sectors and occupations, the additional impacts of circular economy take-up are relatively small-scale in comparison with other drivers of change, such as the impact of technological change on jobs and the shift to high-skilled jobs in some sectors" (p. 7) [398]. Pour leur part, Château et Mavroeidi (2020) adoptent les projections sectorielles de professions et de compétences du CEDEFOP publiées en 2018 pour les pays de l'Union européenne. Soulignons que ces projections ne sont pas faites dans le contexte du scénario de "réforme fiscale matérielle" [399]. Château et Mavroeidi (2020) considèrent les secteurs où l'emploi croît (respectivement, décroît) relativement le plus dans leur scénario de "réforme fiscale matérielle" au sein de l'OCDE. A l'horizon 2030, les professions qui sont en plus forte augmentation requièrent des compétences moyennes ou élevées et celles qui diminuent le plus des compétences faibles.

A côté des analyses basées sur des modèles, il existe aussi des analyses sectorielles de la transition vers une économie circulaire [400]. Détailler ici cette information nous emmènerait trop loin. La plupart des autorités publiques ont leur site web consacré à l'économie circulaire [401] et elles affichent leurs ambitions en matière (notamment) d'emplois générés par la transition vers cette économie. Mais beaucoup de conditions doivent être remplies pour rendre cela possible, dont un coût du travail qui ne dissuade pas le recours à davantage de main d'oeuvre.

398. Ce rapport se base sur les simulations du modèle E3ME introduit dans l'encadré 10. Ce rapport se distingue assez nettement de celui de Château et Mavroeidi (2020) par la manière d'introduire l'économie circulaire. La démarche est en bref la suivante. Le rapport commence par identifier cinq secteurs particulièrement concernés par l'économie circulaire. Pour chacun, les auteurs identifient où l'économie circulaire y est déjà implantée et quelles pourraient être les extensions de cette pénétration. Enfin, ils retiennent un scénario d'extension modérée et un autre d'extension ambitieuse. Pour chacun d'eux et chacun des secteurs, les scénarios étudiés par le modèle E3ME étendent la portée de directives européennes (en particulier, relatives aux déchets). En pratique, ceci se traduit par un recours diminué (ou accru) à des inputs de tel ou tel secteur, des changements dans la distribution des dépenses des ménages, des investissements accrus dans le secteur du recyclage, etc. Ces modifications sont des chocs exogènes introduits lors de la simulation du modèle.

399. La possibilité que ce scénario modifie la structure de l'emploi au sein des secteurs est donc écartée a priori.

400. Par exemple, Repp et al. (2021) s'intéressent à l'industrie de l'habillement. Cet article se demande comment l'adoption de pratiques circulaires par celle-ci affecte la chaîne de valeurs et l'emploi de par le monde. Dans ce secteur, ils insistent sur la redistribution induite par l'économie circulaire entre les pays riches et les autres.

401. En voici quelques exemples. En Allemagne, voir https://www.bmuv.de/en/topics/circular-economy/circular-economy-overview. En Espagne, voir https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia.html. En France, voir https://institut-economie-circulaire.fr/economie-circulaire/. Au Royaume-Uni, voir https://www.gov.uk/government/publications/circular-economy-strategy-summary-moj/circular-economy-strategy-summary. Aux États-Unis, voir https://www.epa.gov/circulareconomy.

14.4 Résumé

Il n'existe pas une définition unique de l'économie circulaire. En outre, l'appareil statistique n'a pas été conçu pour mesurer un phénomène aussi transversal. Sous ces réserves, la part de l'emploi total se situant dans le cadre de l'économie circulaire paraît évoluer lentement dans la plupart des pays. Les modèles mathématiques standards de l'économie ne sont pas bien équipés pour simuler les changements induits par le développement de l'économie circulaire. Ils le font surtout à travers la prise en compte des effets de taxes et de subventions. Le développement de l'économie circulaire entraîne des changements de procédé de production et des substitutions entre secteurs et entre pays. L'impact macroéconomique mondial sur l'emploi semble être mineur, mais les pays exportateurs de matières premières sont bien entendu davantage touchés. L'impact d'une transition vers l'économie circulaire sur la distribution des métiers et des compétences n'est pas encore bien connu. Selon certains auteurs, cet impact serait globalement modeste. Les monographies sectorielles offrent ici un apport que ce texte n'a pas tenté de synthétiser.

Chapitre 15

La réallocation des emplois et des travailleurs

> "The redeployment of labor necessitates upfront expenditures on training and often relocation, beyond the resources available to many individuals. The social barriers to relocation compound the economic barriers " (Stern et Stiglitz, 2023, p. 298).
>
> "In standard neoclassical models, sectoral reallocation plays a positive role, leading workers into higher productivity industries. These predictions, however, stand in stark contrast with empirical studies in the labor literature, which find significant and persistent negative effects of sectoral shocks on worker outcomes.
> These large costs highlight the fact that workers are not perfectly mobile across sectors, at least in the short and medium run." (Yi et al., 2024, p. 838)

De nombreuses mutations ont entrainé et entraineront à l'avenir une réallocation d'emplois et de travailleurs. Songeons par exemple au progrès technique (automatisation, informatisation, intelligence artificielle) ou à des changements du degré d'ouverture des économies au commerce international. La littérature sur l'impact de la libéralisation du commerce international nous a mis en garde : la mobilité entre professions, secteurs et régions n'a souvent pas été suffisante pour éviter des pertes d'emplois dans certaines zones géographiques et une réallocation difficile pour les travailleurs [402]. L'objectif de ce chapitre est de se center sur les réallocations induites par le changement climatique et par les mesures visant à réduire l'émission de polluants (en particulier, les gaz à effets de serre).

Parce qu'il affecte davantage certaines régions (au sein des pays comme à l'échelle du monde), le changement climatique affecte de manière non uniforme les infrastructures,

402. Voir par exemple la citation de Yi et al. (2024), ci-dessus, Dix-Carneiro (2014), Autor et al. (2016) et la littérature internationale citée par ces références.

les entreprises et les personnes. Là où l'activité économique, voire la possibilité de mener une vie normale, est freinée par le changement climatique, un appauvrissement s'opère poussant des emplois et des travailleurs à se déplacer géographiquement. Ceci signifie que le changement climatique est aussi un *choc de réallocation*. Moins le changement climatique sera freiné, plus ce choc de réallocation sera important.

Hormis quelques scénarios analysés par certains outils de simulation, les études résumées dans les chapitres précédents suggèrent que les politiques accélérant la décarbonation des économies ont un impact limité sur le volume total de l'emploi. Toutefois, ces études indiquent que des secteurs et des métiers gagnent en importance et d'autres connaissent un déclin. Autrement dit, cette décarbonation induit aussi un *choc de réallocation* d'activités économiques et donc d'emplois. Or, la plupart des études évoquées jusqu'ici ne prennent pas en compte les difficultés que de telles réallocations représentent pour les travailleurs. Cette section va se pencher sur ce thème.

Au cours du processus de réallocation des emplois induit par les politiques de décarbonation, rien ne dit que les destructions et les créations d'emplois seront synchrones. Il en découle un risque, fût-ce temporaire, de croissance du chômage. En outre, comme la répartition géographique des activités économiques intensives en carbone n'est pas uniforme [403], cette réallocation induite pourrait aussi avoir une dimension spatiale car, en soi, rien ne dit que les créations d'emplois se localiseront dans les zones frappées par des pertes d'emplois.

Ces divers éléments conduisent à poser notamment les questions suivantes :

— Quelle est l'ampleur de la réallocation spatiale des travailleurs induite par le changement climatique ? Quels facteurs peuvent agir sur cette ampleur ?
— Comment les politiques environnementales et plus particulièrement celles qui combattent l'effet de serre marquent-elles la trajectoire des travailleurs des secteurs concernés ?
— A quel rythme, les travailleurs passent-ils d'un emploi au sein de l'économie fortement émettrices de GES à un autre emploi, en particulier au sein de l'économie dite "verte" ? Si ce rythme est lent, quelles en sont les raisons ? Est-ce dû à la distance (géographique, en termes de compétences ou de conditions de travail) entre les emplois en déclin et ceux qui se développent ?
— Comment évolue(ro)nt les zones géographiques, et donc leurs populations, particulièrement concernées par le déclin d'activités intensives en carbone ? Les activités intensives en carbone génèrent directement et indirectement des revenus et de l'emploi, rémunèrent d'autres facteurs de production [404], procurent des recettes fiscales

403. Voir par exemple la figure 13.5.

404. Une littérature , déjà mentionnée à la section 12.3, s'intéresse aux conséquences de la transition écologique (ou seulement énergétique) sur les risques associés aux actifs des entreprises exposées. On y évoque notamment les "actifs échoués" (en Anglais "stranded assets"), c'est à dire des actifs dont la durée de vie est prématurément écourtées par exemple suite au renoncement aux énergies fossiles carbonées.

au plan local, etc. Le déclin de telles activités peut désarticuler l'économie locale.

Ce chapitre apporte des éléments de réponse à ces questions. Il se structure de la manière suivante. Il évoque tout d'abord des travaux centrés sur la réallocation des personnes provoquée par le changement climatique puis la littérature relative aux réallocations induites par les politiques environnementales. Le constat que la mobilité entre les les professions "brunes" et les "vertes" est faible nous amènera enfin à nous interroger sur les raisons de cette faiblesse.

15.1 Changement climatique, migrations et réallocation des travailleurs

Ce thème n'est pas entièrement neuf. L'impact des ouragans sur la réallocation des travailleurs, étudié par Barattieri et al. (2023) à Porto Rico, a par exemple déjà été abordé au chapitre 7. La spécificité de cette section est double. Elle se penche d'abord sur la réallocation géographique (les migrations) induites par des phénomènes climatiques. Ensuite, elle se centre sur le lien entre les facteurs climatiques et la réallocation des travailleurs et des emplois. Cette sous-section illustre une préoccupation introduite à la section 2.2.2 : selon l'unité de temps retenue, les variations dont l'impact est étudié s'apparentent davantage à un choc météorologique à climat inchangé qu'à un changement climatique. Nous verrons que le choix de l'unité de temps peut entraîner des conclusions divergentes à propos d'indicateurs du marché du travail.

15.1.1 Changement climatique et migrations inter-régionales et internationales

De manière générale, la littérature basée sur des estimations économétriques apparaît traversée de controverses (Mously Mbaye, 2017, Beine et Jeusette, 2021, Oliva, 2024). La manière de mesurer le changement climatique ou le désastre (une variable binaire ou une mesure d'intensité) sont par exemple des facteurs qui importent (Beine et Jeusette, 2021). Le niveau de désagrégation géographique, la nature des chocs climatiques subis et les spécificités des économies et de leurs institutions importent également (voir par exemple Maystadt et al., 2024, dans le cas de l'Afrique).

Illustrons le rôle du niveau de désagrégation géographique[405]. En Inde, on peut distinguer le district[406] ou l'État. Au niveau du district, dans une analyse des effets de court terme de la température et de la pluviosité, Colmer (2021) conclut que ces facteurs météorologiques n'entraînent pas de migration entre districts au cours de la période 2001–2007. Liu et al. (2023) concluent qu'il n'y a pas d'effet de la hausse des températures sur la

405. Les études qui vont être mentionnées ne se distinguent pas que par la découpe spatiale utilisée. On ne peut donc exclure que les différences de conclusions trouvent leur origine ailleurs.
406. Voir la note de bas de page numéro 52.

migration entre les campagnes et la ville au sein des districts entre 1951 et 2011. En Inde toujours mais à un niveau géographique moins fin (l'État), Richa et al. (2024) concluent d'une analyse de données de recensement sur la période 1991-2011 que "there is a significant relationship between climate variability (for rainfall and temperature) in the origin states and inter-state migration in India" (la variabilité étant mesurée par le coefficient de variation au cours de la décennie). Les raisons de ces différences restent à clarifier.

Au Mexique, sur la période 1980–2007, Jessoe et al. (2018) identifient un effet de la température sur la probabilité de migrer des zones rurales vers les villes et vers les États-Unis. Au Vietnam dans le cas d'un typhon, Gröger et Zylberberg (2016) et, en Amérique, Baez et al. (2017a) (dans le cas d'une sécheresse) et Baez et al. (2017b) (dans le cas d'une vague de chaleur) mettent en évidence des réponses migratoires à de tels chocs.

Ces analyses portent sur des pays du sud de la planète. Qu'en est-il dans le nord ? Baylis et al. (2025) s'intéressent aux États-Unis. Ces auteurs concluent que la population réagit au réchauffement climatique en émigrant davantage des comtés où les températures ont augmenté par rapport aux normes locales et en y immigrant moins. Cette réaction est attribuable à des augmentations de température qui persistent à moyen et long terme.

Les analyses évoquées jusqu'ici estiment une ou plusieurs relations entre des facteurs exogènes (un typhon ou une vague de chaleur, par exemple) et des indicateurs d'intérêt pour l'étude des migrations (en tenant compte aussi de l'effet d'une série d'autres facteurs). Le recours à un modèle explicitant les mécanismes reliant ces facteurs exogènes et ces indicateurs est une approche alternative [407]. Parmi les travaux récents qui adoptent cette alternative, citons Burzyński et al. (2022) qui étudient les effets de l'évolution des températures, du niveau de la mer, de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles à l'aide d'un modèle d'équilibre général finement désagrégé au niveau spatial. De leur analyse découle les principaux résultats suivants [408] :

> "We find that climate change strongly intensifies global inequality and poverty, reinforces urbanization, and boosts migration from low- to high-latitude areas. Median projections suggest that climate change will induce a voluntary and a forced permanent relocation of 62 million working-age individuals over the course of the 21st century. Overall, under current international migration laws and policies, only a small fraction of people suffering from the negative effects of climate change manages to move beyond their homelands. We conclude that it is unlikely that climate shocks will induce massive international flows of migrants, except under combined extremely pessimistic climate scenarios and highly permissive migration policies. In contrast, poverty resulting from climate

407. Pour une comparaison entre ces méthodes dans le contexte des migrations, voir par exemple Oliva (2024).
408. Desmet et Rossi-Hansberg (2024) analysent les effets des freins à la mobilité spatiale des personnes, des biens, du capital et des technologies en présence du changement climatique. Bilal et Rossi-Hansberg (2025) étudient les flux migratoires et la localisation des investissements au sein des États-Unis dans un scénario de business-as-usual.

change is a real threat to all of us." (Burzyński et al., 2022, p. 1145)

15.1.2 Variations de température ou de climat ?

Cette sous-section s'intéresse à la réallocation des travailleurs et des emplois induites par des chocs météorologiques. Elle mettra en évidence la divergence entre deux études relatives à l'Inde (Colmer, 2021, et Liu et al., 2023) selon que l'impact est mesuré à court ou à plus long terme. Comme le rappellent Liu et al. (2023),

> "While exploiting short-run weather variation is advantageous because it allows the econometrician to control for a number of potential confounding factors, the primary drawback of this method is that it provides well-identified estimates of the short-term effects of weather shocks, not climate, on outcome variables." (p. 397)

Commençons par l'analyse d'effets à court terme. Aux États-Unis, Acharya et al. (2024) montrent que les entreprises ayant plusieurs établissements répondent à une vague de chaleur [409] en diminuant l'emploi dans les établissements situés dans les zones géographiques affectées et accroissent l'emploi dans celles qui ne le sont pas.

Venons-en à présent aux deux études relatives à l'Inde (l'unité géographique étant le district). Colmer (2021) adopte l'année comme unité de temps. Il se demande dans quelle mesure la réallocation de la main d'oeuvre vers d'autres secteurs du district atténue l'ampleur de l'effet négatif de chocs météorologiques défavorables sur l'emploi local. Le raisonnement intuitif est le suivant. Admettons qu'un choc météorologique défavorable réduise la productivité, les revenus et l'emploi dans l'agriculture. Selon les districts en Inde, ce secteur représente de 40 à 50% de l'emploi total [410]. Un choc affectant l'agriculture a donc un impact local important. L'impact négatif du choc sur l'emploi local est atténué si une réallocation sectorielle de la main d'oeuvre excédentaire est possible. Encore faut-il que les autres secteurs puissent absorber cette main d'oeuvre non utilisée dans le secteur agricole. Du fait de la baisse de l'activité agricole, l'économie locale s'est appauvrie et donc la demande locale de biens et services devrait baisser [411]. Ceci devrait surtout se faire sentir dans les secteurs dits abrités, spécialisés dans les "non-traded goods", comme la construction et une large part des services [412]. En effet, ces branches d'activité dépendent fortement des revenus disponibles localement. Il se peut en revanche que les secteurs intégrés au commerce inter-régional ou international (offrant des "traded goods") puissent absorber de la main d'oeuvre disponible supplémentaire car ils dépendent moins du dynamisme de la demande locale. A cela s'ajoute, bien entendu, l'impact *direct* des conditions météorologiques

409. Mesurée au niveau du comté par le logarithme du nombre annuel de journées accompagnées de pertes (biens, récoltes, blessures ou décès) dues à la chaleur selon la base de données SHELDUS.
410. Il s'agit pour l'essentiel de travailleurs sans terre employés dans le cadre de contrats journaliers.
411. Même si l'unité de temps est différente, voir Liu et al. (2023).
412. Voir Emerick (2018).

sur ces autres secteurs.

Au début de son article, Colmer (2021) constate les enchaînements suivants au cours de la décennie 2000 : une hausse de température locale (et, dans une bien moindre mesure, une baisse de la pluviosité) réduit la productivité agricole sans effet significatif sur les prix des produits agricoles. Il montre aussi qu'une hausse de la température est associée à une baisse des salaires journaliers moyens dans l'agriculture [413] et dans l'industrie manufacturière [414] (mais pas dans les services ni la construction). Il conclut par ailleurs qu'une hausse de la température *réduit* la part de l'emploi agricole dans la population active du district alors que la part de l'industrie manufacturière et celle des services *croissent* [415]. Le taux de chômage augmente lui aussi. La pluviosité n'a d'effet notable ni sur les salaires ni sur les parts sectorielles en emploi [416].

Il n'est pas aisé d'identifier la mesure dans laquelle la réallocation de main d'oeuvre est le facteur qui limite les pertes d'emploi dans le district. L'auteur s'attaque à cette question dans le cas de l'industrie manufacturière à partir de données de firmes situées exclusivement dans l'économie formelle. Les liens entre la température et l'activité de ce secteur sont potentiellement nombreux. L'auteur exploite des différences de législation du marché du travail au niveau des États (entités politiques d'un niveau supérieur à celui du district) : certains d'entre eux ont de longue date un marché du travail plus réglementé que d'autres en ce qui concerne les procédures d'embauche et de licenciement.

En résumé, l'étude de Colmer (2021) suggère que la réallocation sectorielle des travailleurs atténue les conséquences d'une contraction dans un secteur important (en l'occurrence, l'agriculture). Cette réallocation apparaît être conditionnelle à un cadre légal non contraignant en ce qui concerne les embauches et les licenciements. Cette réallocation de la main d'oeuvre devenue excédentaire dans l'agriculture prend la forme d'occupations dans des emplois précaires. Ceci est peut être dû au caractère temporaire des dégradations mé-

413. Ceci est compatible avec une baisse de la demande de main d'oeuvre à offre de travail inchangée. Si celle-ci diminuait (moins de personnes étant prêtes à travailler si la température augmente), un effet de signe opposé sur le salaire serait attendu sous l'hypothèse de concurrence parfaite. Par ailleurs, des effets de composition ne peuvent être exclus.

414. Cette relation est compatible avec un choc positif d'offre de travail sectorielle à demande de travail inchangée sous l'hypothèse de concurrence parfaite.

415. Ce dernier effet a un côté surprenant car les services sont généralement compris comme producteurs de "non-traded goods" et, selon l'argumentaire ci-dessus, ils auraient du pâtir de l'appauvrissement de l'économie locale. Aucun effet n'est en revanche détecté dans la construction. L'auteur pense que deux effets se compensent ici : d'une part davantage de main d'oeuvre agricole inutilisée cherche du travail dans la construction ; d'autre part, l'économie locale s'est appauvrie, ce qui réduit le recours à ce secteur. Or, les mêmes mécanismes devraient être à l'oeuvre dans le secteur des services. On peut cependant raisonnablement avancer que l'effet direct défavorable de conditions météorologiques difficiles est plus net dans le secteur de la construction que dans celui des services.

416. Notons que cette croissance de la part de l'emploi sectoriel dans l'industrie et les services peut fort bien se situer dans l'économie *informelle*. Pour illustrer son propos, l'auteur indique que seul un cinquième de l'emploi manufacturier indien appartient à l'économie formelle durant la période étudiée. Les tentatives de l'auteur visant à mesurer l'impact sur l'emploi informel ne produisent cependant pas de résultats clairs.

téorologiques. Enfin, une hausse des températures stimule la transformation structurelle des districts en Inde au sens où la part de l'emploi agricole baisse et que celle de l'emploi dans l'industrie et les services augmente.

Cette dernière conclusion s'inverse chez Liu et al. (2023) qui étudient les effets de changements à évolution lente, mesurés à l'aide de moyennes décennales de température et de précipitations. Ils exploitent un échantillon de 60 années (1951–2011) et développent une étude de panel au niveau des districts en Inde. Liu et al. (2023) concluent :

> "A 1°C increase in mean decadal temperature in an average Indian district leads to a 17.0 percent increase in the share of the labor force who are agricultural laborers and an 8.2 percent decline in the share of the labor force engaged in nonagriculture." (Liu et al., 2023, p. 397)

Quand ils exploitent des données leur permettant de séparer l'effets des températures courantes et de leurs moyennes sur une longue période, ils montrent que les conclusions de Colmer (2021) portant sur les effets de court terme et les leurs sont compatibles. Les résultats de Liu et al. (2023), fondés sur les variations climatiques d'une décennie à l'autre, suggèrent qu'abandonner l'agriculture est un ajustement de court terme mais pas une option viable à moyen et long terme. Ces auteurs observent aussi que l'effet détecté en longue période se concentre dans les districts ayant un mauvais réseau de communication et un accès difficile au crédit bancaire. La réallocation du secteur agricole vers le secteur non agricole serait donc freinée par des coûts de mobilité et des contraintes de liquidité.

Au-delà de leurs divergences, ces deux articles confirment l'existence d'un lien causal entre la température (le climat) et la composition de l'emploi local. Les barrières à la mobilité géographique des travailleurs mises en évidence sont les réseaux de communications et la capacité de financer les coûts de mobilité.

15.2 Politiques environnementales sources de réallocation des emplois

Par politique environnementale, on entend ici les normes, directives et mécanismes de taxation ou de subvention visant à réguler les émissions de polluants. Ces derniers englobent les GES mais la liste des polluants est bien entendu beaucoup plus longue. La régulation des polluants atmosphériques a précédé la préoccupation à l'égard des GES. Il existe une vaste littérature sur les effets de ces politiques environnementales sur l'économie et l'emploi. Après avoir posé un cadre théorique, la suite résumera d'abord les acquis de cette littérature, puis elle se centrera sur la réallocation des emplois induite plus spécifiquement par la taxation du carbone. Ce thème était déjà présent dans certains travaux de nature économétrique évoqués au chapitre 10. Les travaux évoqués ici s'appuieront sur des modèles mathématiques de l'économie. Enfin, il y aura une synthèse des connaissances sur l'impact du déclin d'activités intensives en GES sur les travailleurs et sur leur région.

15.2.1 Cadre théorique

Les cadres théoriques visent à expliciter le lien entre une mesure de la régulation environnementale et le niveau de l'emploi. L'objet n'est donc pas directement l'impact sur les flux de réallocation d'emplois et de travailleurs. Deschenes (2018) considère que la régulation environnementale relève le coût d'usage du capital. Il justifie cela en ces termes : "Environmental regulations generally require firms to install pollution abatement equipment that does not necessarily increase their productivity. So environmental regulations can be introduced in the standard labor demand model as an increase in the rental rate of productive capital" (p. 2). L'encadré 17 exploite la formule tirée de l'analyse de la demande de travail d'une firme privée.

Encadré 17 *Impact à long terme du relèvement du coût d'usage du capital sur la demande de travail*

L'analyse de la demande microéconomique de facteurs de production représente une firme privée qui maximise son profit sous une contrainte technologique représentée par une fonction de production homogène (de degré $\theta > 0$). Cet outil théorique fournit une prédiction de la réponse des entreprises à de petites variations du coût de ces facteurs (voir par exemple Cahuc et al., 2014). A long terme, l'élasticité de la demande de main d'oeuvre par rapport au coût d'usage du capital η_K^L vérifie une égalité similaire à la formule (9.1) :

$$\eta_K^L = s^K \left(\sigma_K^L - \frac{\nu}{\nu - \theta} \right), \quad \nu > \theta > 0 \tag{15.1}$$

où $s^K > 0$ est la part du coût de d'usage du capital dans le coût (minimal) total, σ_K^L est l'élasticité de substitution entre les facteurs travail L et capital K et ν est le coefficient de mark-up de la firme (c'est-à-dire, le rapport entre son prix de vente et son coût marginal). Au sein de la parenthèse de la formule (15.1), le premier terme capte l'effet de substitution à production donnée (car, la littérature empirique confirme que $\sigma_K^L > 0$) et le second terme est "l'effet volume" qui, vu le signe négatif précédant le rapport $\nu/(\nu - \theta)$, réduit la demande de travail. Le message est à nouveau double :

- *En valeur absolue l'effet du coût d'usage du capital sur la demande de travail sera d'autant plus fort que la part s^K est grande ;*
- *Le signe de l'effet dépend de l'ampleur de l'effet positif de substitution (σ_K^L) comparée à celle, négative, de l'effet volume ($-\frac{\nu}{\nu-\theta}$). Plus le pouvoir de marché de la firme, résumé par le paramètre ν, est grand, moins l'effet volume sera négatif.*

Une condition suffisante pour que l'énergie et le capital soient des compléments bruts, c'est-à-dire pour que η_K^L soit < 0, est que σ_K^L soit < 1 puisque $(\nu/(\nu - \theta)) > 1$). Lorsque divers types de travailleurs sont distingués, l'élasticité η_K^L variera d'un type à l'autre si l'élasticité σ_K^L diffère.

Berman et Bui (2001) et Morgenstern et al. (2002) ont produit des cadres théoriques

qui ne résument pas l'impact de la régulation environnementale à une élévation du coût d'usage du capital[417]. Les premiers, par exemple, distinguent des facteurs de production variables et d'autres quasi-fixes. Ces derniers incluent les efforts de l'entreprise pour réduire ses émissions. La firme minimise ses coûts qui sont une fonction de son volume d'activité, des prix des facteurs de production variables et des quantités de facteurs quasi-fixes. Que le travail soit un facteur de production homogène ou différencié (par exemple, par groupes de professions), on démontre que la demande de travail découle directement de cette fonction de coût[418]. La demande de travail peut donc être représentée comme une fonction du volume d'activité, des prix des facteurs de production variables et des quantités de facteurs quasi-fixes. La régulation environnementale a, potentiellement au moins, un effet sur chacun des arguments de cette fonction. Elle relève les coûts de production, ce qui, toutes choses restant égales par ailleurs, réduit en général le niveau d'activité économique ; mais, un changement technologique induit par la régulation peut agir en sens opposé sur les coûts (Berman et Bui, 2001)[419]. L'impact de la régulation sur les prix des facteurs variables ne sera différent de zéro que si la régulation porte sur une part substantielle de l'économie. Si un tel impact s'observe, le signe de cet effet sur l'emploi dépendra de la complémentarité ou de la substituabilité entre les facteurs de production concernés et le travail. Enfin, la régulation environnementale pousse l'entreprise à relever ses efforts pour réduire ses émissions. Le signe de cet effet sur l'emploi variera selon que ces efforts sont des substituts ou des compléments par rapport au travail.

15.2.2 Effets de la régulation environnementale

Les cadres théoriques esquissés jusqu'ici supposent que l'entreprise ne disparaît pas en raison de la régulation environnementale. Ce risque introduit un canal supplémentaire par lequel cette régulation affecte l'emploi. A cela s'ajoute la possibilité que la régulation environnementale influence l'apparition d'entreprises nouvelles. Enfin, la régulation environnementale a des effets directs positifs sur la santé des travailleurs et de la population en général[420]. Ceci réduit l'absentéisme au travail et les retraits définitifs du marché du travail. Cela a en outre un effet favorable sur la productivité du travail. Par son influence sur la demande et l'offre de travail, la régulation environnementale peut aussi modifier les salaires.

La théorie économique ne peut donc pas signer l'effet net de la régulation environnementale sur l'emploi. Différents types d'outils ont été développés pour dépasser cette

417. Voir aussi les sections 2 et 5 de Grigsby et Zorzi (2026) qui traitent du problème plus général de la réallocation entre un secteur en déclin et un autre en croissance.

418. Comme l'expliquent par exemple Cahuc et al. (2014), la demande de travail conditionnelle au volume d'activité de l'entreprise est la dérivée partielle de la fonction de coût minimal par rapport au coût salarial.

419. Ceci rappelle un effet via l'innovation déjà évoqué au chapitre 10.

420. "Environmental policy pertaining to air pollution has been estimated to have large health benefits" (Walker, 2013, p. 1787).

indétermination. Citons les estimations économétriques qui exploitent des réformes de la législation ou des spécificité de celle-ci permettant de construire un contrefactuel et de proposer une estimation de l'effet causal de la régulation environnementale. Ces études dites en équilibre partiel supposent que la régulation n'a pas d'effets induits importants sur les unités d'observation retenues pour construire le contrefactuel. D'autres auteurs préfèrent utiliser des modèles mathématiques englobant une partie plus ou moins grande de l'économie afin de pouvoir étudier de tels effets induits. Parmi les articles qui ont tenté de synthétiser cette littérature, citons Dechezleprêtre et Sato (2017), Deschenes (2018), Hafstead et Williams III (2020), Chen (2023) et Gray et al. (2023). Les messages essentiels de ces synthèses sont les suivants :

1. De manière générale, la régulation environnementale a *souvent* de petits effets négatifs, statistiquement significatifs, sur l'emploi et les rémunérations des travailleurs des secteurs soumis à cette régulation.
2. Cet effet négatif se concentre dans des secteurs intensifs en émissions polluantes (Dechezleprêtre et Sato, 2017, Wang et al., 2022). Les travailleurs de ces secteurs peuvent avoir des profil de compétences spécifiques. Il arrive en outre que les secteurs les plus malmenés soient concentrés géographiquement.

Certaines régulations environnementales ont tout particulièrement été scrutées par les chercheurs. C'est le cas d'une régulation de la pollution de l'air aux États-Unis évoquée dans l'encadré 18. En Chine, une régulation similaire a entraîné une réallocation de la main d'oeuvre entre des entreprises polluantes affectées négativement et des entreprises non polluantes en expansion (Li et al., 2023[421]). Notons au passage que le rapport de l'OECD (2025b) rappelle, p. 33, que la pollution de l'air a entre autres un impact sur le climat.

421. Voir aussi Zheng et al. (2022) en ce qui concerne la régulation des émissions de SO_2 en Chine.

Encadré 18 *Les effets du Clean Air Act de 1963 aux USA*
Les exigences de qualité de l'air, qui ont été relevées à diverses reprises, sont contrôlées au niveau de chaque comté des États-Unis. Walker (2011) et Walker (2013) exploitent l'introduction en 1990 d'un contrôle sur les émissions de particules fines. Dès 1990, lorsqu'un comté dépasse le seuil autorisé, les établissements situés sur son sol et émetteurs de ces particules doivent adopter les technologies permettant le taux d'émission le plus bas possible et ce, indépendamment des coûts engendrés. Lorsqu'un comté respecte les normes relatives à ce polluant, les exigences pesant sur les entreprises émettrices sont beaucoup moins coûteuses. L'étude porte sur l'industrie manufacturière et le secteur du gaz et de l'électricité. Sous l'angle des travailleurs, les conclusions principales des deux articles de Walker sont les suivantes :

1. *L'emploi des établissements amenés à s'adapter au sein d'un comté en dépassement de la nouvelle norme (d'émission de particules fines) se met, en moyenne, à baisser pendant huit années jusqu'à atteindre une baisse totale de 15% par rapport au niveau de 1990 (Walker, 2011, p. 445).*
2. *Le fait de travailler au moment de la réforme de 1990 dans un établissement amené à s'adapter a des effets durables sur les rémunérations. Neuf années plus tard, selon Walker (2013), les rémunérations cumulées escomptées chutent en moyenne de 20% en termes réels par rapport à leur niveau d'avant la réforme de 1990.*
3. *Pour ceux qui conservent leur emploi dans l'établissement initial, aucun effet n'est perceptible sur les rémunérations cumulées les neuf années suivant la réforme. Le constat du deuxième point provient dont uniquement de la population soumise à une perte d'emploi.*

Ces conclusions préoccupantes ne font pas l'unanimité. Berman et Bui (2001) ne trouvent pas d'effet de la régulation de la qualité de l'air sur l'emploi dans le secteur particulier des raffineries de pétrole aux alentours de Los Angeles. Couvrant une période plus récente que les travaux de Walker, à savoir les années 2000-2016, Bergant et al. (2022) concluent que l'emploi des secteurs "touchés" (c'est à dire, qui dépassent la norme pour au moins un polluant) baisse de manière significative lorsque la régulation de la pollution de l'air contraint ce secteur au niveau "local" (entendu comme la "commuting zone", un découpage géographique qui délimite un espace où les gens vivent et travaillent[a]). Toutefois, l'emploi "local" n'est pas affecté de manière significative. Bergant et al. (2022) interprètent ces deux résultats de la manière suivante : "employees who lost their job due to the impact of the Clean Air Act on their industry were able to find work in another industry within their commuting zone" (p. 26). Cette possibilité de réinsertion n'était apparemment pas ou moins présente durant la période couverte par Walker (2013), qui s'achève en 2000.

a. "The commuting zone is based on journey-to-work data and defines clusters of counties with strong commuting ties. The commuting zone is the lowest level of geography for local labor markets and does not depend on population size" (source : `https://usa.ipums.org/usa/`).

15.2.3 Effets des politiques visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre

Il a jusqu'ici été question des effets de la régulation environnementale en général. Considérons à présent spécifiquement celle qui concerne les gaz à effet de serre. Les entreprises émettrices peuvent les réduire mais cela a un coût. La taxation des émissions de ces gaz ou la fixation de plafonds d'émissions de ceux-ci engendre typiquement une hausse de prix des énergies fossiles carbonées. Les impacts de telles hausses sur la structure de l'emploi ont été résumés au chapitre 9. On a pu y noter un effet négatif plus marqué sur les travailleurs manuels moins qualifiés et sur les entreprises qui consomment plus intensivement de l'énergie. Au chapitre 10, certains travaux ont conclu que la tarification du carbone affecte négativement l'emploi des entreprises plus grandes et davantage émettrices de GES alors que, par la redistribution des recettes fiscales collectées, ces dispositifs peuvent stimuler l'emploi dans d'autres secteurs. De ces analyses économétriques, il ressort que la taxation du carbone ou les systèmes de quotas d'émissions échangeables engendrent une réallocation des emplois. L'objectif de la suite est d'approfondir le constat à l'aide de modèles mathématiques de l'économie qui explicitent une série de mécanismes par lesquels la taxation du carbone modifie les comportements. Les politiques de décarbonation considérées au chapitre 11 ont fréquemment inclus une taxation du carbone. Les simulations de modèles macro-sectoriels évoquées alors n'ont toutefois généralement pas permis d'isoler le rôle joué par cette taxation. L'objectif est ici de se centrer spécifiquement sur les effets d'une taxation du carbone sur la structure de l'emploi (par secteur et profession) telle qu'elle ressort de la simulation de modèles mathématiques de l'économie [422].

Synthèse de la littérature

Les outils mathématiques utilisés pour étudier l'impact d'une taxation du carbone sont fréquemment des modèles d'équilibre général calculable postulant la concurrence parfaite sur le marché du travail et le plein emploi. C'est le cas du modèle de Château et al. (2018) évoqué ci-dessous. La population choisit alors entre l'inactivité et l'emploi. Les salaires réels sont parfaitement flexibles, y compris à la baisse. Le plus souvent, les modèles distinguent plusieurs secteurs ou régions du monde, voire les deux. La réallocation des travailleurs entre secteurs (ou entre régions) est alors traitée schématiquement sous deux hypothèses opposées : soit la mobilité inter-sectorielle (ou inter-régionale) est parfaite, soit elle est impossible (le cas échéant, pour une part seulement des travailleurs [423]). Même si le plein emploi est assuré, un choc de réallocation induit par la taxation du carbone sera financièrement douloureux pour les travailleurs des secteurs, régions ou métiers en déclin, si ces personnes retrouvent un emploi moins bien rémunéré qu'auparavant.

A court et à moyen termes, l'absence de chômage dans ces modèles se heurte cependant

422. Voir aussi la synthèse de Hafstead et Williams III (2026).
423. Babiker et Eckaus (2007), par exemple, font cette hypothèse.

aux préoccupations exprimées à ce sujet par les décideurs publics et la population en général. La littérature économique a développé différentes approches pour représenter la possibilité d'un chômage (distinct de l'inactivité) : des rigidités salariales exogènes (par exemple, Babiker et Eckaus, 2007) ; une relation entre le niveau du salaire et le taux de chômage découlant de la concurrence imparfaite sur le marché du travail (par exemple, André et Velázquez, 2005, Heutel et Zhang, 2021, Weitzel et al., 2023 [424]) ; une représentation implicite (par exemple, Balistreri, 2002) ou explicite (par exemple, Hafstead et Williams III, 2018, Aubert et Chiroleu-Assouline, 2019, Fernández Intriago, 2021, Finkelstein Shapiro et Metcalf, 2023, Adhikari, 2025, Grigsby et Zorzi, 2026) des frictions d'appariement entre les emplois vacants et les chômeurs [425]. La suite évoquera l'impact de la taxation du carbone d'abord lorsque le marché du travail est régi par la concurrence parfaite et ensuite lorsqu'il y a des frictions d'appariement sur ce marché.

Château et al. (2018) s'attaquent spécifiquement à la question de la réallocation des emplois et des travailleurs en simulant l'impact *à long terme* d'une taxation du CO_2 d'un montant variant de 5 à 100$ par tonne et appliquée dans le monde entier. Les effets sont mesurés par rapport à l'année 2011. Château et al. (2018) utilisent une version statique du modèle ENV-Linkages brièvement introduit à la note de bas de page 394. Cette version du modèle distingue 35 secteurs et 25 régions du monde, au sein desquels il y a cinq groupes de professions différents [426]. La mobilité entre ces groupes est un facteur crucial. Dans des versions antérieures du même modèle, cette mobilité était parfaite, instantanée et sans coût. Ici, les auteurs postulent que cette mobilité est nulle. Par ce choix, l'étude vise à mesurer des effets en l'absence d'ajustements de l'offre de formations ou via les migrations. Les travailleurs d'un groupe donné de professions sont néanmoins mobiles entre les 35 secteurs. Cette mobilité a toutefois un coût, qui est supposé être le même quelle que soit la paire de secteurs concernés par la mobilité. L'offre potentielle totale de travail au sein d'un groupe de professions est donnée mais elle se répartit entre les secteurs en fonction du salaire net réel offert par chacun d'eux. Les entreprises sont en mesure de substituer les types de main d'oeuvre. L'élasticité de substitution entre chacun des groupes de professions est par hypothèse identique mais elle peut varier d'un secteur à l'autre. Toutes les recettes fiscales

424. Dans le modèle JRC-GEM-E3 exploité par Weitzel et al. (2023), le marché du travail fonctionne sous le régime de la concurrence parfaite. Weitzel et al. (2023) signalent toutefois qu'une option de ce modèle permet d'introduire de la concurrence imparfaite sur le marché du travail (en l'occurrence via une "wage curve", c'est à dire une relation décroissante entre le niveau de salaire réel et le niveau du taux de chômage.

425. Le livre de Pissarides (2000) présente les fondements de cette approche. On retrouve ces fondements dans l'ouvrage de Cahuc et al. (2014).

426. Ces cinq groupes sont (en référence à la terminologie de l'encadré 5) : (i) les managers ; (ii) la fusion des professionals, des technicians and associate professionals ; (iii) les clerical workers ; (iv) ls service ad sales workers et (v) un agrégat formé des skilled agricultural workers, des craft and related trades workers, des plant and machine operators and assemblers, des elementary occupations et des armed forces occupations, que les auteurs appellent les "blue-collar and farm workers". Il s'agit donc d'une décomposition des professions moins fine que celle de l'article de Weitzel et al. (2023), qui distinguent 9 groupes, évoqué au chapitre 11.

générées par la taxe carbone sont par hypothèse redistribuées uniformément sous forme de réductions d'impôts sur le revenu des ménages (sans distinction selon la source de revenu).

En soi, la taxe carbone réduirait l'activité économique, ce qui selon le modèle conduirait à une baisse des salaires réels moyens avant prélèvements fiscaux. La baisse est plus marquée hors de l'OCDE qu'au sein de celle-ci [427]. La réduction d'impôt sur le revenu des ménages a un effet de signe opposé si bien que les salaires *nets* augmentent très légèrement par rapport à leur niveau de 2011 pour de faibles niveaux de la taxation puis décroissent au-delà de 50 $ au sein de l'OCDE (respectivement, 25 $ en dehors) pour revenir au (respectivement, passer légèrement sous le) niveau de 2011 au sein de l'OCDE (respectivement, hors de celle-ci).

Les créations nettes d'emplois augmentent pour de faibles niveaux de taxes sur le carbone, jusqu'à un point de basculement où les destructions brutes d'emplois commencent à l'emporter sur les créations brutes d'emplois. A partir de ce point, les créations nettes d'emplois sont encore présentes mais elles diminuent en importance. Lorsque la taxation du carbone atteint 100$, une faible création nette d'emplois (moins de 2% par rapport à 2011) est prédite pour les pays de l'OCDE. Le résultat est qualitativement différent dans les pays non membres de l'OCDE, puisque des destructions nettes d'emplois se produisent pour des niveaux de taxe sur le carbone qui ne sont pas élevés (inférieurs à 75$/tCO2). La catégorie des "blue-collar and farm workers" est celle qui, partout, subit le plus une perte relative de salaire net ou bénéficie du plus petit gain [428].

La composition sectorielle initiale (2011) des professions, les variations de coût salarial relatif et de salaire net de chaque catégorie de professions au sein d'un secteur quelconque et la rareté relative de chaque catégorie au niveau agrégé peuvent être à l'origine d'ajustements hétérogènes d'une profession à l'autre. Pour l'illustrer, considérons le cas d'une taxe carbone de 50 $ par tonne. Les secteurs énergétiques [429] et les industries intensives en énergie subissent des pertes d'emplois plus marquées. Les pertes d'emploi dans les secteurs industriels intensifs en énergie pèseraient plus lourdement hors de l'OCDE qu'au sein de celle-ci. Or les secteurs énergétiques et les industries intensives en énergie utilisent intensivement la catégorie de main d'oeuvre des "blue-collar and farm workers". Au sein de l'OCDE, la réallocation d'emplois est la plus forte au sein de cette vaste catégorie de professions. En dehors de l'OCDE, l'ampleur de la réallocation apparaît davantage semblable d'une catégorie professionnelle à l'autre. Dans et hors de l'OCDE, la réallocation d'emplois est la plus faible dans le cas des professions des services et de la vente. La Figure 10 de Château et al. (2018) présente une information plus détaillée de ces phénomènes au niveau de ces deux groupes de pays. Au sein d'une catégorie de profession donnée, la

427. Pour une taxe de 100$ par tonne, la baisse de salaires réels avoisine 2% au sein de l'OCDE et 5,5% en dehors (figure 14 de l'article).

428. La note de bas de page 426 définit ce groupe de professions.

429. Extraction et transformation d'énergies fossiles, production d'électricité à base d'énergie fossile, transports.

création brute et la destruction brute d'emplois ne sont pas d'ampleurs fort différentes, si bien que l'effet net sur l'emploi est souvent modeste. Ceci est vrai dans les deux régions distinguées. Mais, au sein de chaque groupe de professions, la répartition sectorielle des créations brutes d'emploi et celle des destructions brutes sont souvent fort différentes. Dans la mesure où les travailleurs d'un groupe de professions donné sont par hypothèses mobiles entre secteurs, ceci ne crée toutefois pas de difficulté particulière dans cette étude.

Le chapitre 11 a évoqué d'autres outils de modélisation (voir en particulier les travaux de Varga et al., 2022 et de Weitzel et al., 2023). On y a déjà déploré le manque de convergence en ce qui concerne les changements de compositions de l'emploi par professions ou par niveau de qualification suite à la décarbonation des économies occidentales. L'outil exploité par Weitzel et al. (2023) et celui utilisé par Château et al. (2018) ont en commun d'être des modèles d'équilibre général calculable. Bien des différences marquent toutefois ces deux modèles (désagrégation sectorielle et géographique, mobilité des facteurs de production, etc.). Rappelons en outre que les simulations de Weitzel et al. (2023), relatives à neuf catégories de professions, reflètent uniquement les changements de composition sectorielle et les projections du CEDEFOP (tandis que le modèle exploité par Château et al. (2018) autorise des substitutions endogènes entre groupes de travailleurs au sein d'un secteur). Cela dit, un scénario étudié par Weitzel et al. (2023) (appelé CPRICE) s'apparente à celui de Château et al. (2018) dans la mesure où il porte sur un renforcement et une extension de la taxation du carbone. Si les simulations des deux modèles prédisent une chute de l'emploi dans les secteurs exploitant les énergies fossiles et les secteurs industriels intensifs en énergie, ils divergent en ce qui concerne l'agriculture et la construction dont l'emploi croit nettement chez Weitzel et al. (2023) et peu chez Château et al. (2018)[430]. La désagrégation plus fine des professions chez Weitzel et al. (2023) fait apparaître en Europe une hausse marquée de l'emploi agricole qualifié et, dans une moindre mesure, des artisans et ouvriers des métiers de type artisanal, phénomène qu'à évolution sectorielle égale de l'emploi, l'agrégat "blue-collar and farm workers" de Château et al. (2018) est incapable d'isoler.

Considérons à présent les modèles où les frictions d'appariement entre emplois vacants et chômeurs freinent ce processus et sont à l'origine d'un chômage endogène. Hafstead et Williams III (2018) développent un modèle stylisé à deux secteurs : un premier, dit "sale" car il émet des GES, qui représente 20% de l'économie des États-Unis[431] ; l'autre dit "propre", le reste de l'économie, qui n'émet pas de GES - ce qui, bien entendu, est une forte simplification. Dans le cas "business-as-usual", ces émissions ne sont pas taxées. L'article étudie en particulier l'introduction d'une faible taxe sur les émissions de GES s'élevant

430. Voir les figures 5 de Weitzel et al. (2023) et de Château et al. (2018) (panel A).

431. Les secteurs de l'extraction des combustibles fossiles, de l'électricité, de la distribution du gaz naturel et du raffinage du pétrole, les transports et la construction représentent ensemble plus de 20% de la production aux États-Unis.

à 20$/tonne. Une famille représentative, qui est propriétaire des entreprises, prend des décisions de consommation et d'allocation de sa force de travail entre les deux secteurs (mais le taux de participation au marché du travail et l'effort de recherche d'un emploi sont fixés)[432]. La version la plus générale du modèle permet d'envisager deux cas extrêmes (et tout un continu entre ces deux situations limites). Le premier extrême postule que la mobilité inter-sectorielle est nulle, le second que la mobilité inter-sectorielle est parfaite[433]. Chez Hafstead et Williams III (2018), chacun des deux secteurs dispose d'une technologie de production donnée. En l'absence de choix technologiques, les employeurs déterminent l'intensité avec laquelle ils cherchent des travailleurs. Dans le secteur sale, ils décident aussi de mesures (coûteuses) de réduction des émissions de GES. Ces émissions n'influencent pas le potentiel de production de l'économie ni l'utilité du ménage. Comme c'est généralement le cas dans cette littérature, le processus d'appariement ne s'opère qu'entre les chômeurs et les emplois vacants[434], ce processus est aléatoire, et les salaires sont négociés. Dans cet article, la durée individuelle du travail est également négociée[435]. Outre la taxe carbone éventuelle, l'État prélève des taxes sur les revenus du travail afin de couvrir les dépenses d'allocations de chômage et d'autres transferts éventuels.

Lorsque la taxe carbone de 20$/tonne est introduite, l'emploi dans le secteur sale baisse et celui dans le secteur propre augmente si la mobilité inter-sectorielle est parfaite. Lorsque les recettes de la taxe carbone servent à réduire le niveau de la taxation sur les revenus du travail, l'effet de long terme avoisine, en valeur absolue, le demi pour-cent dans chacun

432. Les modèles évoqués ici incorporent l'incertitude. En particulier, chaque individu peut aléatoirement se retrouver en emploi ou en chômage. En réunissant tous les individus en une (grande) famille représentative où les revenus sont partagés, les risques idiosyncratiques sont parfaitement assurés. En revanche, les risques macroéconomiques, qui eux ne sont généralement pas assurables, sont ignorés. Les questions de redistribution de revenus en raison de la taxe du carbone sont nécessairement absentes dans ce type de modèle. Cet aspect est notamment traité par Aubert et Chiroleu-Assouline (2019) qui prennent en compte un niveau minimal de consommation requis pour subsister (en particulier, en termes de biens dont la production est intensive en carbone). Kornek et al. (2021), Budolfson et al. (2021), Feindt et al. (2021) et van der Ploeg et al. (2025) traitent également des questions de redistribution, mais ils le font en l'absence de frictions d'appariement sur le marché du travail.

433. Dans ce second cas, un chômeur qui a travaillé auparavant dans l'industrie sale a la même probabilité d'être embauché par l'industrie propre qu'un chômeur qui a travaillé auparavant dans l'industrie propre (et réciproquement). De plus, la productivité d'un chômeur embauché est indépendante du secteur où il travaillait auparavant.

434. Il n'y a pas de recherche d'emploi sur le tas. Le nombre d'embauches dans un secteur donné, par exemple le propre, croit avec le nombre de chômeurs et avec l'effort fait par ce secteur pour recruter. Ce nombre décroit avec l'effort réalisé par l'autre secteur (le sale) car cet effort réduit la probabilité qu'un chômeur donné entre en contact avec un emploi vacant du secteur propre.

435. La négociation suit la procédure de Nash. Formellement, le salaire et le temps de travail par personne maximisent le produit de Nash. Celui-ci multiplie le gain intertemporel pour la famille représentative et celui pour l'entreprise du secteur concerné lorsqu'un travailleur supplémentaire passe du chômage à l'emploi et qu'un emploi vacant est pourvu. Chacune de ces valeurs a un exposant qui représente le pouvoir de négociation du négociateur correspondant.

des deux secteurs[436]. En l'absence de mobilité inter-sectorielle, le secteur propre et le secteur sale affichent *tous deux* des baisses d'emploi. Dans le cas du secteur sale, la baisse de l'emploi est beaucoup moins importante que dans le modèle avec mobilité inter-sectorielle parfaite. Sans la possibilité d'aller travailler dans le secteur propre, la position de chômeur dans ce secteur se détériore davantage. Dès lors, selon le modèle de négociation retenu, les salaires négociés diminuent plus fortement dans le secteur soumis à la taxe carbone. Cette diminution compense la baisse de la demande pour le produit sale (baisse résultant de la hausse de son prix relatif en raison de la taxe). La baisse de l'emploi du secteur sale n'est plus que d'un dixième de pour-cent. Pour l'industrie propre, l'effet de substitution implique une plus grande demande pour le produit propre par rapport au produit sale, mais l'effet de revenu dû à la diminution des revenus du ménage représentatif implique une diminution de la demande pour le produit propre. Avec la valeur retenue pour l'élasticité de substitution entre les produits sales et les produits propres, l'effet de revenu domine et la diminution de la demande de produits propres entraîne une très légère baisse du nombre de travailleurs employés dans l'industrie propre. En résumé, en raison du niveau de la taxe introduite, les effets de réallocation d'emplois et de travailleurs sont faibles mais ils sont sensibles au degré de mobilité inter-sectorielle des travailleurs. Ceci est également vrai en ce qui concerne les impacts de la taxation du carbone sur les salaires. Hafstead et Williams III (2019) et Hafstead et al. (2022) ont généralisé le modèle stylisé de Hafstead et Williams III (2018) à davantage de secteurs.

Castellanos et Heutel (2024) comparent les effets d'une taxation du carbone selon qu'il y a ou non des coûts de mobilité inter-sectorielle pour les travailleurs[437]. Huit marchés du travail sont cette fois distingués au sein des États-Unis. Chacun d'eux est associé à un ou plusieurs secteurs d'activité économique. Chaque marché a ses propres niveaux de salaire, d'emplois vacants et de chômage. La fonction d'appariement entre ces deux dernières variables est la même quel que soit le marché. Il y a cette fois une famille représentative par marché. Sa force de travail est d'une taille donnée. Cette famille choisit son niveau de consommation et la durée de travail de ses membres sous une contrainte budgétaire. Le salaire est négocié comme chez Hafstead et Williams III (2018). Castellanos et Heutel

436. Lorsque l'État opte plutôt pour un transfert forfaitaire, la réduction de l'emploi dans le secteur sale est à peu près la même. En revanche, la hausse de l'emploi dans le secteur propre se limite à 3,5 dixième de pour-cent. L'impact sur le taux de chômage agrégé est au plus et à long terme une hausse 0,16 points de pourcentage lorsque la redistribution s'opère par transferts forfaitaires. Le type de mobilité inter-sectorielle n'a pas d'importance pour ce résultat. Mais, cet impact sur le taux de chômage est quasi nul lorsque les recettes de la taxe carbone permettent de diminuer la taxation sur les revenus du travail. On peut ici faire un rapprochement entre cette propriété et la littérature sur le double dividende dans la mesure où, selon Hafstead et Williams III (2018), la taxation du carbone peut, en réduisant les taxes distortives, réduire les émissions et ne quasi pas augmenter le taux de chômage.

437. Shimer (2013) et Fernández Intriago (2021) explicitent les effets du capital humain accumulé spécifiquement dans un secteur et progressivement perdu lors d'un épisode de chômage. Le second auteur introduit aussi des qualifications différentes.

(2024) étudient en particulier l'introduction d'une taxe allant de 15 à 75$/tonne de GES. En comparaison avec l'hypothèse de mobilité parfaite, lorsque la mobilité inter-sectorielle est coûteuse, la baisse des salaires se marque plus dans les secteurs intensifs en carbone, les prix de vente y augmentent moins et les quantités produites y diminue moins, si bien que l'emploi y baisse également moins. Ceci rejoint les conclusions de Hafstead et Williams III (2018) concernant leur secteur "sale". Les changements observés dans les secteurs non intensifs en carbone sont plus divers que dans l'unique secteur "propre" de Hafstead et Williams III (2018) : l'emploi augmente nettement dans le secteur de la production d'électricité à partir d'énergie non carbonée ; ailleurs, l'emploi augmente faiblement ou diminue. De manière générale toutefois, dans les secteurs non intensifs en carbone, l'immobilité inter-sectorielle atténue les hausses et renforce les baisses d'emploi. Cette conclusion rejoint qualitativement un message de Hafstead et Williams III (2018) [438]. La manière de redistribuer les recettes de la taxation du carbone a ici aussi son importance. Baisser les taxes distortives sur les revenus du travail améliore les propriétés en termes d'emploi et de chômage en comparaison avec l'usage de transferts forfaitaires.

La modélisation de Finkelstein Shapiro et Metcalf (2023), qui distingue deux secteurs (un sâle et un propre), diffère de celle de Hafstead et Williams III (2018) par l'introduction d'un choix entre deux technologies (l'une standard et émettrice de GES et l'autre dite verte [439]), l'endogénéisation de l'entrée des entreprises et celle de la participation au marché du travail [440]. La mobilité inter-sectorielle, qui comme ci-dessus requiert un passage par le chômage, peut être plus ou moins aisée en raison de coûts de recherche d'emploi différenciés. Les nombreux paramètres du modèles sont calibrés pour les États-Unis dans une situation de "business-as-usual" où la taxation sur les émissions de carbone est nulle. Ensuite, une telle taxe est introduite avec l'objectif de réduire les émissions de 35% par rapport au cas "business-as-usual" [441].

Comparant l'état stationnaire final à l'état initial du "business-as-usual", Finkelstein Shapiro et Metcalf (2023) concluent qu'une taxe de 14$/tonne de CO_2 suffit à atteindre l'objectif visé. Ceci entraine une hausse de 0,45% de l'output agrégé et s'accompagne d'une baisse de 18,5% de l'emploi associé à la technologie standard tandis que celui associé à la

438. En ce qui concerne le chômage agrégé, les conclusions sont qualitativement analogues à celles obtenues par Hafstead et Williams III (2018), que la note de bas de page 436 a résumées.

439. L'adoption de cette dernière entraîne le paiement d'un coût fixe. Par conséquent, seules les firmes plus productives adoptent cette technologie.

440. D'autres différences sont l'introduction d'une fonction de dommage et l'absence de taxes sources de distortions chez Finkelstein Shapiro et Metcalf (2023). Les points communs avec l'article de Hafstead et Williams III (2018) sont nombreux : la fermeture d'entreprises est exogène (sa fréquence est donc indépendante de la taxe carbone) ; les salaires sont négociés après la rencontre entre un emploi vacant et un chômeur ; une grande famille met en commun tous les revenus et assure parfaitement ses membres contre les risques.

441. L'agriculture, la construction, l'exploitation minière, les services publics (l'électricité, le gaz naturel, l'eau et les services d'assainissement), les transports et la fabrication de biens durables ont au départ la technologie standard et sont donc soumis à la taxation du carbone.

technologie verte croît de 4,5%. Le nombre d'entreprises utilisant cette dernière croît de 15%, le taux de participation augmente de 0,3 points de pourcentage et le taux de chômage de même (passant de 6% à 6,03%). Les salaires réels de tous les types d'emplois s'élèvent très faiblement (+0,3%). Lorsque les auteurs forcent le modèle à ne pas permettre l'entrée de nouvelles entreprises et surtout lorsqu'ils ajoutent à cette restriction l'impossibilité de faire un choix technologique[442], certaines prédictions du modèle changent nettement. Lorsque les deux restrictions sont combinées l'output baisse d'1%, les effets sur les deux formes d'emplois ne sont pas radicalement différentes (-24,0% et +5,6%) mais les salaires réels baissent (-2% environ pour les deux types d'emplois). Cette comparaison entre les modèles illustre l'importance qu'a l'adoption des technologies pour compenser les effets distorsifs de la taxe carbone en orientant l'économie vers une structure de production à plus faibles émissions et plus productive. Tout ceci repose néanmoins sur quelques hypothèses implicites importantes : la mobilité inter-sectorielle des travailleurs n'est limitée que par des coûts de recherche ; comme dans le reste de cette littérature endogénéisant le chômage, les incertitudes ne perturbent guère les processus de décision et les autres marchés (en particulier, les marchés financiers) ne présentent pas d'imperfections.

Résumé

Selon les simulations de modèles mathématiques de l'économie, la taxation du carbone entraine une réduction de l'emploi dans les secteurs fortement émetteurs de GES (les secteurs exploitant les énergies fossiles et les secteurs industriels intensifs en énergie) et une augmentation de l'emploi dans les secteurs qui en émettent sensiblement moins. Ceci rejoint les conclusions de certains travaux microéconométriques du chapitre 10 (voir notamment Yip, 2018, Yamazaki, 2017, Carbone et al., 2020, et Azevedo et al., 2023). L'impact de la taxe carbone sur l'emploi dans le secteur de la construction et dans l'agriculture ne fait en revanche pas consensus.

Le type de main d'oeuvre occupée dans les secteurs fortement émetteurs est pénalisée en termes de salaires et d'emplois. Les articles exploitant des modèles pour étudier les effets de la taxation du carbone ne décomposent pas souvent l'emploi en groupes de professions. Quand elles le font, la finesse de la désagrégation et les options de modélisation diffèrent. Le consensus qui émerge demeure dès lors assez général : la réallocation d'emplois affecte davantage les ouvriers, qui sont plus ou moins qualifiés selon les pays. Comme la taxation du carbone élève le prix des énergies fossiles, rappelons toutefois qu'au chapitre 9, on a conclu qu'une hausse de ces prix a un effet négatif plus marqué sur les travailleurs manuels moins qualifiés.

L'ampleur des réallocations dépend du degré de mobilité inter-sectorielle des travailleurs.

442. Les firmes des secteurs qui exploitent initialement la technologie standard continuent à le faire mais leur volume d'activité peut décliner en raison de la taxation de leurs émissions. Ceci rejoint les hypothèses faites par Hafstead et Williams III (2018).

Lorsque celle-ci est faible, les salaires baissent davantage dans ces secteurs fortement émetteurs de GES. Ceci atténue la chute du niveau de leur emploi, mais entraîne aussi, par un effet de richesse, un moindre développement de l'emploi dans les secteurs non ou peu émetteurs.

Plus les modèles avec chômage endogène et frictions d'appariement incorporent de marges d'ajustement (via la mobilité inter-sectorielle ou la possibilité de substituer des technologies), moins les retombées pour les travailleurs sont préoccupantes sous l'angle des salaires et de l'emploi. Ces retombées peuvent même être positives. Lorsque la modélisation englobe les différentes parties du globe terrestre, la taxation du carbone apparaît produire plus d'effets négatifs ou de moins bons effets sur les pays hors de l'OCDE.

Enfin, lorsque la taxation du carbone génère des recettes fiscales, la manière de redistribuer celles-ci a toute son importance. La plupart des modèles exploités ci-dessus ne permettent pas de capter les effets d'appauvrissement et de redistribution de revenus au sein de la population. Ils conduisent à la recommandation de privilégier une réduction des taxes distortives sur les revenus du travail. Sur ce point, il y a lieu de consulter Aubert et Chiroleu-Assouline (2019), Kornek et al. (2021), Budolfson et al. (2021), Feindt et al. (2021) et van der Ploeg et al. (2025) qui prennent en compte les effets de redistribution des revenus induits par la taxation du carbone (avec ou sans prise en compte d'un chômage endogène).

L'analyse de la réallocation des emplois et des travailleurs sous l'effet de la taxation du carbone à l'aide de modèles de l'économie a dû formuler des hypothèses sur la capacité des travailleurs à s'adapter à la réallocation des emplois. Ces hypothèses ont oscillé entre une incapacité à être mobile entre secteurs et le postulat inverse. Ces hypothèses auraient pu être reformulées en termes de profession. Or, qu'en est-il ? Quelle hypothèse faite par ces modèles est la plus proche de la réalité ? Les travailleurs perdant leur emploi au sein de secteurs intensifs en carbone sont-ils plus malmenés que ceux qui sont licenciés dans d'autres activités économiques ? En particulier, quelle est la capacité des travailleurs à rejoindre les emplois apparaissant du fait de la décarbonation de nos économies ? La sous-section suivante traitera du sort des travailleurs licenciés. Ensuite viendront les réponses à la question suivante liée à la transition vers les emplois "verts".

15.2.4 L'impact du déclin d'activités intensives en carbone sur les travailleurs et sur leur région

A côté de la taxation du carbone, des politiques volontaristes de cessation d'activités extrayant ou exploitant le charbon ou la concurrence exercée par d'autres énergies ont historiquement provoqué la fermeture de nombreux charbonnages et celle d'usines utilisant ce combustible. Ces fermetures étaient souvent concentrées géographiquement, entraînant un choc économique négatif sur l'économie locale. La suite se penche d'abord sur la littérature qui a traité de ces phénomènes. Elle généralise le questionnement au secteurs intensifs

en carbone.

Il existe une littérature abondante sur les conséquences de licenciements "massifs" [443] sur les travailleurs et les régions concernés (voir par exemple, Jacobson et al., 1993, von Wachter, 2010, Schmieder et al., 2023, Bertheau et al., 2023). von Wachter (2010) résume ainsi la littérature nord-américaine :

> "Overall, from the US literature a bleak picture emerges, with large long-lasting unmitigated losses in earnings even for job losers in prime working age. Job loss has been found to go hand-in-hand with losses in consumption, losses in health insurance coverage, increases in mortality, and reduced life-chances for the children of job losers" (p. 65)

Comme l'auteur l'indique plus loin, les résultats en Europe sont plus hétérogènes. Toutefois, "there are often important groups of workers bearing substantial costs, in particular in terms of lower employment" (von Wachter, 2010, p. 66).

Or, la spécificité des emplois liés à l'extraction et à l'exploitation du charbon est au moins double : d'une part, comme la suite l'explicitera, le déclin, parfois brutal, porte sur tout un secteur ; d'autre part, le capital humain des travailleurs concernés est a priori fort spécifique à ce secteur. A cela peut s'ajouter un certain isolement géographique des régions concernées. Pour ces raisons, les conséquences sur les travailleurs peuvent être plus délétères que celles mise au jour par la littérature générale relative aux licenciement massifs.

En 2010, l'Australie disposait de 34 centrales électriques au charbon. En 2017, douze d'entre elles étaient fermées afin de contribuer à la décarbonation de ce secteur [444]. Burke et al. (2019) exploitent des données mensuelles régionales [445] de taux de chômage pour estimer l'impact de ces fermetures [446]. Selon ces auteurs, l'impact local moyen d'une fermeture a été une hausse de 0,7 point de pourcentage de taux de chômage (effet statistiquement significatif au seuil de 5% et marquant essentiellement le chômage masculin). Ceci est important dans la mesure où cet impact persiste plus de six mois après la date de fermeture et où le taux de chômage moyen en Australie s'élevait à 5,5% en 2017 [447].

443. L'intention des auteurs est ici de s'intéresser à des licenciements où le comportement du travailleur n'est aucunement en cause. La mesure précise du caractère massif du licenciement varie d'une étude à l'autre.

444. Ces fermetures équivalent à plus d'un cinquième de la capacité totale de l'Australie en centrales électriques alimentées au charbon.

445. 87 régions sont distinguées et la période d'analyse couvre les mois de janvier 2010 à décembre 2017.

446. Plus exactement, au moment de la fermeture d'une centrale dans une région donnée, la valeur d'une variable binaire propre à la région passe de 0 à 1 au moment de la fermeture. Ceci capte donc tout événement survenu le mois de la fermeture. Cela dit, la régression inclut parmi les variables de contrôle un effet fixe de région, un effet temporel propre à chaque région et de l'information sur d'autres fermetures importantes dans la région ainsi que le prix à l'exportation du charbon pour les régions exportatrices.

447. Les auteurs reconnaissent cependant plusieurs sources de biais potentiels : des effets d'anticipation (par exemple, la possibilité que certaines centrales aient déjà ralenti leur activité avant le mois de fermeture) et la possible endogénéité du choix de fermer telle ou telle centrale à un moment particulier.

Aux États-Unis, le déclin de l'emploi dans les mines de charbon a été de 45% entre 2011 et 2016 (Weber, 2020)[448]. Sur l'ensemble de cette période, cet auteur estime le lien entre la variation de l'emploi total (normalisé) mesuré au niveau du comté et celle de l'emploi du comté mesuré dans le seul secteur des mines de charbon[449]. Il fait de même pour les rémunérations. Weber (2020) conclut qu'une baisse de 0,90 emploi dans le comté est associée à chaque emploi perdu dans le secteur minier du même comté. Il ajoute : "I show that for each coal job lost, earnings in the surrounding county fell by nearly $100,000, and that one-third of those who lost jobs did not move and remained unemployed. On average, the losses affected poorer counties and exacerbated income disparities between counties." (p. 44). Parmi les comtés étudiés figurent ceux de la région des Appalaches. La pauvreté y est plus fréquente qu'ailleurs et le niveau des études plus bas. Le charbon extrait est surtout exploité par les centrales électriques. Celles-ci ont fortement réduit leurs achats de charbon à la faveur de la disponibilité de gaz de schiste. Ceci a engendré un choc négatif de demande de charbon que Blonz et al. (2026) exploitent[450]. Il s'en est suivi un déclin de l'emploi lié à l'extraction de charbon dans les Appalaches. Entre 2011 et 2018, l'emploi dans ce secteur et cette zone géographique a baissé de 49%. Toutefois, l'emploi dans le secteur des mines de charbon ne représentait en 2011 que 2% de l'emploi total des comtés ayant une activité minière. Blonz et al. (2026) disposent de données confidentielles sur la situation financière d'un échantillon aléatoire de personnes (le credit score[451], la présence de défauts de paiement ou d'une faillite, par exemple). Blonz et al. (2026) concluent à une nette dégradation de la situation financière dans les comtés concernés. Son ampleur suggère qu'elle ne peut être limitée aux travailleurs du secteur de l'extraction vivant dans ces comtés.

Zhang (2023) étudie les effets de la forte chute des prix du charbon survenue en Chine à partir de 2011 en raison de surcapacités de production et d'un déclin de la demande de charbon. Zhang (2023) conclut à des effets persistants de cette chute de prix entre 2012 et 2015 en Chine : l'emploi décline, puis les salaires baissent sans que cette baisse ne puisse annuler la tendance négative de l'emploi.

Au Royaume-Uni, l'emploi dans l'industrie minière est passé d'environ 240 000 tra-

448. Notons que l'administration fédérale en place en 2025 tente d'inverser cette tendance (https://urls.fr/-lKo7E).

449. La spécification contient aussi un effet fixe propre au comté. Face au risque de biais causé par l'omission de variables explicatives corrélées avec la variation de l'emploi local dans les charbonnages, cette dernière est prédite par celle mesurée au niveau national selon une approche analogue à celle de la formule (9.4) du chapitre 9.

450. Les auteurs argumentent que c'est un choc exogène. Sans cela l'évaluation eut été bien compliquée car il est plausible que les premières mines fermées étaient celles où le coût salarial par unité produite était le plus élevé. Or, le coût salarial est lié à la santé financière des personnes, l'objet de cette étude.

451. Cotation utilisée par les prêteurs quand il s'agit de décider de l'octroi ou non d'un crédit à la consommation. En l'occurence, elle mesure la probabilité que le consommateur sera en défaut de paiement durant au moins 90 jours au cours des deux années à venir.

vailleurs en 1981 à 60 000 en 1991 et 6 000 en 2011. Il s'agit essentiellement d'hommes. Sur la période allant de 1981 à 2011, Aragón et al. (2018) étudient l'évolution de l'emploi au niveau de districts. Les districts miniers sont ceux ayant au moins une mine active en 1981. Les districts non miniers proches servent de groupe de contrôle. La variable de traitement mesure le nombre de mines fermées dans un district depuis 1981. La chute du nombre de travailleurs et celle du taux de participation au marché du travaildans les zones concernées par les fermetures de charbonnages est marquée et très persistante dans le temps. La fermeture de mines conduit à une réallocation de la main d'oeuvre masculine vers le secteur manufacturier. Mais ceci aboutit à un effet de substitution : une augmentation (respectivement, une réduction) de l'emploi local masculin (respectivement, féminin) manufacturier.

Au Royaume-Uni encore, Rud et al. (2024) étudient les licenciement de travailleurs de la mine au cours de la période 1979–1995. Ils exploitent un panel d'environ 2000 individus observés durant vingt années (4 avant l'année de leur licenciement et 15 par la suite). Le groupe de contrôle est constitué de travailleur non mineurs aux caractéristiques observées analogues et dont la trajectoire des rémunérations est presque identique à celle des mineurs avant l'année du licenciement. Comme dans l'étude de Aragón et al. (2018), mais cette fois au niveau de l'individu, les effets du licenciement apparaissent fort persistants : comme l'indique la figure 15.1, les rémunérations chutent de 80 à 90% dans l'année qui suit le licenciement et restent déprimées de 20 à 30% quinze ans plus tard. Parmi les populations les plus marquées figurent notamment les hommes plus âgés et les travailleurs vivant dans des régions davantage isolées. Parmi les travailleurs qui demeurent en emploi après leur licenciement, l'impact négatif est sur leur salaire horaire (environ -40% l'année suivant le licenciement, -20% quinze ans plus tard) et non sur leur temps de travail. La perte escomptée de rémunérations cumulée sur 15 ans varie de 4 à 6 années de rémunérations pré-licenciement. L'étude ne permet toutefois pas d'identifier les mécanismes à l'oeuvre (perte de capital humain spécifique, obstacles à la mobilité géographique, pertes de rémunération horaire car l'emploi retrouvé est moins risqué ou situé dans un secteur où les syndicats ont moins de pouvoir de négociation, ...).

En Pologne, l'emploi dans les mines de houille a diminué rapidement dans les années 1990, passant de 415000 en 1989 à 155000 en 2000, puis à 82000 en 2017 (Baran et al., 2020). Vandeplas et al. (2022) citent plusieurs études concluant que les mineurs ayant perdu leur emploi en Pologne ont rencontré des difficultés à trouver des emplois utilisant des compétences analogues et offrant des conditions de travail équivalentes.

En Allemagne, l'emploi dans le secteur de la houille est passé de 90000 en 1992 à 13000 en 2017. A l'aide d'une approche de modélisation des transitions et de données individuelles, Haywood et al. (2024) estiment que la perte d'un emploi dans ce secteur engendre une diminution attendue équivalente à environ six années de rémunération. La cause principale de cette diminution est la perte de sécurité d'emploi et celle de salaire dans d'autres emplois. La perte est la plus forte parmi les travailleurs dont l'âge se situe

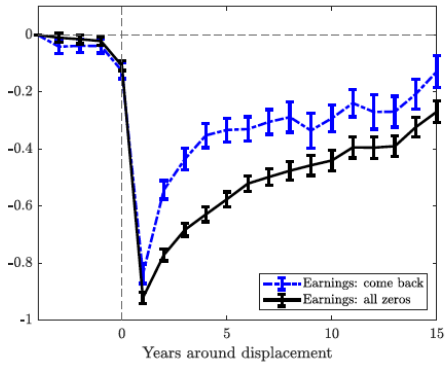


FIGURE 15.1 – Impact du licenciement parmi les travailleurs de la mine sur les rémunérations hebdomadaires au Royaume-Uni. Source : Figure 2 de Rud et al. (2024).

L'année 0 est celle du licenciement. Durant les années précédentes, l'impact est proche de zéro et l'intervalle de confiance englobe approximativement zéro, ce qui indique une absence de différence par rapport au groupe de contrôle (s'il y a un effet d'anticipation du licenciement, il est fort faible). La courbe "Earnings : come back" concerne les travailleurs de la mine licenciés qui sont observés avec une rémunération > 0 quatre ans après leur licenciement. L'autre courbe n'impose pas cette condition. L'année où le travailleur n'est pas observé, la rémunération est mise à zéro.

entre 31 et 49 ans. Le vieillissement de la main d'oeuvre concernée implique qu'au fil des années la perte se réduit du fait de la proximité de l'âge de la retraite.

En Norvège, une baisse sensible du prix du pétrole survenue en 2014 a entraîné un déclin de 21 % de l'emploi de ce secteur entre 2013 et 2017. Garnache et al. (2025) étudient les conséquences de ce choc. Cette baisse de prix du pétrole, conséquence d'un déséquilibre marqué entre l'offre et la demande mondiales, est jugée indépendante de l'état de l'économie norvégienne. Parmi les travailleurs du secteur pétrolier qui ont perdu l'emploi qu'ils occupaient en 2013, neuf années plus tard, les rémunérations annuelles sont plus faibles (-10,1 %) et la probabilité d'emploi est moindre (-5,2 points de pourcentage) en comparaison avec le groupe de contrôle. Les plus fortes baisses de rémunérations s'observent parmi les travailleurs les moins scolarisés. La perte d'avantages salariaux propres au secteur pétrolier explique une bonne part de la chute de rémunérations.

Considérons à présent plus largement les secteurs fortement émetteurs de GES. Le chapitre 3 du rapport de l'OECD (2024) compare la trajectoire des travailleurs licenciés selon l'intensité des émissions de GES de leur secteur d'origine. Ce rapport considère 14 pays sur la période 2000–2019 [452]. Dans cette étude, un secteur est considéré comme fortement

452. Ces pays sont l'Australie, l'Autriche, le Canada, le Danemark, l'Estonie, la Finlande, la France, l'Allemagne, la Hongrie, les Pays-Bas, la la Norvège, le Portugal, l'Espagne et la Suède. Il existe aussi des analyses spécifiques à un pays ou une région. Par exemple, dans le cas de l'Allemagne, voir Barreto et al. (2023).

émetteur s'il se situe dans les deux déciles supérieurs de la distribution de l'intensité des GES d'au moins 10 pays de l'OCDE [453]. Sinon, ce secteur est labellisé à faible émission. Les travailleurs de ces secteurs présentent des spécificités : ils sont plus souvent des hommes, un peu plus âgés, plus souvent localisés dans des régions rurales que les autres travailleurs. Ils combinent en outre fréquemment des niveaux de scolarité faibles et des salaires relatifs élevés. Ces caractéristiques sont susceptibles d'entraîner un impact plus fort de la perte d'emploi. L'étude le confirme. Alors que les travailleurs victimes d'un licenciement massif dans les industries à faibles émissions subissent une baisse de rémunérations annuelles de 29% en moyenne au cours des six années qui suivent leur licenciement, les travailleurs déplacés dans les industries à fortes émissions subissent une baisse de 36%. Une telle différence est qualitativement observée dans chacun pays. Mais, l'effet quantitatif varie d'un pays à l'autre [454]. De manière générale, au cours de la première année suivant le licenciement, les différences de pertes de rémunérations entre les industries à fortes et à faibles émissions reflètent principalement la combinaison d'une probabilité d'emploi plus faible et d'un nombre de jours travaillés moins élevé en cas de retour à l'emploi. Après la première année suivant le licenciement, les pertes de revenus plus importantes dans les industries à fortes émissions reflètent en grande partie une qualité d'emploi moindre (salaire unitaire moindre, plus grande instabilité d'emploi). Les travailleurs déplacés dans les industries à fortes émissions sont également plus susceptibles de changer d'industrie, de profession ou de région que les travailleurs déplacés dans d'autres industries.

En conclusion, qu'il s'agisse d'emplois perdus dans les charbonnages ou, plus généralement, de ceux perdus dans les secteurs fortement émetteurs de GES, les pertes de rémunération subies par les travailleurs concernés sont importantes et persistantes. Elles apparaissent plus importantes que celles subies par les travailleurs lors de licenciements massifs dans d'autres secteurs. Dans la mesure où les activités en déclin sont concentrées sur le plan géographique, les sous-régions concernées sont aussi malmenées (appauvrissement, chômage accru, etc.).

453. La liste des secteurs comprend la fourniture d'énergie, ainsi que les services de transport (maritime, aérien et terrestre), l'exploitation minière et la fabrication de produits à forte intensité énergétique (métaux de base, produits minéraux non métalliques, produits pétroliers raffinés, produits chimiques et produits en papier).

454. C'est en Australie, au Canada, en Allemagne, aux Pays-Bas, au Portugal et en Suède que la différence entre les pertes de rémunérations moyennes des travailleurs déplacés dans les industries à fortes et à faibles émissions est la plus faible, et en France et en Espagne qu'elle est la plus élevée.

Encadré 19 *Le Fonds européen pour une transition juste ("The Just Transition Fund"), le Fonds social climat et le support européen aux régions minières.*

"En décembre 2019, la Commission a adopté une communication sur le pacte vert pour l'Europe contenant sa feuille de route vers une nouvelle politique de croissance pour l'Union. Dans le cadre de ce Pacte vert et dans le but d'atteindre de manière efficace et équitable l'objectif de neutralité climatique de l'Union, la Commission a proposé la création d'un mécanisme pour une transition juste, doté d'un Fonds pour une transition juste. Elle a indiqué que le mécanisme devrait cibler les régions et les secteurs les plus affectés par la transition du fait de leur dépendance aux combustibles fossiles, notamment le charbon, la tourbe et le schiste bitumineux, ou à des procédés industriels fortement émetteurs de gaz à effet de serre.
Le mécanisme repose sur trois piliers :

1. *le Fonds pour une transition juste ;*
2. *un dispositif spécifique dans le cadre du programme InvestEU ;*
3. *une facilité de prêt au secteur public accordée par la Banque européenne d'investissement (BEI) afin de mobiliser des investissements supplémentaires dans les régions concernées."*

"Le Fonds pour une transition juste est doté d'un budget global de 17,5 milliards d'euros pour la période 2021-2027. Un montant de 7,5 milliards d'euros est alloué au titre du cadre financier pluriannuel et un montant supplémentaire de 10 milliards au titre de l'instrument de relance de l'Union NextGenerationEU." Source : https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fr/sheet/214/fonds-pour-une-transition-juste. Dans le cas plus spécifique des sous-régions où se concentrent les charbonnages, il y a également "The EU Initiative for Coal and Carbon-Intensive Regions in Transition" (https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/eu-coal-regions-transition_en). Dans le contexte de l'élargissement du système européen d'échange de quota d'émissions aux fournisseurs de carburants, de gaz et de mazout de chauffage, un "Fonds social climat" a été créé sur la période 2026-2032 en vue d'aider les citoyens vulnérables et les petites entreprises. Sabato et Mandelli (2024) discutent ces initiatives européennes en vue d'une "transition juste".

Face aux chocs subis par l'emploi et les régions concernées, les autorités publiques ne sont pas restées inactives. A titre d'exemple, l'encadré 19 présente une partie[455] de la réponse de l'Union européenne aux défis que pose la transition écologique à certaines sous-régions et secteurs. En Australie, la "Net Zero Economy Authority" a pour mission d'aider

455. Au niveau de l'Union européenne, d'autres actions pertinentes sont mises en oeuvre au moyen notamment de la facilité pour la reprise et la résilience ("The Recovery and Resilience Facility"), du Fonds social européen plus ("European Social Fund Plus") du Fonds européen de développement régional ("European Regional Development Fund"), du Fonds de cohésion et de REACT-UE (Soutien à la reprise en faveur de la cohésion et des territoires de l'Europe).

les travailleurs et les communautés locales malmenées par la transition écologique[456]. Au Japon, la "Green Transformation (GX) strategy" inclut cette préoccupation[457]. Au États-Unis, dans le cas des travailleurs de la mine et des régions concernées, il existe The Partnerships for Opportunity and Workforce and Economic Revitalization du Just Transition Fund[458]. Signalons aussi l'Economic Adjustment Assistance[459].

15.3 La faible mobilité des travailleurs issus de l'économie intensive en carbone

Les sous-sections 15.1 et 15.2 ont montré que tant les changements climatiques que les politiques érigées pour contenir ce changement entrainent des réallocations d'emplois entre secteurs et entre professions. Quelques études ont mis en évidence que la mobilité des travailleurs affectés atténue ces effets négatifs (concernant la mobilité sectorielle, voir par exemple Colmer, 2021, dans le cas d'un choc météorologique et Aragón et al., 2018, dans le cas du déclin de l'industrie minière).

Cette section s'intéresse aux travailleurs des secteurs intensifs en carbone. La sous-section 15.2.4 a mis en évidence l'ampleur et la persistance des effets négatifs d'une perte d'emploi dans ces secteurs. Nous en déduisons donc déjà que de manière générale la mobilité entre professions et secteurs n'a historiquement pas été aisée pour ces travailleurs. Cette section se penche sur les questions précises suivantes : les travailleurs directement affectés par le déclin des activités économiques intensives en carbone parviennent-ils à saisir des opportunités d'emploi dans le "segment vert" de l'économie ? Pour quels types de travailleurs, est-ce plus (moins) aisé ? Dans la mesure où les emplois liés au verdissement des économies devraient se développer, connaître la réponse à ces questions pourrait apporter de l'information utile concernant l'avenir des travailleurs des secteurs intensifs en carbone. Après avoir établi les faits, qui révèleront notamment une mobilité professionnelle généralement faible vers les professions vertes, la section suivante s'intéressera aux causes de cette faiblesse.

Aux États-Unis, Curtis et al. (2024) exploitent les informations d'une plateforme (Lightcast) qui notamment collecte des données sur les travailleurs et les postes de travail vacants. Curtis et al. (2024) basent leur catégorisation complexe des emplois ("verts", "sales", et autres) sur un mélange de critères où, à côté d'informations portant sur la profession, le nom de l'employeur et son secteur, l'intitulé du poste vacant joue un grand rôle. Comme les auteurs l'indiquent eux-mêmes, leur notion d'emploi vert est assez restrictive[460]. Les

456. https://www.netzero.gov.au/our-work.
457. https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html.
458. https://justtransitionfund.org.
459. https://www.eda.gov/funding/programs/assistance-to-coal-communities.
460. A la page 9, ils indiquent en effet : "We focus primarily on jobs that directly benefit from an implicit or

travailleurs postent sur cette plateforme des informations sur leur niveau de formation et leur trajectoire professionnelle, qui sont exploitées pour identifier des transitions entre emplois.

Encadré 20 *Note méthodologique relative au calcul de probabilités de transition entre les positions occupées sur le marché du travail.*
L'étude de telles transitions présente une certaine complexité si, comme c'est généralement le cas, les probabilités de transition entre des états sur le marché du travail dépendent de la durée écoulée dans l'état de départ. A titre d'exemple, la position (ou encore, l'état) de départ pourrait être le chômage et celle d'arrivée l'emploi.
Prendre un échantillon ou une population occupant un état quelconque à un moment donné du temps (un stock) mêle des individus qui occupent cet état depuis des durées différentes. On peut montrer qu'en sélectionnant des individus de cette manière on sur-représente les personnes occupant cet état depuis longtemps. Dès lors, lorsque la probabilité de transition dépend de la durée passée dans l'état, les probabilités de transition calculées pour cette sélection sont biaisées. L'alternative, qui évite ce biais et est donc vivement recommandée, consiste à échantillonner dans le flux des personnes entrant dans l'état et de suivre ces dernières au fil du temps afin de calculer les probabilités de transition.

La production de probabilités de transition nécessite certaines précautions que le complément d'analyse 20 introduit. La figure 15.2 présente une estimation de la probabilité de transition vers un emploi vert en fonction du nombre de trimestres écoulés depuis que la personne a quitté l'emploi "sale". Au cours de ces trimestres, la personne peut être dans un état hybride mêlant l'occupation d'un emploi autre que vert, l'inactivité et le chômage. Chaque année sur cette figure désigne une cohorte de personnes sorties de l'emploi "sale" au cours de celle-ci. A mesure que la durée passée dans cet état hybride s'allonge, la probabilité de trouver un emploi vert croît puis elle plafonne aux environs d'1%. Par conséquent, les probabilités de transition entre les emplois "sales" et la notion retenue d'emplois verts apparaissent très faibles aux États-Unis. C'est également la conclusion qualitative de Bergant et al. (2022) qui exploitent l'enquête sur les force de travail (le Current Population Survey) et appliquent les définitions d'emplois verts et bruns (ou 'polluants') proposées par Vona et al. (2018)[461]. On notera également que sur le graphique 15.2 les courbes se positionnent plus haut à mesure que des cohortes plus récentes sont considérées (la légende de ce graphique indiquant de ne pas considérer la cohorte de 2022). Ce phénomène, qui, selon les auteurs, s'explique par l'accroissement du nombre d'emplois vacants verts, nuance quelque peu le constat d'un faible niveau de probabilité de transition.

explicit price on carbon, as opposed to a wider set of environmental externality-correcting policies (e.g. water or soil quality enhancement)".

461. L'indicateur de "degré de greenness" et la notion d'emploi brun de Vona et al. (2018) ont été introduites au chapitre 13 . Voir les définitions 1 et 4.

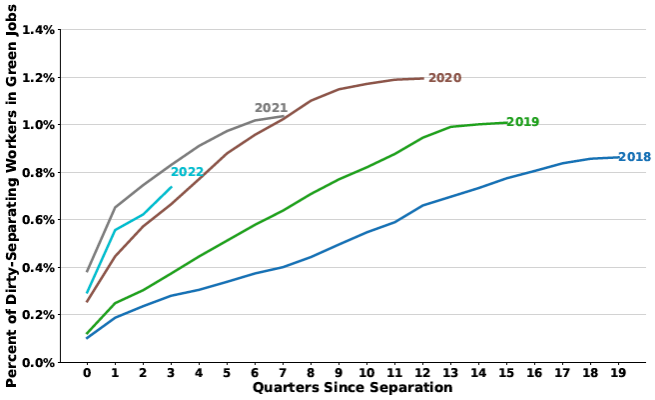


FIGURE 15.2 – Probabilité de transition depuis un emploi "sale" vers un emploi vert en fonction du nombre de trimestres écoulés depuis que la personne a quitté l'emploi "sale". Source : Figure 3 de Curtis et al. (2024).

L'état de départ mêle différentes positions sur le marché du travail : chômage, inactivité et emploi dans un emploi autre que vert. Les cohortes étudiées sont formées du flux de personnes entrant cet état hybride après avoir quitté un emploi dit "sale" au cours d'une année donnée. L'axe horizontal mesure la durée écoulée depuis que le travailleur a quitté un emploi labellisé "sale" (sans que l'on sache la raison de ce départ). Les auteurs ne s'intéressent qu'aux sorties de cet état hybride vers un emploi labellisé vert. Les années notées à côté des courbes désignent le moment où la personne a quitté l'emploi "sale". Les auteurs suggèrent de se méfier de la cohorte 2022 en raison de données incomplètes.

Les faibles probabilités de transition mentionnées ci-dessus sont une moyenne. En comparaison avec des travailleurs diplômés de l'enseignement supérieur, Curtis et al. (2024) indiquent que la probabilité de transition d'un emploi "sale" vers un emploi vert est plus faible pour les travailleurs ayant au plus un diplôme d'études secondaires. Par ailleurs, cette même probabilité de transition est la plus élevée entre 25 et 34 ans. Au-delà de cette tranche d'âges, elle décroît de manière monotone.

L'étude de Bluedorn et al. (2023), que le chapitre 13 a déjà évoquée, exploite des données individuelles d'enquêtes issues de 31 pays d'Europe et d'Amérique du Nord entre 2005 et 2018. Leurs concepts s'alignent sur ceux de Vona et al. (2018) à ceci près qu'ils remplacent la définition 1 d'un emploi brun par la construction d'un indicateur *d'intensité polluante* de chaque profession. A chaque profession sont donc associés cet indicateur et un indicateur de greenness suivant la définition 4. Bluedorn et al. (2023) considèrent le sous-échantillon des individus qui, au cours de deux années consécutives, sont observés dans deux emplois différents ou qui, au cours de trois années consécutives, sont observés en emploi, puis se retrouvent sans emploi et enfin apparaissent à nouveau en emploi la troisième année. Tenant compte des effets d'un certain nombre de caractéristiques indivi-

duelles, Bluedorn et al. (2023) s'interrogent sur la corrélation éventuelle entre l'intensité polluante et l'indicateur de greenness dans les deux emplois successifs[462]. La corrélation entre les niveaux de greenness dans l'emploi initial et dans l'emploi d'arrivée est forte et statistiquement très significative. Il en va de même pour l'intensité polluante. Il n'y a en revanche pas de corrélation entre l'intensité polluante de l'emploi initial et le niveau de greenness de l'emploi d'arrivée. Le constat est analogue quand on inverse les indicateurs dans la phrase précédente. Les auteurs résument le message en ces termes :

> "Taken together, the results suggest that changing jobs to find a greener occupation is challenging for individual workers. In particular, a worker with a history of more pollution-intensive or neutral work is less likely to move into a more green-intensive job. Higher skills do make for an easier match to a more green-intensive job, pointing to the importance of a worker's human capital in easing job transitions." (Bluedorn et al., 2023, p. 10)

Puisque la mobilité entre les emplois intensifs en carbone et ceux de l'économie verte est faible, vers où transitent les travailleurs qui quittent un emploi "sale" ? Selon, Curtis et al. (2024), "on average, approximately 20% of transitions out of dirty jobs are into other dirty jobs, including transitions within and out of local labor markets. The sector to which dirty workers are most likely to transition is manufacturing, which accounts for more than 25% of all transitions out of dirty jobs." Cette part avoisine 30% pour les titulaires d'un diplôme de l'enseignement supérieur.

En résumé, les études de Curtis et al. (2024), Bergant et al. (2022) et Bluedorn et al. (2023) montrent que le passage d'un emploi brun (ou sale) vers un emploi vert a dans un passé récent été rare dans les pays européens et nord-américains. Tous les travailleurs ne sont cependant pas égaux : les moins scolarisés et les plus âgés rencontrent en effet plus de difficultés.

15.4 Quels sont les freins à la mobilité professionnelle des travailleurs issus de l'économie intensive en carbone ?

Les raisons principales des constats de la section 15.3 pourraient être un manque d'attractivité des emplois verts ou une trop grande différence entre les emplois bruns et les emplois verts (différence de qualification[463], distance géographique). La suite va exclusivement se pencher sur ces explications potentielles. Certains travaux élargiront l'analyse à

462. Il vaut ici mieux parler de corrélation que d'un lien de causalité. En effet, il est plausible que des caractéristiques individuelles fixes ou variant lentement dans le temps déterminent à la fois les caractéristiques passées et courantes de l'emploi.

463. Vu la corrélation trouvée avec le niveau de diplôme et avec l'âge, la formation scolaire et le capital humain spécifique accumulé peuvent ici être en jeu.

la prise en compte des emplois qui ne sont ni bruns ni verts. Parmi les autres explications possibles figure aussi le constat qu'au cours des années 2000 et 2010 le déclin des emplois bruns a été tout au plus modeste aux États-Unis (Bergant et al., 2022). Autrement dit, la demande de main d'oeuvre dans les professions correspondantes n'a pas exercé une pression très forte à la mobilité. Ce fut cependant moins vrai en Europe (Vandeplas et al., 2022).

15.4.1 Une attractivité relative des emplois verts insuffisante ?

L'attractivité relative des emplois verts dépend de leurs caractéristiques mais aussi des conditions de travail dans l'emploi que le travailleur a quitté. Certaines études indiquées ci-dessus ont indiqué que des travailleurs des secteurs intensifs en carbone avaient des salaires relativement élevés. Ce constat sera un point d'attention par la suite. Pourquoi un emploi vert serait-il mieux rémunéré qu'un emploi non-vert ? Abstraction faite d'effets de composition démographique (selon le genre ou l'âge par exemple), des conditions nécessaires seraient que ce type d'emploi permette de dégager une plus grande valeur ajoutée par heure travaillée, qu'il se situe dans des entreprises plus profitables, que les travailleurs concernés aient un plus grand pouvoir de négociation (par exemple en raison de la rareté de la main d'oeuvre à même d'occuper ce type d'emploi). Au chapitre 13, il est fréquemment apparu que la demande de main d'oeuvre dans les emplois verts a, au mieux, augmenté modérément par comparaison avec les autres types d'emplois au cours des années 2010. Quant à la rareté de la main d'oeuvre, il s'agit d'un phénomène mis surtout en avant durant la décennie 2020 (Price Waterhouse Cooper, 2022, Jansen, 2023, Kaura, 2024, International Energy Agency, 2025, par exemple). Ce phénomène n'affecte probablement pas autant les analyses empiriques basées sur des données plus anciennes dont il sera question ci-dessous.

Synthèse de la littérature

Quelques études exploitent la classification des emplois verts à trois composantes : GNE, GES et GID (voir la définition 3 au chapitre 13). Ces travaux seront d'abord évoqués très brièvement car ce chapitre a montré les limites de cette classification. Ensuite, nous nous intéresserons aux études qui exploitent le plus souvent l'indicateur de greenness de la définition 4. Quelques études utilisant d'autres définitions seront abordées dans la foulée. Enfin, nous évoquerons deux études récentes où une même profession peut contenir des emplois verts et non-verts. Dans chaque cas, les auteurs sont conscients de présenter des corrélations et non des liens de cause à effet.

Au Royaume-Uni, Valero et al. (2021) exploitent l'enquête sur les forces de travail au cours des années 2011 à 2019. Ils régressent le logarithme du salaire horaire sur une variable

binaire désignant si l'emploi est vert [464]) et sur quelques variables de contrôle [465]. L'estimation indique que parmi les professions très qualifiées [466] le caractère vert a un effet positif mais non statistiquement significatif sur le salaire. Dans le cas des autres professions, l'effet positif est plus élevé et statistiquement significatif. Tout comme celle de Valero et al. (2021), l'étude de Whittard et al. (2025) s'appuie sur la transposition de la classification d'O*NET à la nomenclature anglaise des professions. Exploitant des données administratives en panel sur la période 2011–2018, le tableau 4 de Whittard et al. (2025) associe un salaire horaire supérieur à raison de 4% lorsque l'emploi est vert (l'effet passant à 7% parmi les femmes). Ces effets sont statistiquement significatifs au seuil d'1%.

Le chapitre 2 de l'OECD (2024) produit de l'information par pays membre, mais l'information la plus fine porte sur l'ensemble des pays de l'OCDE. La suite se limite à ce second type de résultats. L'étude introduit une notion de haut salaire [467] et une notion de bas salaire [468]. L'OCDE estime la différence de parts de professions vertes parmi les travailleurs à hauts salaires et parmi ceux à bas salaires, selon le type de profession et en prenant en compte les principales caractéristiques démographiques et professionnelles [469]. Si cette différence de parts est positive, les professions vertes sont dites "mieux rémunérées". Sur la période 2015–2019, les types de professions vertes GNE et GID à haute qualification [470] sont mieux rémunérées que les autres professions hautement qualifiées. Ce n'est toutefois pas le cas pour les professions GES. Des propriétés qualitativement semblables s'observent pour les professions à qualification moyenne [471]. En revanche, les emplois verts (des trois types) des professions peu qualifiées [472] sont moins bien rémunérés que les autres professions peu qualifiées. Ces résultats suggèrent que les travailleurs des professions hautement et moyennement qualifiées et ceux des professions peu qualifiées connaissent des fortunes différentes lorsqu'ils occupent des emplois verts (tels que l'approche utilisée par l'OCDE capte cette notion). L'étude Valero et al. (2021) et celle de l'OCDE ne livrent donc pas le même message. Elles se distinguent de très nombreuses manières. Il n'est donc pas aisé

464. Selon la définition 3, sans distinguer s'il s'agit d'une profession GNE, GES ou GID.

465. Les auteurs prennent en compte l'année, le secteur et la région du travailleur, le genre, le fait d'avoir ou non un diplôme universitaire, l'expérience et son carré.

466. A savoir les professions suivantes : (1) les membres de l'exécutif et des corps législatifs, cadres supérieurs de l'administration publique, dirigeants et cadres supérieurs d'entreprise ("managers, directors and senior officials") ; (2) les professions intellectuelles et scientifiques ("professionals") ; (3) les professions intermédiaires ("technicians and associate professionals").

467. Caractérisée par un salaire horaire supérieur à 1 fois et demi le salaire médian.

468. Caractérisée par un salaire horaire inférieur à deux-tiers du salaire médian.

469. Trois niveaux de diplômes, le genre, trois classes d'âges, le pays et la nomenclature ISCO des professions à un chiffre.

470. Les professions à haute qualification recouvrent les managers, les professions intellectuelles et scientifiques et les professions intermédiaires.

471. Les professions à qualification moyenne englobent le personnel administratif, les artisans et les ouvriers des métiers de type artisan, les conducteurs d'installations et de machines et les ouvriers d'assemblage.

472. Les professions peu qualifiées englobent le personnel des services et vendeurs de magasin et les ouvriers et employés non qualifiés.

d'identifier la source de cette discordance. Par ailleurs, même si de nombreux travailleurs des industries à fortes émissions (professions à forte intensité de GES de la définition 2) sont, selon l'OECD (2024), relativement bien rémunérés, les professions les plus concentrées dans ces industries sont, en moyenne, caractérisées par une fréquence plus élevée de *bas* salaires.

Face aux limites de la définition 3 utilisée par les études évoquées jusqu'ici et face aux discordances de conclusions, tournons-nous à présent vers des études qui exploitent l'indicateur de greenness des professions (de la définition 4). Vona et al. (2019) étudient l'écart salarial entre les emplois verts et non verts sur la période 2006–2014 aux États-Unis. L'analyse se veut descriptive. A l'intérieur d'un groupe de professions (de la nomenclature à 3 chiffres), en moyenne le salaire horaire est sur la période 4% supérieur s'il est vert par rapport aux emplois non verts[473]. Le fait d'occuper une profession verte peu qualifiée donne lieu à une prime salariale nettement plus élevée que le fait d'occuper une profession verte hautement qualifiée, à savoir 8% au lieu de 2%.

Sur un échantillon formé de la plupart des pays de l'Union européenne, du Royaume-Uni, de la Suisse, de la Norvège et des États-Unis, Bluedorn et al. (2023) produisent une analyse plus fine que celle de Vona et al. (2019). Bluedorn et al. (2023) estiment une équation visant à expliquer les rémunérations brutes[474] par un petit nombre de caractéristiques démographiques, un indicateur assez grossier de scolarité, des effets temporels propres à chaque pays, le degré de greenness et l'indice de pollution de la profession du travailleur[475]. Le complément d'analyse 21 précise l'approche suivie par Bluedorn et al. (2023). Les messages principaux de leur analyse sont résumés ci-dessous.

La variable que les auteurs cherchent à expliquer est la rémunération sur l'année. Comme la durée du travail n'apparaît pas parmi les variables explicatives, les corrélations obtenues mêlent de manière indissociable un effet sur le salaire horaire et un autre sur cette durée. Conditionnellement aux autres variables explicatives présentes, il y a une corrélation positive entre la rémunération et le degré de greenness de la profession. Par ailleurs, l'intensité polluante de la profession est aussi corrélée positivement, mais plus faiblement,

473. D'autres études descriptives basées sur d'autres définitions non détaillées ici aboutissent à des conclusions en moyenne qualitativement analogues (Muro et al., 2019, dans le cas des États-Unis) ou à des conclusions opposées (The Adecco Group et Draup, 2023, dans une étude couvrant un large éventail de nations). Ceci manifeste les limites d'analyses descriptives.

474. Les formes de rémunérations qui ne sont pas monétaires ne sont pas prises en compte.

475. En guise de rappel, la définition 4 de "degré de greenness" des professions aux États-Unis est appliquée à la nomenclature européenne des professions. Bluedorn et al. (2023) s'inspirent par ailleurs de la définition 1 d'emploi brun (Vona et al., 2018) pour construire un indicateur d'intensité polluante de chaque profession. Chaque profession est donc caractérisée par ces deux indices compris entre 0 et 1. Rappelons que les métiers qui sont indirectement verts (désignés précédemment par le label GID) ont par défaut un indicateur de greenness nul. Quand on regarde dans le détail l'indicateur de greenness associé aux groupes de professions considérés par Bluedorn et al. (2023), on constate que des métiers du secteur de la construction et du transport public, qui ont une grande importance dans la transition énergétique, ont un indicateur de greenness nul ou faible.

avec la rémunération. La profession au degré de greenness moyen se caractérise par un supplément de rémunération d'environ 7% par comparaison avec la profession à l'intensité polluante moyenne[476]. Sur base de régressions réalisées année par année, Bluedorn et al. (2023) indiquent que ce supplément de rémunération *croît* entre 2005 et 2018. Notons que, contrairement aux auteurs précédents, cet effet n'est pas ventilé par groupe de professions.

Encadré 21 *Corrélation entre le niveau des rémunérations et le degré de greenness et intensité polluante des professions*
L'échantillon exploité par par Bluedorn et al. (2023) consiste en 31 pays occidentaux. La période d'observation varie d'un pays à l'autre. La plus longue s'étend de 2005 à 2018. L'équation estimée se présente comme suit :

$$\begin{aligned}\ln(Y_{i,s,c,t}) &= \underset{(0,009)}{8,178} + \alpha_{c,t} + \underset{(0,397)}{4,625}\, Greenness_{i,s,c,t} + \underset{(0,022)}{0,335}\, Intensité\ polluante_{i,s,c,t} \\ &+ \underset{(0,010)}{0,434}\, \mathbb{1}_{âge_{i,t}\in[30,54]} + \underset{(0,015)}{0,462}\, \mathbb{1}_{âge_{i,t}\in[55,64]} + \underset{(0,006)}{0,310}\, \mathbb{1}_{i\ est\ un\ homme} \\ &+ \underset{(0,007)}{0,410}\, \mathbb{1}_{i\ est\ hautement\ scolarisé} + \underset{(0,005)}{0,111}\, \mathbb{1}_{i\ vit\ en\ ville} + \varepsilon_{i,s,c,t} \end{aligned} \tag{15.2}$$

où

- $Y_{i,s,c,t}$ *mesure les rémunérations réelles annuelles avant impôt et cotisations sociales à charge de l'employeur ou du travailleur (exprimées en dollars de 2015) de l'individu* i*, dans la profession ou le secteur d'activité* s*, occupé dans le pays* c*, l'année* t*.*
- α_{ct} *désigne une série de variables binaires temporelles propres à chaque pays* c*.*
- *Le degré de greenness et l'intensité polluante ont été définies en note de bas de page 475.*
- *"Hautement scolarisé" signifie ayant un diplôme post-secondaire ou de l'enseignement supérieur.*
- *Le symbole* $\mathbb{1}_X$ *est une variable binaire qui vaut 1 si "X" est vrai et zéro sinon. Dans la régression (15.2), l'individu pour qui toutes ces variables binaires sont nulles est donc une femme, âgée d'au plus 29 ans dont le niveau de scolarité ne dépasse pas celui de l'enseignement secondaire et vivant en milieu rural.*
- $\varepsilon_{i,s,c,t}$ *est le terme d'erreur.*

Sous chaque paramètre estimé se trouve son écart-type entre parenthèses. Les paramètres estimés sont tous significativement différents de zéro au seuil d'1%.

Exploitant des données relatives aux seuls États-Unis sur la période 1998-2019, Bergant et al. (2022) estiment une équation analogue à (15.2) dans l'encadré 21. La variable expliquée est cette fois le logarithme du salaire horaire réel. Procédant comme Bluedorn et al.

476. Compte tenu des informations de l'encadré 21, cet écart est obtenu en multipliant le paramètre estimé 4,625 par la moyenne de l'indicateur de greenness et en en soustrayant le paramètre estimé 0,335 multiplié par la moyenne de l'intensité polluante.

(2023), ils concluent à un supplément de salaire horaire d'environ 2% des emplois verts par comparaison avec la profession à l'intensité polluante moyenne[477]. Ce gain suit une tendance *croissante* au fil du temps.

Sur base de données individuelles au Brésil, en Colombie, au Royaume-Uni et aux États-Unis, Alexander et al. (2024) estiment une équation de salaires analogue à celle décrite dans l'encadré 21. Sous l'hypothèse qu'une profession est verte si l'indicateur de greenness (de la définition 4) est au moins égal au seuil de 0,05, ces auteurs concluent :

> "Our empirical analysis, controlling for a range of worker characteristics including age, marital status, and formal employment status, confirms that the green wage premium for women exceeds that for men, varying from 2 to 7 percent, and that the gender pay gap is smaller in green jobs than in non-green jobs." (p. 3)

L'utilisation de la définition 4 apparaît donc livrer un message clair : même si une prime salariale est aussi associée aux emplois sales ou polluants, les professions vertes se caractérisent par une prime salariale plus avantageuse. Cette propriété est-elle robuste ? Pour le vérifier, considérons à présent trois études qui définissent les emplois verts autrement. Aux États-Unis, Curtis et Marinescu (2023) définissent les types d'emplois sur base d'informations disponibles dans les déclarations d'emplois vacants. Ils centrent leur analyse sur les emplois vacants dont le nom et les compétences attendues permettent de les associer aux domaines éolien et solaire. Ils étudient aussi les emplois vacants du secteur des énergies fossiles[478]. Conditionnellement au niveau d'éducation requis, au comté et au groupe de professions (d'une nomenclature à deux chiffres), Curtis et Marinescu (2023) concluent que les emplois vacants dans le domaine solaire (respectivement, éolien) offrent une rémunération 15% (respectivement, 5%) plus élevée en comparaison avec un emploi hors de ces domaines et hors des secteurs liés aux énergies fossiles[479]. Le premier effet est significatif au seuil de 10%. Le second ne l'est pas. Conditionnellement aux mêmes variables de contrôle, les emplois vacants du secteur des énergies fossiles offrent des rémunérations moins élevées, mais l'effet n'est pas statistiquement significatif. Lorsque les auteurs estiment leur modèle sur des sous-échantillons définis par le niveau d'études, ils concluent que, conditionnellement au groupe de professions (d'une nomenclature à deux chiffres), le surcroît de rémunération des emplois dans les domaine solaire et éolien n'est significativement différents de zéro (aux seuils de 5 à 10%) qu'aux deux extrêmes de la distribution : les offres ne requérant aucun diplôme ou seulement le niveau de diplôme secondaire d'une part et celles requérant le niveau de master ou une thèse de doctorat d'autre

477. Résultat conditionnel à l'âge, à l'âge au carré, au genre, à une variable dummy relative à la fréquentation de l'enseignement supérieur et à une variable dummy valant 1 si le travailleur vit dans une zone urbaine.
478. Mines, carrières et extraction de pétrole et de gaz.
479. Il ne s'agit donc pas ici des rémunérations effectives mais bien de celles offertes par les employeurs dans un sous-ensemble d'offres d'emploi. Exploitant eux-aussi des emplois vacants aux États-Unis, Saussay et al. (2024) indiquent qu'une offre de rémunération n'est présente que dans 21% des déclarations d'emplois vacants.

part. Conditionnellement aux mêmes variables, là où les emplois vacants du secteur des énergies fossiles offrent des salaires plus élevés, l'effet est moindre que pour les emplois des secteurs éoliens et solaires.

Kuai et al. (2025) exploitent une enquête réalisée au Japon en 2021. Leur définition d'un emploi vert est celle du B.L.S. introduite dans la note de bas de page 319. Ils introduisent un riche éventail de variables de contrôle afin de limiter le risque de biais de la variable omise. Ils exploitent également une méthode pour faire face au risque d'une causalité inverse (le niveau du salaire incitant à occuper un emploi vert). Toutes choses étant égales par ailleurs, Kuai et al. (2025) concluent que le salaire horaire est 7,3% supérieur pour les travailleurs occupant un emploi vert par comparaison avec un emploi non-vert [480]. L'effet est du même ordre de grandeur pour les différents niveaux d'éducation mais il n'est statistiquement significatif que parmi les universitaires. De même, l'effet n'est statistiquement significatif que parmi les hommes d'une part et seulement parmi les travailleurs de moins de 45 ans d'autre part.

En Allemagne, Antoni et al. (2015) comparent les rémunérations médianes d'entreprises similaires se distinguant par leur implication ou non dans le domaine des énergies renouvelables. Ils concluent :

> "human capital and other establishment-level characteristics mostly explain the wage differential among manufacturers and energy providers. However, we find a persistent 'renewable energy wage premium' of more than ten percent in construction/installation activities and architectural/engineering services. We interpret this premium as a positive indirect effect of the promotion of renewable energies for the benefit of employees in renewable energy establishments within these two sectors. (Antoni et al., 2015, p. 595)"

Jusqu'ici, un consensus émerge : dans les économies avancées, toutes choses restant égales par ailleurs, les *professions* "vertes" apparaissent généralement financièrement plus attractives soit que toutes les autres soit que les professions des secteurs fortement émetteurs de GES [481]. En outre, plusieurs travaux montrent une croissance de cette attractivité relative au fil du temps.

Mais qu'en est-il si l'on admet qu'à l'intérieur d'une profession peuvent coexister des emplois "verts" et "non-verts" ? Saussay et al. (2024) (aux États-Unis) et Sato et al. (2023) (au Royaume-Uni) remettent ce consensus partiellement en question. Ces auteurs couvrent tout l'éventail des offres d'emploi [482]. Ils distinguent les emplois vacants "bas-carbone" et

480. L'effet est statistiquement significatif au seuil d'1%. Si la part du temps de travail consacré à des "activités vertes" augmente de 10%, le salaire horaire augmente en moyenne de 0,8%.

481. La reconnaissance de ce consensus ne doit cependant pas faire perdre de vue la diversité des conclusions lorsque les études distinguent la qualification des professions ou des travailleurs.

482. La section 13.2.3 a déjà introduit ces études et leur méthodologie. Voir notamment la note de bas de page 339.

"intensifs en carbone" à l'intérieur des secteurs et des professions. Ils montrent que les emplois vacants bas-carbone offrent des rémunérations supérieures à celles des autres au sein d'une même profession[483]. Cet effet est significatif au seuil d'1%[484]. Saussay et al. (2024) documentent toutefois une *diminution* de cette prime salariale verte au fil du temps : de l'ordre de 5% sur la période 2010–2012, le surcroît de salaire s'élève à environ 3% entre 2017 et 2019[485]. Au Royaume-Uni , Sato et al. (2023) indiquent que la prime salariale, voisine de 10% et statistiquement significative en 2012–2013, diminue ensuite fortement et, dès 2016, cesse d'être statistiquement significative[486]. Sato et al. (2023) et Saussay et al. (2024) relèvent aussi l'hétérogénéité entre les professions (voir la figure 15.3 dans le cas américain). Une baisse de la prime salariale se marque tout particulièrement parmi les professions dans le domaine des sciences, de la technologie et de l'ingénierie. Comme l'indique le bas de la figure 15.3, Saussay et al. (2024) mettent en outre en évidence que les offres d'emplois intensifs en carbone[487] bénéficient d'un important surcroît de rémunération par rapport aux autres emplois (effet significatif au seuil d'1%)[488]. L'importance du phénomène diminue toutefois et la significativité statistique de l'effet peut disparaitre quand l'analyse économétrique introduit un effet fixe d'entreprise[489]. Une de leurs conclusions dénote avec le consensus évoqué ci-dessus : "The declining low-carbon wage premium alongside a relatively high wage premium for high-carbon jobs reinforces the concerns around the attractiveness of low-carbon jobs" (Saussay et al., 2024, p. 25).

D'autres caractéristiques de l'emploi ont été moins étudiées. Exploitant les enquêtes sur les forces de travail des années 2015 à 2019, l'OECD (2024) compare la fréquence de présence en emploi si l'on occupe un emploi vert (GNE, GES ou GID, selon le cas[490]) et la fréquence en chômage conditionnelle au fait que l'emploi précédent était un emploi vert (idem). Lorsque la seconde fréquence est plus élevée que la première, l'OECD (2024)

483. Une information sur les salaires n'étant disponible que pour 21% des offres d'emploi, les auteurs appliquent une pondération à partir des parts des professions correspondantes dans l'emploi.
484. Il s'observe conditionnellement à un ensemble de variables de contrôle.
485. Cet effet est conditionnel à un effet fixe de la profession, la région (la commuting zone), le nombre de compétences demandées dans l'offre d'emploi et un effet fixe d'entreprise. La présence de ce dernier permet de prendre en compte des différences de productivité, de pouvoir de marché, de qualité de gestion, etc. des firmes pour autant qu'elles soient atemporelles.
486. Résultat obtenu en ajoutant les variables de contrôle suivantes : la localisation (plus précisément la "travel to work area"), la profession et le secteur.
487. Ingénieurs d'une part, travailleur du secteur de la construction et de l'extraction d'autre part. Même si Curtis et Marinescu (2023) se limitent aux emplois vacants du secteur des énergies fossiles, la divergence de conclusions est interpellante.
488. Cette propriété est vérifiée conditionnellement à la prise en compte du temps calendrier, d'indicateurs de compétence, de la localisation (la commuting zone) et de la profession.
489. Les auteurs interprètent ce changement comme le signe d'un partage de rente entre le patronat et les travailleurs dans les secteurs du pétrole et du gaz.
490. Voir la définition 3.

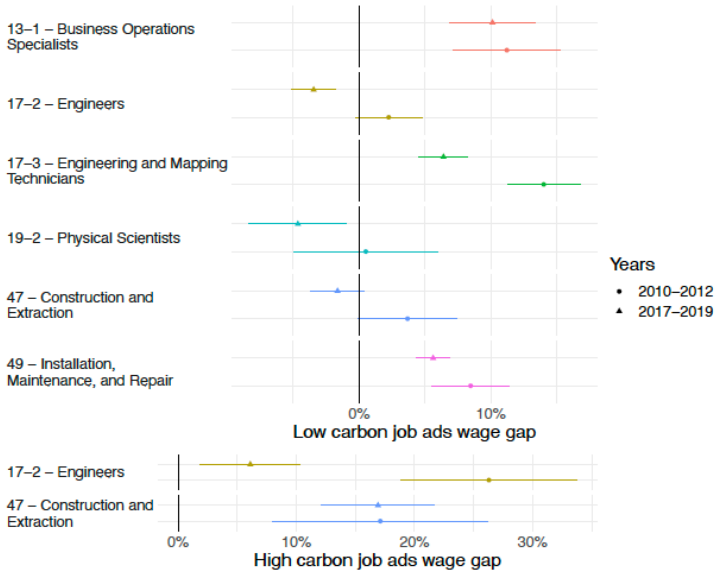


FIGURE 15.3 – Ecart de rémunération offerte entre les emplois vacants génériques et soit les emplois vacants bas-carbone, soit les emplois vacants intensifs en carbone par groupe de professions et par période. Source : Figure 4 de Saussay et al. (2024).

Les barres désignent l'intervalle de confiance au seuil de 95%.

parle de "plus grande insécurité" sur le marché du travail. Quand l'analyse est menée par groupe de professions [491], le rapport conclut qu'au sein de l'OCDE, la " plus grande insécurité" des emplois verts s'observe uniquement parmi les professions moins qualifiées pour les emplois GNE et GID et parmi les professions plus qualifiées pour les emplois GES [492]. Pour les professions peu qualifiées, le rapport observe une plus grande fréquence de contrats à durée déterminée lorsqu'il s'agit d'emplois GNE et GID (en comparaison avec les emplois non verts [493]). Parmi les trois types d'emplois verts, les professions plus qualifiées sont occupées sous un contrat à durée indéterminée plus fréquemment que les emplois non verts correspondants [494]. Aux États-Unis, Curtis et al. (2024) concluent que

491. Et tenant compte de caractéristiques démographiques (trois niveaux de diplômes, le genre, trois classes d'âges et le pays), du secteur d'activité, et de variables binaires pour le temps et le pays.

492. La corrélation est statistiquement significative au seuil de 5%. Les professions moins qualifiées englobent le personnel des services et vendeurs de magasin et les ouvriers et employés non qualifiés. Les professions plus qualifiées recouvrent les managers, les professions intellectuelles et scientifiques et les professions intermédiaires. La rareté des emplois GNE implique que les résultats obtenus à leur propos sont cependant entourés d'une grande marge d'erreur. Rappelons qu'ils proviennent d'une enquête.

493. Et conditionnellement aux caractéristiques évoquées à la note de bas de page 491.

494. Notons que cette désagrégation plus fine nuance la conclusion de Valero et al. (2021) sur la nature des

les durées d'emploi dans les domaines solaires et éoliens sont légèrement plus courtes en comparaison avec celles des emplois du secteur des énergies fossiles, si la régression tient compte de la date de début des emplois et de quelques caractéristiques des travailleurs.

Résumé

Les connaissances disponibles sur l'attractivité financière des emplois verts sont des corrélations conditionnelles à un ensemble de déterminants des salaires qui varie d'une étude à l'autre. Au chapitre 13, la quantification des emplois verts est apparue sensible à la définition retenue. L'attractivité financière relative des emplois verts l'est visiblement aussi. Tant que le caractère vert est déterminé au niveau de la profession, un consensus s'est dégagé : dans les économies avancées, qu'il s'agisse d'emplois existants ou vacants, les *professions* vertes apparaissent en moyenne financièrement plus attractives soit que toutes les autres soit que les professions des secteurs fortement émetteurs de GES. En outre, plusieurs travaux montrent une croissance de cette attractivité relative au fil du temps. Néanmoins, si l'on en croit l'OECD (2024), les emplois verts des professions moins qualifiées (le personnel des services et vendeurs de magasin et les ouvriers et employés non qualifiés) seraient, au sein de l'OCDE, moins bien rémunérés que les autres emplois des mêmes professions. Des conclusions au contraire favorables aux personnes moins qualifiées ont parfois émergé dans la littérature relative aux États-Unis.

Si l'on admet qu'à l'intérieur d'une profession peuvent coexister des emplois vacants verts et non-verts, les emplois à faible émission de carbone offrent des salaires plus élevés que les emplois non liés à la transition bas carbone. Ce résultat s'observe aux États-Unis et au Royaume-Uni. Mais, cette prime a diminué au cours des années 2010. La présence de primes salariales pour les emplois vacants des secteurs associés aux énergies fossiles fait peser un doute sur l'attractivité financière relative des emplois verts.

Concernant les caractéristiques non-salariales, l'information disponible est fort limitée au sein de l'OCDE. Cela dit, il apparaît que pour certaines professions une moindre sécurité d'emploi s'observe dans le cas d'emplois verts. Parmi les emplois GNE et GID, ceci s'observe de manière statistiquement significative au sein des professions moins qualifiées uniquement (mais, parmi les emplois GES, cette moindre sécurité est réservée aux professions les plus qualifiées).

Tournons-nous à présent vers le second type d'explication de la faible mobilité entre les emplois bruns et les emplois verts : la distance entre le profil des uns et des autres. Nous commencerons par évoquer la distance géographique, puis nous aborderons les différences qui ont trait aux qualifications. La littérature sur l'inadéquation ou encore le mismatch entre les travailleurs et les emplois a émergé dans le contexte de l'analyse des causes du

contrats

chômage [495]. Cette interrogation resurgit ici dans l'analyse des freins à la mobilité entre emplois dans le contexte de la décarbonation des économies. Elle est plus largement présente dans le débat relatif aux pénuries de main d'oeuvre [496].

15.4.2 Un mismatch géographique ?

Il y a un mismatch géographique entre deux types d'emplois s'ils sont fort éloignés sur le plan géographique : d'une part les emplois liés aux activités économiques intensives en émission de GES, qui vont se raréfier en cas de décarbonation, et d'autre part les emplois verts, qui sont sensés gagner en importance.

Synthèse de la littérature

Aux États-Unis, les premiers visés par la décarbonation de l'économie ont été historiquement les travailleurs des secteurs de l'extraction d'énergie fossile carbonée et d'industries intensives en énergie. Ces activités sont concentrées géographiquement et ces travailleurs n'ont généralement pas de diplôme d'études supérieures (Hanson, 2023). Or, la mobilité géographique des travailleurs est plus faible parmi les travailleurs moins qualifiés que parmi les plus qualifiés [497]. Quelques articles récents se sont penchés, aux États-Unis, sur la localisation géographique des emplois que la transition écologique devrait favoriser et de ceux qui devraient perdre de l'importance. Le niveau de désagrégation géographique est généralement la "commuting zone" [498] ou la "(non-)metropolitan statistical area" [499]. *Comme on le verra, cette littérature, qui établit des corrélations spatiales, ne converge pas vers un message univoque.* La disponibilité de données appropriées contraint évidemment le choix de l'unité géographique d'observation. Mais ce choix n'est pas sans conséquence : la littérature en géographie a montré que les coefficients de régressions statistiques réalisées au départ de données géo-localisées dépendent de manière systématique du niveau d'agrégation de celles-ci [500]. Etrangement, la littérature évoquée ci-dessous paraît ignorer cette préoccupation.

495. Voir Padoa Schioppa (1991), Entorf (1998) et, plus récemment, Şahin et al. (2014).
496. Voir par exemple, la Box 3.1 du rapport de la European Commission (2022b), Price Waterhouse Cooper (2022), Jansen (2023), Kaura (2024) et International Energy Agency (2025).
497. Voir par exemple Topel (1986) et Notowidigdo (2020) pour les États-Unis ; Machin et al. (2012), qui mettent en évidence un lien causal entre niveau de scolarité et mobilité inter-régionale en Norvège ; Schmutz et al. (2021) dans le cas français.
498. Voir la note de l'encadré 18.
499. "A geographic entity based on a county or a group of counties with at least one urbanized area with a population of at least 50,000 and adjacent counties with economic ties to the central area" (Source : `https://www.cdc.gov/nchs/hus/sources-definitions/msa.htm`).
500. Ce problème est connu sous le nom de "Modifiable Areal Unit Problem" ; voir par exemple Openshaw (1984).

Commençons par la littérature qui se penche sur les professions de l'industrie d'extraction et d'exploitation des énergies fossiles et sur les professions vertes du secteur des énergies renouvelables. Aux États-Unis, Haerer et Pratson (2015) estiment que l'emploi dans le secteur de la production d'électricité réalisée à partir de charbon a chuté de 24% entre 2008 et 2012. Ils soulignent que cette chute de l'emploi n'a que partiellement été compensée par des gains d'emplois, qui ne furent typiquement pas localisés dans les mêmes zones géographiques. Lim et al. (2023) s'intéressent aux travailleurs des activités d'extraction d'énergies fossiles [501]. Ils commencent par noter que, sur la période 2006-2019, les transitions d'un emploi de ces secteurs vers un emploi d'un autre secteur [502] sont fort peu fréquentes dès que la distance géographique entre les emplois dépasse environ 20 miles (32 km) et proches de zéro à partir de 50 miles (80 km) [503]. Au niveau des (non-)metropolitan statistical areas, la corrélation spatiale entre le nombre de travailleurs des métiers de l'extraction des combustibles fossiles (travailleurs d'extraction fossile, en bref) et le nombre d'unités de production d'électricité verte [504] est, en 2019, très faiblement négative (conditionnellement à la taille de la force de travail locale). Si l'on se limite aux unités de production éolienne, la corrélation devient positive. Lim et al. (2023) exploitent ensuite des techniques de machine learning pour prédire la localisation des emplois verts concernés par la production d'énergie verte [505] à l'horizon 2029. Les auteurs utilisent les projections d'emploi pour 2029 du US Bureau of Labor Statistics combinées à des données historiques sur l'emploi pour prédire où de nouveaux emplois verts pourraient émerger. Cet exercice de prospective identifie quelques régions au centre des États-Unis où le rapport entre emplois verts prédits et le nombre de travailleurs d'extraction fossile en 2019 est favorable, mais tel n'est pas le cas là où l'essentiel de ces travailleurs sont localisés. Après s'être aussi intéressé aux différences en matière de compétences (voir ci-dessous), Lim et al. (2023) concluent que la distance géographique est le frein majeur à la mobilité professionnelle des travailleurs occupés dans l'extraction d'énergies fossiles. Vu leur faible mobilité géographique, les auteurs plaident pour que les mesures publiques (telles l'Inflation Reduction Act de 2022) soutiennent une création d'emplois adéquatement géo-localisée.

Les données utilisées par Lim et al. (2023) pour prédire la localisation des emplois verts

501. Il s'agit de 11 professions au sein du groupe SOC 47 (47-5011, 47-5012, 47-5013, 47-5022, 47-5041, 47-5043, 47-5044, 47-5071 et 47-5081 ; la nomenclature Standard Occupational Classification System du Bureau of Labor Statistics est disponible à l'adresse `https://www.bls.gov/soc/2018/major_groups.htm`).

502. Vert - selon la classification GNE, GES, GID tirée de Dierdorff et al. (2009) - ou non. La classification sectorielle est à deux chiffres.

503. De telles propriétés sont générales : voir Marinescu et Rathelot (2018) concernant les États-Unis et Manning et Petrongolo (2017) concernant le Royaume-Uni.

504. Solaire, hydaulique, éolienne et à partir de la biomasse.

505. La notion de profession verte retenue s'appuie sur la classification des professions GNE, GES et GID (voir la définition 3). L'article veut se limiter au secteur des énergies renouvelables. La définition retenue englobe toutefois quelques professions associées à un plus large éventail de secteurs, telles les architectes, les ingénieurs ou les tôliers, par exemple.

semblent être déterminantes. En effet, s'appuyant sur des estimations du coût de production d'électricité au niveau des comtés aux États-Unis [506], Tomer et al. (2021) estiment pour leur part que le potentiel de création d'emplois dans les secteurs de l'éolien et du solaire est très prometteur dans les comtés où les emplois des activités d'extraction fossile sont répandus.

Le message opposé de ces deux études laisse perplexe. Tentons de voir ce que l'on peut apprendre d'autres sources. L'étude de Curtis et Marinescu (2023), déjà citée, s'intéresse *aux offres d'emplois* accessibles en ligne dans les domaines solaires et éoliens aux États-Unis au cours des années 2010 à 2019. Les auteurs considèrent un ensemble de caractéristiques de ces offres d'emploi, mais nous nous limiterons ici à la localisation géographique. Curtis et Marinescu (2023) estiment notamment la relation linéaire suivante

$$s_{cz}^{\text{emp}} = \alpha + \beta \ln\left(s_{cz}^{\text{vacant},j}\right) + \epsilon_{cz},\ j \in \{\text{solaire, éolien}\} \tag{15.3}$$

entre la part, s_{cz}^{emp}, des travailleurs occupés dans le secteur de l'extraction des énergies fossiles [507] de la commuting zone cz en moyenne au cours des années 2010 à 2019 et (le logarithme de) la part moyenne, $s_{cz}^{\text{vacant},j}$, des offres d'emploi dans le domaine solaire (respectivement, éolien) dans la même commuting zone [508]. Dans le cas du solaire et de l'éolien, le coefficient estimé β vaut 0,004. Entouré d'un écart-type de 0,001, on ne peut rejeter l'hypothèse selon laquelle ce paramètre est différent de zéro. Ce résultat descriptif, obtenu sur l'échantillon des commuting zones où $s_{cz}^{\text{vacant},j} > 0$, peut potentiellement révéler une corrélation géographique de facteurs propices aux diverses énergie (par exemple, une zone au relief favorable à l'énergie éolienne où on extrait aussi du charbon), une présence de compétences qui facilitent la mobilité entre emploi ou encore un ciblage de politiques publiques, par exemple. De ceci, Curtis et Marinescu (2023) tirent un message rassurant : "green jobs tend to locate in counties with high shares of employment in fossil fuel extraction" (p. 202)

Considérons à présent la littérature qui, aux États-Unis, couvre un éventail de professions brunes et vertes plus large que celui considéré par Curtis et Marinescu (2023). S'intéressant aux emplois existants en 2016 et suivant les définitions proposées par Vona et al. (2018), Bergant et al. (2022) soulignent la concentration *mais aussi* la proximité géographiques des emplois verts et bruns aux Etats-Unis. Ces conclusions s'appuient toutefois sur

506. Les calculs de coût prennent en compte de nombreux facteurs, notamment la durée de vie des installations, les coûts initiaux et opérationnels, ainsi que des facteurs géographiques tels que la disponibilité des ressources. La base de données qui en résulte permet une comparaison directe des coûts entre 12 technologies de production d'électricité.

507. Identifiés par le code sectoriel NAICS 21 (Mines, carrières et extraction de pétrole et de gaz) à l'exception des sous-secteurs 2122 et 2123 qui ne concernent pas les énergies fossiles.

508. L'approche en termes de parts peut se comprendre mais elle a ses limites. Si l'on voit dans la population occupée dans le secteur de l'extraction des énergies fossiles des chômeurs potentiels, la fonction d'appariement est un outil qui vient à l'esprit. Or, cette fonction a comme arguments des nombres de chômeurs et des niveaux d'emplois vacants. On est alors désireux de voir quelle corrélation peut exister entre les *niveaux* (et non les parts) des indicateurs présents dans la spécification (15.3).

une brève analyse assez superficielle[509]. Saussay et al. (2024), qui exploitent des *offres d'emploi* (accessibles en ligne) dans l'ensemble des États-Unis, confirment la forte concentration géographique des emplois *manuels* à forte intensité de carbone (voir la figure 15.4)[510]. Par contre, selon leurs travaux, les offres d'emploi manuel à faible intensité de carbone[511] sont bien plus dispersés (voir la figure 15.4).

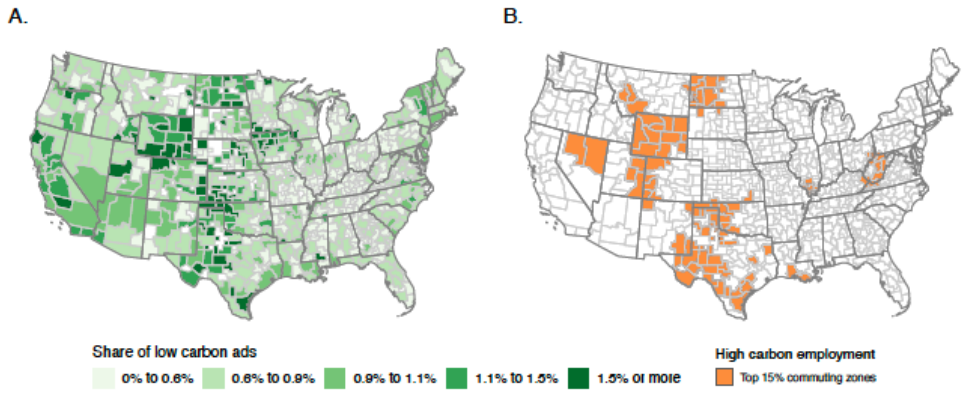


FIGURE 15.4 – Distribution spatiale de l'intensité d'offres d'emploi à faible intensité de carbone et d'emplois à forte intensité de carbone au sein des professions manuelles : moyenne sur la période 2010–2019 aux États-Unis. Source : Figure 6 de Saussay et al. (2024).

Le panneau A montre la part moyenne des offres d'emploi à faible intensité de carbone par commuting zone ; le panneau B montre les 15% de commuting zones les plus importantes en termes d'emplois à forte intensité de carbone.

Saussay et al. (2024) dépassent l'analyse graphique en estimant la relation suivante entre des parts :

$$\ln\left(1+s^{\text{vacant}}_{lc,cz}\right) = \beta \ln\left(1+s^{\text{emp}}_{hc,cz}\right) + \varepsilon_{cz} \tag{15.4}$$

où $s^{\text{vacant}}_{lc,cz}$ désigne la moyenne de la part des offres d'emplois manuels bas carbone (lc) entre 2010 et 2019 dans la commuting zone cz et $s^{\text{emp}}_{hc,cz}$ la moyenne de la part des emplois manuels intensifs en carbone (hc) entre 2010 et 2017 et au même niveau géographique[512]. Estimée

509. Ces auteurs écrivent par exemple : "72 percent of commuting zones that are in the top 25th percentile for pollution-intensive jobs are either also in the top 25th percentile for green jobs or border a commuting zone that is" (p.12). Ce genre d'affirmation et la production de quelques cartes ne suffisent en effet pas à étayer l'affirmation de proximité.

510. Concernant la manière de les identifier, voir les explications de la note de bas de page 339. Sont manuelles les professions au code 31 à 53 de la classification SOC (voir https://www.bls.gov/soc/socguide.htm).

511. Concernant la manière de les identifier, voir les explications de la note de bas de page 339.

512. La présence du 1 dans les logarithmes s'explique du fait que les parts s peuvent être nulles. Rappelons

sur environ 700 commuting zones, le coefficient de corrélation β estimé vaut approximativement 0,07 et est significatif au seuil d'1% lorsque les observations sont pondérées (par le nombre de postes vacants ou par la taille de la population). On en déduit qu'une augmentation de 1% de la part des emplois à forte intensité de carbone est associée à une augmentation moyenne de 0,07% de la part des offres d'emploi à faible intensité de carbone.

Les relations (15.4) et (15.3) n'étant pas aisément comparables, Saussay et al. (2024) estiment aussi la seconde à l'aide de leurs données portant sur les professions manuelles. Ils obtiennent alors que la valeur estimée du paramètre β de (15.3) vaut 0,007, soit davantage que la valeur de 0,004 obtenue par Curtis et Marinescu (2023). Pourtant de ces résultats, Saussay et al. (2024) tirent une conclusion opposée à celle de Curtis et Marinescu (2023) : "Overall, our results suggest that fossil fuel communities may not attract abundant green job creation" (p. 30).

En conclusion, aux États-Unis, la littérature qui traite de l'éloignement entre la localisation géographique des emplois (vacants) "bruns" et celle des emplois "verts" n'a pas encore produit un consensus. Le message optimiste de Curtis et Marinescu (2023) et de Tomer et al. (2021) tranche avec celui, préoccupant, de Lim et al. (2023) et de Saussay et al. (2024).

Intéressons-nous brièvement aux pays de l'OCDE. La figure 15.5 produit de l'information sur les parts régionales, respectivement, des emplois verts et bruns. Les mesures sont en écart à la moyenne nationale. Selon le quadrant, cette figure fait apparaître quatre types de situation. Le quadrant supérieur gauche rassemble les régions où la situation récente (2015–2019) apparaît préoccupante si le processus de décarbonation conduit à la disparition progressive des emplois bruns. La figure 15.5 n'est cependant qu'une photographie instantanée et ne révèle en soi rien du rythme futur de disparition des emplois bruns ni de celui d'ouverture de postes vacants verts.

Au Royaume-Uni, Sato et al. (2023) qui, comme Saussay et al. (2024), exploitent des emplois vacants disponibles en ligne, constatent une faible corrélation entre la part des offres d'emploi bas carbone et la part des offres dans les secteurs à forte intensité énergétique, par zones de déplacement domicile-travail ("Travel to Work Areas").

Résumé

En résumé, il n'est pas actuellement certain que la distance géographique entre les emplois bruns (appelés à se raréfier du fait de la décarbonation) et verts soit une préoccupation majeure dans les pays occidentaux. Il y a à cela potentiellement plusieurs raisons. D'abord, il semble que l'essentiel du travail scientifique ait porté sur les États-Unis et le

que $\ln(1+x) \approx x$ pour x suffisamment petit.

FIGURE 15.5 – Part des professions vertes, déduction faite des professions à forte intensité de GES, et des professions à forte intensité de GES au niveau régional/de l'État, en écart par rapport à la moyenne nationale, points de pourcentage, moyenne 2015–19. Source : Figure 2.7 de OECD (2024).

Les professions vertes sont comprises comme celles qui sont soit GNE, soit GES soit GID (définition 3). La notion de profession à forte intensité de GES provient de la définition des secteurs à haute émission de GES 2. Lecture du graphique : dans le quadrant supérieur gauche, la Voïvodie de Podlachie ('Poldaskie') en Pologne ou l'État du Wyoming aux États-Unis ont une part de professions à forte intensité de GES par rapport à la moyenne nationale significativement plus élevée que celle des professions vertes et, par conséquent, en l'état actuel des choses, sont des zones qui, par rapport à la moyenne nationale, sont davantage menacées par la décarbonation des économies. À l'inverse, la Voïvodie de Basse-Silésie en Pologne ('Dolnoslaskie') ou l'Attique (Attiki) en Grèce dans le quadrant inférieur droit ont une part de professions à forte intensité de GES significativement inférieure à celle des professions vertes et sont donc, en l'état actuel des choses, mieux placées par rapport à la moyenne nationale face à la décarbonation des économies.

Royaume-Uni. Ensuite, la littérature fait des choix différents sur plusieurs plans : le découpage géographique, l'éventail de professions couvertes, le choix entre une analyse du passé récent et la tentative de prédire la localisation des emplois futurs, et dans ce dernier cas la nature de l'information exploitée pour réaliser la prédiction. Certaines analyses paraissent aussi être superficielles. La littérature relative aux États-Unis livre à ce jour des conclusions contradictoires. Dans ce pays et au Royaume-Uni, les études qui exploitent des emplois vacants dans tous les secteurs de l'économie concluent néanmoins que la localisation géographique des emplois vacants verts et celle des emplois (vacants) bruns ne coïncident guère. En ce qui concerne les travailleurs manuels occupés dans les emplois bruns, dont la mobilité géographique est plus limitée, il y a de sérieux indices de préoccupation. Dès lors, il y a des raisons de s'intéresser politiques publiques visant ce type de population au sein

des régions malmenées par la décarbonation (les “place-based policies” ou politiques régionales). A propos de ces politiques, voir par exemple Neumark et Simpson (2015), Bartik (2020), Ehrlich et Overman (2020), Jung et al. (2023), Bartik (2024) et Berkowitz et al. (2025).

15.4.3 Un mismatch de “qualification” ?

.

Il y a un mismatch (ou une inadéquation) de “qualification” lorsque les caractéristiques des chômeurs et celles des emplois vacants divergent. Dans le contexte de la décarbonation, les emplois liés à des activités intensives en carbone vont se raréfier entraînant des pertes d’emplois. La notion de mismatch de “qualification” devient alors un éloignement marqué, dans les domaines des tâches à réaliser et/ou des compétences, savoirs et aptitudes nécessaires à leur réalisation, entre d’une part les travailleurs occupés dans des activités économiques intensives en émission de GES (des chômeurs à tout le moins potentiels) et d’autre part les emplois (vacants) verts, qui sont censés gagner en importance. Comme à côté des emplois identifiés comme verts, il y a un grand nombre d’emplois neutres ou génériques (ni vers ni intensifs en carbone), il sera intéressant d’évoquer des études qui élargissent la perspective à ces derniers.

Il existe une littérature économique relative aux déterminants de la mobilité professionnelle (dont l’encadré 22 fournit un aperçu sommaire). De manière générale, la difficulté à passer d’un emploi (d’une profession) à un(e) autre dépend notamment de caractéristiques individuelles (comme l’âge, par exemple) et d’une mesure de la “distance” entre les caractéristiques propres à l’emploi (la profession). L’encadré 23 précise cette notion de distance. Des particularités propres à la nouvelle profession peuvent aussi jouer un rôle, indépendamment de la profession de l’origine. Ce sera par exemple le cas si l’exercice de la nouvelle profession requiert une licence professionnelle. Ce qui vient d’être exprimé pour un emploi (une profession) se transpose aisément au niveau du secteur d’activité par exemple. Mais la notion même de passage d’un secteur d’activité à un autre recouvre une réalité toute autre selon la profession exercée[513]. La suite se limitera donc à la dimension professionnelle. Elle portera d’abord sur les États-Unis, qui sont l’objet de l’essentiel de la littérature scientifique, et ensuite sur l’Europe. Dans la mesure où la nomenclature des professions O*NET est utilisée au-delà des frontières des États-Unis, certaines études relatives à ce pays ont une portée qui dépasse les frontières de celui-ci. Les approches utilisées par la littérature scientifique vont parfois mesurer explicitement une distance entre des professions. D’autres auteurs vont mobiliser l’outil économétrique pour vérifier si des caractéristiques de professions, de travailleurs ou d’emplois vacants diffèrent selon la nature de l’emploi (par exemple, vert ou non vert) ou si de telles caractéristiques permettent de

513. Par exemple, le passage de l’industrie manufacturière au secteur de l’hébergement et de la restauration signifie tout autre chose si la personne est comptable ou gestionnaire des ressources humaines ou si elle était initialement conductrice de machine-outil.

prédire cette nature.

Encadré 22 *Aperçu de la littérature relative à la mobilité professionnelle.*
Considérant les professions comme la réalisation d'un ensemble de tâches, Gathmann et Schönberg (2010) introduisent la notion de capital humain spécifique à une tâche. Elles s'intéressent au caractère transférable des compétences entre professions. Elles prennent en compte des tâches qui, à des degrés divers, font partie de (quasi) tous les métiers[a]*. Exploitant des données individuelles allemandes couvrant la période 1975-2001 et relatives à 64 (groupes de) professions différentes, Gathmann et Schönberg (2010) concluent que la mobilité professionnelle s'effectue surtout entre professions requérant l'accomplissement de tâches analogues.*
Cortes et Gallipoli (2018) étudient la mobilité entre 37 (groupes de) professions aux États-Unis au cours de la période 1994-2013. La distance entre les professions n'est pas ici liée à des tâches (comme chez Gathmann et Schönberg, 2010) mais elle est fonction d'une part des niveaux de connaissance générale (respectivement, en lecture, écriture, mathématique et raisonnement) et d'autre part des niveaux de onze aptitudes (c'est à dire des capacités requises pour faciliter l'apprentissage des tâches professionnelles, comme la dextérité manuelle par exemple). Ces niveaux sont des exigences propres à chaque profession (dont la source est le Dictionary of Occupational Titles). Selon Cortes et Gallipoli (2018), le coût de la mobilité entre professions est très élevé. Il dépend certes de la distance entre les paires de professions mais, plus encore, d'un effet propre à la profession de destination. Selon les auteurs, cet effet propre reflète des barrières à l'entrée telles que les qualifications formelles requises, la formation professionnelle spécifique au métier, l'octroi de licences professionnelles et les exigences en matière d'affiliation syndicale. Brunetti et al. (2025) s'inspirent de Cortes et Gallipoli (2018) dans le cadre d'une étude relative aux emplois verts et bruns en Italie. Ils concluent :"skill distance between occupations negatively correlates with the measure of occupational mobility, the ratio of switchers over stayers" (p. 23).

a. Les données exploitées portent sur 19 groupes de tâches, dont voici quelques exemples : réparer ou rénover, nettoyer, vendre, acheter, enseigner ou former, planifier, exécuter des lois ou interpréter des règles, soigner, programmer (voir le tableau 1 de l'article). Les données disponibles indiquent seulement si la tâche est ou non exécutée dans le cadre de la profession concernée.

Encadré 23 *Mesure de la distance ou de la similarité entre emplois.*
Chaque emploi peut être décrit par un vecteur d'attributs recouvrant les tâches à réaliser, les aptitudes et les compétences nécessaires à leur accomplissement. Suivant Macaluso (2025), un emploi j désigné ci-dessous par Job_j peut être caractérisé par les attributs $a \in \{1, ..., A\}$ en quantité $\ell_a \geq 0$, réunis dans un vecteur de dimension A :

$$Job_j = (\ell_{j1}, ..., \ell_{ja}, ..., \ell_{jA})$$

Ces attributs seront les aptitudes et compétences telles que disponibles dans les données recueillies ou une transformation de celles-ci (par exemple, à l'aide d'une analyse en composantes principales ou s'il se justifie de pondérer certaines composantes de Job_j).
Différentes normes sont envisageables pour caractériser la distance entre deux emplois j et j' :

$$\sqrt{\sum_{a=1}^{A} (\ell_{ja} - \ell_{j'a})^2}, \text{ norme euclidienne utilisée par exemple par OECD (2024),}$$

et

$$\frac{1}{A} \sum_{a=1}^{A} |\ell_{ja} - \ell_{j'a}|, \text{ la distance de Manhattan utilisée par exemple par Macaluso (2025)}$$

se rencontrent souvent. Il existe aussi des indicateurs de similarité. L'indice de Jaccard vaut

$$\frac{\sum_{a=1}^{A} \min(\ell_{ja}, \ell_{j'a})}{\sum_{a=1}^{A} \max(\ell_{ja}, \ell_{j'a})}, \text{ utilisé par exemple par Lim et al. (2023).} \tag{15.5}$$

Lorsque, pour chaque attribut a, les degrés d'importance ℓ_{ja} et $\ell_{j'a}$ sont égaux, l'indice de Jaccard vaut 1. Plus les profils de compétences diffèrent, plus l'indice diminue et tend vers 0. L'indice de Jaffe (1986), utilisé notamment par Gathmann et Schönberg (2010), est le cosinus de l'angle entre les vecteurs Job_j et $Job_{j'}$. Il est défini par la formule

$$\frac{\sum_{a=1}^{A} (\ell_{ja} \times \ell_{j'a})}{\sqrt{\left(\sum_{a=1}^{A} \ell_{ja}^2\right) \times \left(\sum_{a=1}^{A} \ell_{j'a}^2\right)}}.$$

Cet indice vaut 1 si les vecteurs Job_j et $Job_{j'}$ sont identiques ou proportionnels et il tend vers 0 si ces vecteurs sont perpendiculaires. Gathmann et Schönberg (2010) comparent brièvement plusieurs normes. Il a été ici question de la distance (ou de la similarité) entre emplois. Ces mesures s'étendent à la distance entre des professions différentes.

Synthèse de la littérature

Consoli et al. (2016) s'appuient sur l'identification des professions vertes du "Green Economy programme" (Dierdorff et al., 2009 ; voir la définition 3). En 2012, la classification la plus fine des professions aux États-Unis distinguait 905 professions différentes. Pour les professions GNE et GES[514], la base de données d'O*NET renseignait le nombre d'années d'études requis, le nombre d'années d'expérience professionnelle requis et le nombre d'années de formation sur le tas ("on-the-job training"). Comme les emplois verts se retrouvent surtout dans quelques groupes de professions et que les exigences professionnelles sont hétérogènes d'un groupe à l'autre, Consoli et al. (2016) spécifient une équation expliquant un indicateur (par exemple, le nombre d'années d'études) par une variable binaire indiquant si la profession est ou non GES, une autre jouant le même rôle pour le groupe GNE et une succession de variables binaires d'appartenance aux groupes de professions. L'estimation est réalisée sur un échantillon de 465 professions appartenant à un groupe où au moins une profession GNE ou GES est présente. L'effet de la variable binaire GNE ou GES est donc à comprendre par comparaison avec *toutes* les professions qui ne sont ni GNE, ni GES, et ce, conditionnellement à un effet moyen du groupe de professions (de la nomenclature SOC à 3 chiffres) sur l'indicateur considéré. En se limitant aux effets statistiquement significatifs (à des seuils variant de 1 à 10%), l'analyse révèle que les professions GES requièrent peu de durée d'études supplémentaire (2%) mais nettement plus d'expérience et de formation sur le tas (respectivement 43 et 41% en plus). Elle révèle que les professions GNE se distinguent uniquement par une exigence de formation sur le tas supérieure de 18%. Comme ces estimations peuvent être entachées d'un biais de la variable omise, les auteurs étendent la spécification par l'introduction de diverses variables de degré d'exposition de la profession à la technologie. Après quoi, la valeur estimée des paramètres évoqués à l'instant diminue, demeure statistiquement significative dans le cas des emplois GES mais cesse de l'être dans le cas des professions GNE.

Se référant aux travaux synthétisés par Acemoglu et Autor (2011), Consoli et al. (2016) observent que les compétences analytiques non routinières sont plus développées dans les professions GES et que ces dernières et les professions GNE sont moins intensives en tâches cognitives routinières que leurs professions équivalentes (ces effets étant statistiquement significatifs aux seuils de 5 ou de 10% conditionnellement à une série de variables

514. Consoli et al. (2016) ne s'intéressent pas aux professions GID car il s'agit de professions existantes dont les caractéristiques ne se modifient pas ou peu sous l'effet de la décarbonation des économies. Les auteurs rappellent par ailleurs que les emplois GNE et GES appartiennent souvent à des groupes de professions intensives en compétences abstraites (par exemple, la résolution de problèmes, la gestion et la coordination). Sur 111 professions vertes, 76 appartiennent à des groupes tels que la gestion, les opérations commerciales et financières ou l'architecture et l'ingénierie, qui se situent tous dans le quartile supérieur en termes d'importance moyenne des compétences analytiques et interactives non routinières. Rappelons aussi que la quasi totalité des professions dans les services et la totalité de celles dans les secteurs de l'agriculture, de la sylviculture et de la pêche ne sont ni GES ni GNE.

de contrôle). En résumé, par comparaison avec les professions qui sont ni GNE, ni GES, Consoli et al. (2016) décèlent plus de différences en termes d'expérience, de formation sur le tas ou de compétences dans le cas des professions GES que dans celui des professions GNE.

A l'intérieur du vaste groupe des professions "non vertes", Bowen et al. (2018) identifient les groupes de professions "potentiellement vertes", qu'ils désignent de l'appellation "Green Rival". Celles-ci ont au moins une profession verte "similaire" [515]. En 2014, alors qu'un peu plus de 19% des emplois étaient classifiés verts (au sens de la définition 3), environ 44% du total des emplois aux USA se retrouvait classés "Green Rival" et le solde, environ 36%, appelé les "other (non-green) jobs", apparaissait plus éloigné des emplois verts. Bowen et al. (2018) ajoutent que "non-green jobs generally appear to differ from their green counterparts in only a few skill-specific aspects, suggesting that most re-training can happen on-the-job." Bowen et al. (2018) reconnaissent toutefois que le groupe des green rival jobs peut contenir des emplois dont le degré d'éloignement des emplois verts est fort variable.

Le chapitre 4 de OECD (2024) distingue les emplois verts (dénommés "green-driven occupations") [516] et les emplois intensifs en carbone [517], les autres professions étant qualifiées de neutres. La base de données O*NET est à nouveau la source principale de l'information. L'OECD (2024) exploite les aptitudes [518] et les savoirs [519]. L'OECD (2024) exploite aussi ce qu'O*NET appelle les "skills" [520]. Au sein de groupes de professions ayant des exigences

515. Cette information est introduite par O*NET en 2012. La similarité peut s'exprimer soit en termes de caractéristiques de l'emploi (cas désigné par l'appellation 'Career Changers') soit en termes de caractéristiques du travailleur (cas désigné par l'appellation 'Career Starters'). Plus précisément, "Career Changers are occupations that have similar job specifications (skills, experience, work context), so workers can transfer to these occupations with minimal additional preparation" (Bowen et al. , 2018, p. 269). "Career Starters are occupations that have similar worker specifications (abilities, occupational interests), so are suited to individuals with similar occupational preferences" (idem, p. 269). Une profession non-verte est classée parmi les green rival si au moins une profession verte lui est semblable.

516. Selon la définition 3. Une distinction est faite par l'OECD (2024) entre les nouvelles professions (celles qui sont GNE) et les professions existantes (celles qui sont soit GES soit GID).

517. Les "GHG-intensive occupations" découlant de la définition 2. Ces emplois se retrouvent dans l'agriculture, les secteurs du gaz et du pétrole, les mines, l'industrie manufacturière et les transports (voir le tableau 4.2 du rapport).

518. Au nombre de 52 et visibles à l'adresse `https://www.onetonline.org/find/descriptor/browse/1.A`. Ce sont des attributs durables de l'individu qui influencent la performance. Ils sont cognitifs (par exemple, la mémorisation), physiques (par exemple, l'endurance), psychomoteurs (par exemple, la dextérité des doigts) ou sensoriels (par exemple, la vision de loin).

519. Au nombre de 33 et visibles à l'adresse `https://www.onetonline.org/find/descriptor/browse/2.C`. Il s'agit d'ensembles organisés de principes et de faits s'appliquant à des domaines généraux, pouvant être répartis en 10 catégories : arts, lettres et sciences humaines (incluant la connaissance des langues nationales et étrangères), commerce et gestion, communication, éducation et formation, ingénierie et technologie, services de santé, droit et sécurité publique, fabrication et production, mathématiques et sciences, transport.

520. Au nombre de 35, ils regroupent les "basic skills" (`https://www.onetonline.org/find/descriptor/browse/2.A`) et les "cross-functional skills" (`https://www.onetonline.org/find/descriptor/browse/2.B`.

similaires en matière de formation, d'expérience et de formation sur le tas, l'OECD (2024) fait un double constat à propos des compétences (au sens de "skills" ci-dessus) :

— Les professions vertes nécessitent une grande maîtrise des compétences en traitement de l'information (Figure 4.1 du rapport).

— Comparant les professions vertes et les professions intensives en carbone, les exigences en matière de compétences sont similaires entre les différents types de professions hautement qualifiées, tandis qu'elles sont bien plus élevées pour les professions vertes peu qualifiées (Figure 4.2 du rapport) [521].

Ensuite, l'OECD (2024) calcule la distance entre paires de professions. Il le fait en particulier entre les professions intensives en carbone et non seulement celles qui sont labellisées vertes mais également les neutres. Ce rapport utilise la norme euclidienne (voir l'encadré 23). Chaque profession est décrite par un vecteur de dimension $A = 120$ (52 aptitudes, 33 savoirs et 35 "skills"). Les distances sont calculées en utilisant la nomenclature des professions la plus fine (à 8 chiffres). Ensuite, toutes les distances sont normalisées sur une échelle allant de 0 à 100. L'OECD (2024) conclut son analyse de ce vaste ensemble d'informations par un message assez optimiste :

> "The main finding (...) is that, across the board, the majority of GHG-intensive occupations share similar skill requirements with at least one neutral or green-driven occupation. In other words, the standardised skill distance between most emission-intensive jobs and their closest non-polluting occupation is within 25% of the maximum distance, i.e. it is less than 25 in a 0-100 scale. (...) No GHG-intensive occupations have the exact same skill requirements as a neutral or green-driven job, suggesting that even when occupations are similar in skills some retraining effort will be needed to enable the transition.
> Notable exceptions are GHG-intensive occupations related to air transportation. These appear to require a very specific mix of skills compared to other jobs, with the extreme case of airline pilots." (p. 199)

Lim et al. (2023) s'intéressent spécifiquement aux métiers de l'extraction des combustibles fossiles aux États-Unis (en bref, "les métiers de l'extraction") [522]. Cette étude, déjà évoquée lorsqu'il était question de la distance géographique, exploite également l'information que recèle O*NET sur l'intensité des 'compétences', où ce terme regroupe des savoirs, des activités professionnelles et des aptitudes professionnelles (comme chez Vona et al., 2018, évoqué ci-dessous). Lim et al. (2023) concluent que les travailleurs des métiers de

Les premiers sont des capacités qui facilitent l'apprentissage et l'acquisition de savoirs. Les seconds sont des capacités qui facilitent l'exécution d'activités communes à plusieurs emplois.

521. Se référant à la classification disponible à la page https://www.onetonline.org/help/online/zones, les professions peu qualifiées désignent les "job zones" 1 à 3, caractérisées notamment par un niveau scolaire qui est au plus du niveau de la fin de l'enseignement secondaire ou d'écoles professionnelles. Les professions hautement qualifiées désignent les "job zones" 4 à 5. Ceux-ci requièrent en général un diplôme universitaire.

522. La note de bas de page 501 précise la liste de ces métiers.

l'extraction ont des compétences plus proches de celles d'une liste d'emplois verts du secteur des énergies renouvelables[523] que de celles du reste des professions. Leur approche part du degré d'importance des 'compétences' de chaque profession. Soit $\text{onet}_{j,s}$ l'importance de la 'compétence' s pour l'exercice de la profession j dans les données d'O*NET (après normalisation sur une échelle entre 0 et 1). Lim et al. (2023) introduisent cette information dans l'indice de similarité de Jaccard (15.5) appliqué à toute paire de professions (voir l'encadré 23). Plus les profils de compétences diffèrent, plus cet indice (appelé 'skill similarity') diminue et tend vers 0. La figure 15.6 présente la fonction de densité de probabilité de l'indice de Jaccard obtenue quand on compare les métiers de l'extraction aux professions vertes ("FF-Green" en vert) et aux autres professions ("FF-others", en gris). La dispersion autour de la moyenne de ces deux distributions est important. Néanmoins, le profil des 'compétences' requises pour exercer les métiers de l'extraction est plus proche de celui requis pour les professions vertes de la production d'énergie que de celui du reste des professions.

En résumé, Consoli et al. (2016), Bowen et al. (2018), Lim et al. (2023) et OECD (2024) ont chacun leur notion propre de compétences. Toutes mesurent des différences d'ampleur variable entre les professions vertes et non vertes. Mais, pour une grande partie des professions, le message de ces travaux est relativement rassurant quant à l'ampleur de ces écarts et à la possibilité de former les travailleurs. Cependant toutes ces études s'appuient sur la notion binaire d'emplois verts de la définition 3. Vona et al. (2018) et Rutzer et al. (2020) vont lever ces limitations dans le but d'affiner la mesure de proximité ou d'éloignement entre les emplois en utilisant la définition 4.

L'étude de Vona et al. (2018), déjà souvent citée pour ses définitions des professions vertes et brunes, cherche aussi à détecter les compétences générales requises par les professions vertes. Ensuite, après avoir regroupé ces compétences en quelques catégories, Vona et al. (2018) précisent dans quelle mesure les autres professions, et en particulier celles labellisées brunes, requièrent ces mêmes compétences. Précisons à présent ces étapes. Pour chaque profession d'une nomenclature très fine[524], la version de juillet 2012 d'O*NET renseigne *l'importance* de 108 tâches *générales* et compétences, que nous désignerons ci-dessous par l'expression 'compétences' et par l'indice c dans la spécification (15.6). Plus précisément, Vona et al. (2018) sélectionnent de l'information par profession relative aux

523. La note de bas de page 505 a précisé comment Lim et al. (2023) cernent cette notion. Au sein des emplois verts de la définition 3, Lim et al. (2023) se limitent à des professions (GNE, GES ou GID) du secteur des énergies renouvelables auxquelles ils ajoutent quelques autres professions, tels les ingénieurs et les managers.
524. Nomenclature à 8 chiffres distinguant, à l'époque, 912 professions.

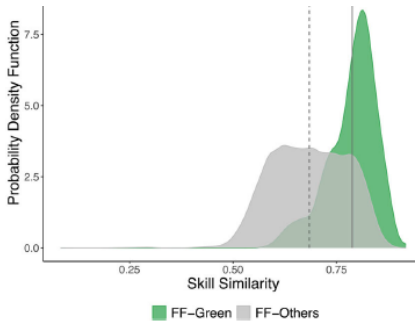


FIGURE 15.6 – Fonction de densité de probabilité de la mesure de proximité appelée "indice de Jaccard" (15.5) obtenue quand on compare les métiers de l'extraction des combustibles fossiles ("FF") aux professions vertes (FF-Green, en vert) et aux autres professions (FF-Others, en gris). Source : Figure 1 A de Lim et al. (2023).

Les moyennes des deux distributions sont indiquées par les deux droites verticales (en pointillés pour la distribution grise, en trait plein pour l'autre. L'intervalle de confiance au seuil de 95% de l'écart entre ces deux moyennes est $[0.099, 0.108]$. On ne peut donc rejeter l'hypothèse que la moyenne de l'indice de Jaccard relatif aux métiers de l'extraction et aux professions vertes est supérieure à la moyenne de ce même indice relatif aux autres professions comparées au vertes.

savoirs [525], aux activités professionnelles [526] et aux aptitudes [527]. La source O*NET détermine l'information accessible. Pour chaque profession et chacune de ces 'compétences', leur *importance*, déterminée à partir de l'avis d'experts et de travailleurs occupant les emplois correspondants, est un score normalisé entre 0 à 1. Pour chacun des 108 scores, Vona et al. (2018) estiment la spécification suivante [528] :

$$\text{score}_p^c = \gamma_{g(p)}^c + \beta^c \, \text{Greenness}_p + \varepsilon_p^c, \;\; p = 1, ..., 912, \tag{15.6}$$

où score_p^c désigne le score de la 'compétence' c requise par la profession p et "Greenness_p" est la notion de la définition 4. Chaque profession p de la nomenclature très fine appartient à un groupe de professions noté $g(p)$ [529]. Le score pouvant être très différent d'un groupe de professions à l'autre indépendamment du degré de greenness, les auteurs mesurent l'effet de l'indicateur de greenness sur le score de la 'compétence' après avoir soustrait un score moyen propre au groupe de profession. Formellement, ils introduisent une constante

525. Voir la note de bas de page 519.
526. Ces activités sont, à des degrés divers, communes à toutes les professions. En voici quelques exemples : coordonner d'autres travailleurs, gérer de l'information, résoudre des problèmes, ... Pour plus de détails, voir https://www.onetonline.org/find/descriptor/browse/4.A.
527. Voir la note de bas de page 518.
528. Dans le cas italien, voir Brunetti et al. (2025).
529. Identifié au sein d'une nomenclature à 3 caractères.

à l'origine $\gamma^c_{g(p)}$ qui est propre à chaque groupe de profession $g(p)$. Ensuite, si le coefficient β^c est positif et significativement différent de zéro (au seuil d'1%), on ne peut rejeter l'hypothèse selon laquelle la 'compétence' c est davantage importante quand le degré de greenness augmente. Vona et al. (2018) attribuent alors le label vert à cette 'compétence'. Comme l'indique l'encadré 24, cette approche n'est naturellement pas la seule manière de circonscrire la notion de compétence verte.

Au terme des 108 régressions, Vona et al. (2018) repèrent 16 "compétences générales vertes" (ci-dessous désignées par "GGS"). A la suite d'une analyse en composantes principales, ils les regroupent en quatre catégories [530] :

1. "Ingénieries et compétences techniques" (qui concernent le design, la conception et l'installation de technologies, la construction, etc.) ; ce regroupement de 'compétences' explique à lui seul 35% de la variance des compétences générales vertes ;
2. "Management opérationnel" (le bon usage de l'information, la guidance, comprendre comment un système fonctionne et se modifie, comment améliorer sa performance, etc.) ;
3. "Monitoring" (démarches légales, administratives et techniques permettant de respecter la législation) ;
4. "Science" : Physique, chimie, Biologie et Géographie.

530. Le tableau 3 de cet article mais aussi la page 72 du rapport de l'OECD (2023) les détaillent. Brunetti et al. (2025) obtiennent 4 groupes similaires dans le cas italien.

Encadré 24 *"Compétences vertes"*
Cet encadré, qui s'inspire de Janta et al. (2023), survole différentes manières de cerner la notion de "compétences vertes". Elles tendent à englober un éventail plus large de 'compétences' que l'approche quantitative exploitée par ailleurs dans ce texte.
A propos de l'expression "Compétences vertes", l'OECD (2024) précise :"Skills themselves are not inherently "green" ; what matters is how they are used. The concept of "skills for the green transition" emphasises the role of human capabilities in driving environmentally sustainable practices" (p. 186). Ce point de vue ne paraît cependant pas faire l'unanimité (voir par exemple, Kaura, 2024). Cedefop (2012) définit les compétences vertes en ces termes : "the knowledge, abilities, values and attitudes needed to live in, develop and support a society which reduces the impact of human activity on the environment". Cette définition a par exemple été adoptée et mise en oeuvre par la "European Classification of Occupations, Skills and Competences" (European Commission, 2022).
L'Inter-Agency Working Group on Work Based Learning a publié la définition suivante :

> *'Skills for the green transition' include skills and competences, but also the knowledge, abilities, values and attitudes needed to live, work and act in resource-efficient and sustainable economies and societies. They are :*
> *✓ technical : required to adapt or implement standards, processes, services, products and technologies to protect ecosystems and biodiversity, and to reduce energy, materials and water consumption. Technical skills can be occupation-specific or cross sectoral ; and*
> *✓ transversal : linked to sustainable thinking and acting, relevant to work (in all economic sectors and occupations) and life. Alternatively referred to as 'sustainability competences', 'life skills', 'soft skills' or 'core skills'. (Cedefop, 2022, p. 5)*

Kwauk et Casey (2021) étendent encore la perspective. Selon elles, on ne peut délimiter la notion de compétences vertes sans remonter d'abord à la source de la crise climatique. Si on l'identifie au problème de l'excès de concentration en gaz à effet de serre, il s'agit de doter la force de travail de capacités permettant de réaliser la transition vers des emplois dits verts. Si l'on considère que la crise climatique résulte de comportements individuels "non soutenables" sur le plan écologique, les compétences vertes incluront des capacités à changer ces comportements. Enfin, si la compréhension de la crise climatique pointe du doigt un système socio-économique inadéquat et injuste, alors, continuent Kwauk et Casey (2021), les compétences vertes incluront, voire privilégieront, des capacités permettant aux individus de contribuer à une transformation de ce système. Selon elles, chacune de ces conceptualisations de la crise climatique a sa validité. Mais, elles conduisent à l'identification d'un portefeuille de "compétences vertes" différent, et donc à la recommandation d'approches éducatives et de formations elles aussi différentes. En particulier, l'insistance sur les compétences dites STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) sera forte ou relativisée selon la grille de lecture de la crise climatique. Or, on sait que la part des femmes dans le nombre de diplômés des filières STEM est basse (32% en moyenne au sein de l'OCDE en 2019).

SOC	Brown	Green	Nor Brown or Green	SOC	Brown	Green	Nor Brown or Green
Engineering and Technical				Science			
17-2 Engineering jobs	**.585**	**.719**	.566	17-2 Engineering jobs	*.502*	*.426*	.366
19-1 Life scientists	.430	.390	.317	19-1 Life scientists	*.695*	*.585*	.641
19-2 Physical scientists	.390	.386	.421	19-2 Physical scientists	**.430**	**.542**	.599
19-4 Science technicians	.383	.416	.319	19-4 Science technicians	.403	.391	.439
47 Construction and extraction	**.403**	**.580**	.486	47 Construction and extraction	**.235**	**.307**	.188
49 Installation, maintenance, and repair	.553	.529	.519	49 Installation, maintenance, and repair	.286	.245	.203
51 Production	.317	.362	.309	51 Production	**.114**	**.220**	.111
53 Transportation and material moving	*.388*	*.320*	.293	53 Transportation and material moving	.168	.196	.124
Total	.398	.557	.322	Total	.205	.316	.161

FIGURE 15.7 – Moyenne de l'intensité des catégories de compétences générales vertes (GGS) "Ingénieries et compétences techniques" et "Science" au sein des groupes de professions incluant des emplois bruns aux États-Unis. Source : Tableau 6 de Vona et al. (2018).

La définition 1 précise la notion de profession brune. Les professions labellisées vertes sont celles avec un indicateur de greenness $> 0,10$ (voir la définition 4). Les autres professions ont une valeur de greenness $= 0$ sans être brunes. Les moyennes sont calculées en pondérant par l'emploi en 2012. Lorsque la moyenne des compétences dans les professions vertes est supérieure d'au moins 0,05 en comparaison avec les professions brunes, les niveaux sont marqués en gras. Lorsque la moyenne des compétences dans les professions brunes est supérieure d'au moins 0,05 en comparaison avec les professions vertes, les nombres sont en italiques. SOC signifie Standard Occupational Classification.

Par la suite, pour chacune des 912 professions, les auteurs construisent un indicateur d'importance de chacune des quatre catégories de compétences générales vertes évoquées à l'instant. Ils calculent ensuite la moyenne de ces quatre valeurs au sein de groupes de professions. Ces moyennes servent alors à comparer des professions vertes et non-vertes afin de mesurer jusqu'à quel point les secondes sont éloignées des premières. Vona et al. (2018) le font en particulier pour les professions brunes (selon la définition 1). Le tableau reproduit au graphique 15.7 se limite aux catégories "Ingénieries et compétences techniques" et "Science", les autres étant disponibles à la p. 733 de l'article[531]. Les groupes de professions où se retrouvent les professions brunes y sont repris. Seuls les codes de professions commençant par 17 et 19 nécessitent des études supérieures. Comme ces groupes de professions contiennent aussi des professions labellisées vertes (c'est à dire pour lesquelles l'indicateur de greenness est $> 0,10$) et d'autres professions (ni brunes et ni vertes),

531. Pour chaque profession, Tyros et al. (2023) agrègent les indicateurs d'importance de chacune des quatre catégories de compétences générales. Ensuite, ils somment ces indicateurs agégés en pondérant par la part de chaque profession dans l'emploi afin d'obtenir un "Green skill index" par pays. La Norvège, la Suède, l'Islande et la Suisse obtiennent les plus hautes valeurs de cet indice. Les pays du sud de l'Europe ont les valeurs les plus basses.

on les retrouve aussi dans ce tableau. Chaque cellule du tableau est le score moyen des groupes de professions correspondants selon la catégorie de 'compétences' indiquée dans le haut du tableau. On y constate que les compétences techniques et dans le domaine de l'ingénierie sont plus présentes dans les emplois verts chez les ingénieurs et les techniciens (numéro 17-2 dans la nomenclature SOC) et les professions des secteurs de la construction, des mines et des carrières (numéro 47). Ce constat concerne donc d'une part des professions requérant de longues études et de l'autre des professions sans une telle exigence. Un constat qualitativement analogue découle de la partie droite du tableau relative aux compétences scientifiques pour les professions des secteurs de la construction, des mines et des carrières et quelques autres groupes de profession. On notera aussi que le score moyen est parfois plus élevé pour les emplois bruns que pour les emplois verts. Enfin, le plus souvent, le score moyen du vaste groupe des emplois ni verts ni bruns est inférieur. A partir de l'ensemble des tableaux de comparaison, les auteurs livrent un message relativement rassurant :

> "This suggests that, in many cases, workers displaced from brown jobs by environmental regulation may be reemployed in new green jobs more easily than other workers might [532]. The difference between green and brown jobs is largest for engineering, although this may be due in part to a larger range in the GGS [Green General Skills] importance index for engineering.
> Differences between green and brown jobs are often less pronounced when looking at specific occupations. This is particularly true within the lower-skilled two-digit occupations, where the requirements for green and brown occupations are often similar. One important exception here is construction and extraction workers. (...) In high-skilled occupations, the skill portfolio of green and brown jobs is different, but not always in the expected direction." (Vona et al., 2018, p. 731)

On notera la divergence entre ces conclusions concernant les professions peu (très) qualifiées et celles de l'OECD (2024). Sans exclure d'autres explications possibles, la différence peut découler du choix de définitions différentes du caractère vert des professions. Cela dit, les moyennes du tableau reproduit au graphique 15.7 se prêtent bien à un classement, mais il apparaît difficile d'affirmer que le niveau absolu des écarts observés est grand ou non en termes de temps, d'efforts, de moyens nécessaires pour que ces écarts ne se muent pas en des obstacles majeurs à la mobilité professionnelle.

La dernière citation de Vona et al. (2018), relativement rassurante quant à l'éloignement entre les emplois bruns et verts, soulignait cependant une exception pour le vaste groupe des professions de la construction et de l'extraction : pour la plupart des quatre compétences générales vertes considérées, l'écart de l'indicateur d'importance entre les emplois

532. Bien que suivant une approche un peu différente, Brunetti et al. (2025) aboutissent à la même conclusion dans le cas italien.

verts et bruns est au moins aussi important que celui entre les emplois verts et le reste des emplois (ni bruns ni verts)[533].

Par delà les nombreuses différences de définition et de méthode, la littérature évoquée jusqu'ici génère, certes avec des nuances, un message relativement rassurant qui pourrait être résumé ainsi : la "distance" qui sépare le "profil" des professions vertes existantes de celui des autres professions ne serait, en règle générale, pas fort importante aux États-Unis.

Plusieurs travaux récents livrent toutefois un message *général* plus préoccupant. Tout d'abord, Bergant et al. (2022) exploitent les données de mars du IPUMS U.S. Current Population Survey entre 1998 et 2019. Ils disposent d'informations démographiques sur les individus (genre, âge, niveau d'éducation) ainsi que d'informations concernant la position de ces individus sur le marché du travail, leur profession et le secteur qui les emploient. Bergant et al. (2022) exploitent l'indicateur de degré de greenness (ci-dessous, "green intensity") de la définition 4 et la notion d'emploi brun de la définition 1 (ci-dessous, "pollution dummy"). Ils font la constatation suivante : "When we regress green intensity and pollution dummy on all demographic characteristics simultaneously, we find that indeed workers that are high-skilled[534], living in urban, and hold jobs that are less vulnerable to automation tend to have greener jobs, after controlling for the rest of the variables. Neutral jobs seem well distributed across skill and urban/rural" (p. 14). Leur message général se résume ainsi : "the anatomy of green and polluting jobs suggests green jobs and workers are systematically different and most of the transition out of polluting jobs will likely take place by workers being re-employed in neutral jobs" (p.4). Cet article ne détaille cependant pas comment il arrive à cette conclusion.

Selon une toute autre approche, l'article de Saussay et al. (2024) relatif aux États-Unis et celui de Sato et al. (2023) relatif au Royaume-Uni produisent également un message général plus préoccupant. Saussay et al. (2024) exploitent des *offres d'emploi* dans l'ensemble des États-Unis et distingue trois types d'emplois : les emplois bas-carbone, intensifs en carbone et les autres (désignés par l'adjectif "générique")[535]. Saussay et al. (2024) s'intéressent tout particulièrement aux différences entre les emplois bas-carbone et les autres *au sein des professions*[536]. Dans ce but, ils se concentrent sur six groupes de professions présentant

533. Pour le sous-groupe des métiers de l'extraction des combustibles fossiles, Lim et al. (2023) aboutissent à une conclusion opposée à celle de Vona et al. (2018). En effet, selon Lim et al. (2023), "fossil fuel workers (...) have significantly more skill similarity to green industry occupations (...) than to other industries" (p. 2). De nombreuses différences marquent l'approche de Lim et al. (2023) et celle de Vona et al. (2018). L'une d'entre elles est la différence de notion d'emploi vert : Lim et al. (2023) ne recourent pas à l'indicateur de greenness mais bien aux catégorisations GNE, GES et GID. En outre, leur étude se limite aux travailleurs du secteur de la production d'énergie. Par ailleurs, la liste des métiers "bruns" est également différente. Enfin, la manière de juger de l'éloignement entre les emplois diffère également. Il est donc difficile d'isoler les facteurs principaux expliquant la divergence entre ces deux articles.

534. Ceux qui ont un niveau d'éducation supérieur ou égal à l'enseignement supérieur.

535. Pour quelques explications méthodologiques, voir la note de bas de page 339.

536. Rappelons que les articles évoqués jusqu'ici ne sont pas en mesure de faire cela dans la mesure où le

une forte densité d'offres d'emploi dans le secteur bas carbone. Il s'agit de quatre groupes de professions hautement qualifiées (spécialistes en affaires (SOC 13-2) ; ingénieurs (17-2) ; techniciens en ingénierie et en cartographie (17-3) ; et spécialistes des sciences techniques (19-2)) et de deux professions peu qualifiées (construction et extraction (47) ; et installation et maintenance (49)). Saussay et al. (2024) se concentrent sur cinq grands groupes de compétences, qu'ils identifient à l'aide de mots-clés présents dans les déclarations de postes vacants : les compétences cognitives [537], les compétences dans les technologies de l'information, les compétences en gestion et en supervision [538], les compétences sociales [539] et les compétences techniques [540]. Ils développent une formule d'écart de compétences requises qui permet de séparer l'écart entre types d'emplois au sein de la même profession et l'écart entre professions. Le premier écart est propre à cette étude. Le second a déjà été calculé dans des études antérieures où le type d'emploi se définit par la profession.

Se limitant aux cinq compétences évoquées ci-dessus, ils concluent que les emplois vacants bas carbone requièrent généralement plus de compétences que les emplois génériques. L'écart de compétences entre emplois bas carbone et génériques à l'intérieur d'une profession contribuent de manière variable mais non négligeable à l'écart global de compétences : c'est cependant moins vrai pour les compétences cognitives et celles liées aux technologies de l'information que dans le cas des trois autres. Au terme d'une régression visant à expliquer le nombre de compétences demandées dans une offre par une variable binaire valant 1 si l'emploi est bas-carbone (zéro sinon), un effet fixe propre à l'entreprise autrice de l'offre et un effet du temps, les auteurs concluent que le nombre de compétences requises est significativement supérieur lorsque l'emploi est bas-carbone. Ceci est vrai au sein de chacun des six groupes de professions mentionnés plus haut. A l'intérieur de chacun des cinq groupes de compétences, la part des emplois vacants requérant soit une compétence soit deux et davantage est très variable d'un groupe de professions à l'autre et, au sein d'un groupe, selon que l'offre est classifiée bas-carbone, intensive en carbone ou générique. Parmi d'une part les ingénieurs et de l'autre les emplois de la construction et de l'extraction, où l'on retrouve les trois types d'emplois, l'écart d'intensité des compétences requises est généralement moindre entre les emplois bas carbone et ceux intensifs en carbone qu'entre les premiers et les emplois génériques (ceci rejoint un résultat de Vona et al., 2018). De tout ceci les auteurs concluent : "Our findings that low-carbon jobs require a richer skill portfolio than similar non-low carbon jobs suggests that substantial re-skilling efforts will be required to enable the expected large scale mobilization of a greener workforce in the coming decades (p. 19)". Au Royaume-Uni et selon la même méthodologique

label vert ou brun est associé à une profession prise dans son ensemble.

537. Mots-clés tels que "résolution de problèmes", "recherche", "analytique", "esprit critique".

538. L'éventail de mots-clés est ici très large. Citons "gestion de projet", "analyse et évaluation de systèmes", "supervision", "leadership", "gestion".

539. Mots-clés tels que "communication", "travail en équipe", "collaboration", "négociation".

540. La liste de mots clés est ici fort longue. Voir l'annexe F de l'article.

que celle de Saussay et al. (2024) , les conclusions de Sato et al. (2023) vont dans le même sens : “Low-carbon jobs are systematically more skill-intensive in most major occupations (...) The magnitude and nature of the skill gap vary across occupational groups, suggesting that retraining solutions will need to be tailored to meet the specific needs of occupations affected by decarbonisation, or of the companies hiring these workers” (p. 23).

Résumé

La décarbonation des économies entraînant une réallocation des emplois entre les secteurs et entre les professions, il est acquis qu’une telle réallocation requiert un effort de formation des travailleurs (voir par exemple Cedefop, 2021, dans de cas du European Green Deal). Partant du constat que les transitions entre les emplois “bruns ou intensifs en carbone” vers les emplois “verts ou bas carbone” sont relativement rares, cette section s’est demandée dans quelle mesure un décalage en termes d’indicateurs liés aux compétences, aux savoirs et aux aptitudes est responsable de cette rareté. Les études se sont d’abord appuyées sur la source O*NET. Si l’on admet que la source de données O*NET contient de l’information sur les professions qui est pertinente au-delà des frontières des États-Unis, ces études sont pertinentes pour à tout le moins les économies avancées. Plus récemment, les études ont exploité des données d’emplois vacants en vue de suivre plus rapidement l’évolution du marché du travail et aussi de permettre une distinction entre emplois verts et non verts au sein des professions.

La littérature nord-américaine relative aux écarts entre professions et entre emplois (vacants) verts et non verts est au fil du temps passée d’un message relativement rassurant (la distance qui sépare le “profil” des professions vertes existantes de celui des autres professions ne serait, en règle générale, pas fort importante) à un message qui l’est nettement moins. Ce passage s’est en particulier produit à partir du moment où l’on a été à même de distinguer les emplois verts et non verts *au sein des professions*. Une étude récente au Royaume-Uni (Sato et al., 2023) conclut également que l’écart de qualification apparaît plus important lorsque l’on réalise cette distinction. Sur cette base, la faiblesse observée des transitions vers les emplois verts ou bas carbone trouverait donc une explication, sans doute partielle, dans des écarts de profil en termes de compétences, de savoirs ou d’aptitudes.

Les différences de définition d’un emploi “vert” et la variété de méthodes utilisées rendent toutefois une synthèse bien délicate. Il semble se confirmer que l’écart entre les emplois bas-carbone et les emplois intensifs en carbone est plus limité qu’entre les premiers et le reste des emplois. Certaines professions des secteurs de l’extraction (d’énergies fossiles) et de la construction pourraient cependant être une exception, mais il n’y a pas de consensus à ce propos. Il n’y a pas non plus de consensus quant à savoir si l’écart de “profil” se marque plus ou moins parmi les professions moins qualifiées.

15.4.4 Les freins à la mobilité des travailleurs issus de l'économie intensive en carbone : résumé

Cette section a cherché à comprendre les causes de la faible mobilité entre les emplois "intensifs en carbone" (ou "bruns") et les emplois "verts" dans les économies avancées. Les sujets de controverses demeurent assez nombreux. Ceci s'explique par des différences de définition, d'éventail de professions ou de secteurs couverts et de méthode. Au terme de ce parcours, les conclusions générales suivantes se dégagent néanmoins. Il ne semble pas émerger une cause unique à la faible mobilité entre emplois. L'attractivité financière relative des emplois "verts" est souvent mise en évidence (parfois, avec des nuances selon la catégorie – GNE, GES, GID – ou encore le niveau de qualification). Mais, au Royaume-Uni et aux États-Unis, la prime salariale associée à un emploi vert s'est réduite, voire estompée, au fil du temps. En outre, un manque d'attractivité peut être observé parmi les professions les moins qualifiées ou lorsque le travailleur dispose initialement d'une prime salariale dans un emploi intensif en carbone. Enfin, une moindre sécurité d'emploi paraît s'observer dans le cas des emplois verts.

Quant à la distance géographique entre les emplois intensifs en carbone et ceux qui sont verts, il n'est pas clair qu'elle soit un frein général à la mobilité. Les études relatives aux États-Unis livrent des messages divergents. Dans ce pays et au Royaume-Uni, les études qui exploitent des emplois vacants dans tous les secteurs de l'économie concluent néanmoins que la localisation géographique des emplois vacants verts et celle des emplois (vacants) bruns ne coïncide guère. Pour les travailleurs manuels occupés dans les emplois bruns, dont la mobilité géographique est plus limitée, il y a de sérieux indices de préoccupation. Dès lors, il y a des raisons de développer des politiques publiques visant ce type de population au sein des régions malmenées par la décarbonation. Enfin, cette section s'est penchée sur le frein que peut représenter une inadéquation des qualifications. A ce propos, on consultera le résumé qui précède cette sous-section.

Chapitre 16

La disponibilité globale en main d'oeuvre, frein à la décarbonation des économies avancées ?

Le chapitre précédent s'est penché sur les réallocations d'emplois et de travailleurs engendrées par le changement climatique et par les politiques visant à favoriser la décarbonation des économies occidentales. La capacité des travailleurs des professions en déclin à occuper des emplois en expansion y a été un thème central. Une question plus générale abordée à présent consiste à se demander si la disponibilité en main d'oeuvre freine le processus de décarbonation. Cette question se pose alors que les marchés du travail font actuellement face à d'autres changements profonds que la décarbonation ou le changement climatique : la vitesse du changement technologique, le vieillissement de la force de travail, la diminution de la taille de celle-ci[541], une attention accrue de la population occidentale aux conditions de travail[542], et, très récemment, un changement de paradigme où le multilatéralisme et la mondialisation font face à une vague de fragmentation et de polarisation.

Les études déjà évoquées ont fourni de l'information sur les exigences associées aux emplois verts. Par exemple, Valero et al. (2021) obtiennent une corrélation positive, en Europe, entre le caractère vert de l'emploi et la possession d'un diplôme universitaire. Ce résultat est cependant à nuancer car Valero et al. (2021) indiquent que le niveau universitaire du travailleur est corrélé positivement avec les variables binaires GNE et GES et

541. Dans l'Union européenne, on s'attend à une diminution de la force de travail de 18,8 millions d'unités d'ici à l'an 2050 (European Commission, 2025, p. 16). Aux États-Unis, Smith et al. (2025) estiment que "From 2024 through 2032, 18.4 million experienced workers (ages 55–64) with postsecondary education are expected to retire, far outpacing the 13.8 million younger workers (currently ages 16–24) who will enter the labor market with equivalent postsecondary educational qualifications" (p. 1). Sur le lien entre le vieillissement et la mobilité sectorielle, voir Cociuba et MacGee (2026) et les références que cet article cite.

542. Voir par exemple Bagga et al. (2025).

négativement avec la variable GID[543]. Lorsque le caractère binaire de l'emploi est remplacé par l'indicateur de greenness[544], Bluedorn et al. (2023) constatent que les travailleurs diplômés d'études supérieures se retrouvent davantage dans les professions à haut degré de greenness que les travailleurs moins scolarisés. S'intéressant aux transitions au sein de l'Union européenne et désignant du label vert les emplois au degré de greenness au moins égal à 0,1, Causa et al. (2024b) indiquent : "Education is the most important individual-level driver of transitions from nonemployment to green jobs[545], with a particularly strong effect from graduating in scientific fields for young people entering the labour market" (p. 3). Selon ces analyses, l'accès à un niveau d'études (scientifiques) supérieur permettrait de mieux correspondre aux exigences professionnelles de professions au caractère vert bien marqué (ceci excluant les emplois GID). Rappelons toutefois que tout ceci s'appuie sur l'information tirée de la source O*NET où certaines professions, comme celles de l'agriculture, de la sylviculture et de la pêche, ont un indicateur de greenness nul[546]. S'intéressant aux emplois vacants postés sur internet, et distinguant les emplois bas-carbone des autres au sein des professions, Sato et al. (2023), et Saussay et al. (2024) soulignent que les offres d'emploi bas-carbone requièrent un portefeuille de compétences plus étendu que celles qui n'ont pas cette caractéristique. Ces diverses contributions associent donc le verdissement des économies avancées à une élévation des exigences de formation. Comme on assiste au fil du temps à une hausse du niveau de formation de la force de travail, ceci ne permet toutefois pas de répondre à la question posée par ce chapitre. Regardons d'abord les faits récents.

16.1 Baisse du chômage et augmentation des tensions sur le marché du travail

A partir de 2022, les taux de chômage ont baissé dans bien des pays riches et ils y atteignent à présent des niveaux historiquement bas. La figure 16.1 illustre cela pour un éventail de pays. Elle indique toutefois aussi une remontée récente du taux de chômage dans plusieurs pays. Dans les économies avancées, les tensions sur le marché du travail se sont généralisées après la pandémie du Covid-19 et se traduisent par une élévation du nombre d'emplois vacants par personne en chômage[547]. Le débat public porte abondam-

543. Voir la définition 3 de ces acronymes dans le chapitre 13.
544. Précisé à la définition 4 dans le chapitre 13.
545. Leur figure 3 indique un net impact favorable du diplôme d'études supérieures (au moins le niveau ISCED 5).
546. Voir l'annexe de Bluedorn et al. (2023).
547. Handel (2024), par exemple, en offre un aperçu aux États-Unis, au Royaume-Uni et dans l'Union européenne. European Commission (2023) approfondit également ce thème. En 2024 et 2025, des signes de détente partielle apparaissent dans certains secteurs et pour certains pays (European Commission, 2025 ; pour les États-Unis, voir `https://www.bls.gov/charts/job-openings-and-labor-turnover/opening-industry.htm`). A

ment sur le manque de main d'oeuvre prête à travailler dans les secteurs où la demande est et/ou sera durablement forte, en particulier sur la voie de la neutralité carbone. Les raisons d'un manque de main d'oeuvre sont multiples et varient d'un type de profession à l'autre : la longueur de la formation préalable à l'exercice d'une profession, la formation des salaires et plus généralement des conditions de travail, les images véhiculées par certaines professions au sein de la population sont des exemples de facteurs explicatifs qui s'ajoutent à des mouvements cycliques [548]. Ce débat sur la disponibilité de main d'oeuvre est notamment lié à la problématique des choix de formation scolaire et de filières d'enseignement, aux décisions de participation au marché du travail et aux politiques de migration [549].

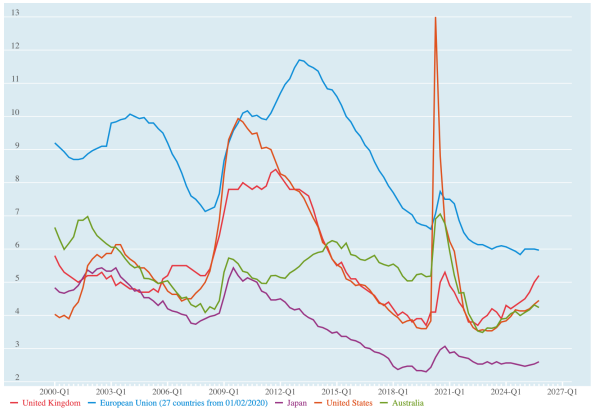


FIGURE 16.1 – Taux de chômage trimestriel au sein de la population d'au moins 15 ans entre les premiers trimestres de 2000 et de 2026. Source : OECD Infra-annual labour statistics.

Données corrigées des variations calendaires et saisonnières.

16.2 La disponibilité globale en main d'oeuvre freine-t-elle la décarbonation des économies occidentales ?

Un premier élément de réponse consiste à quantifier la mobilité possible entre emplois. Rutzer et al. (2020) et Lobsiger et Rutzer (2021b) estiment la taille de la population en emploi susceptible de transiter plus ou moins aisément vers un emploi vert, respectivement

propos de la mesure retenue, il y a lieu de bien distinguer le nombre d'emplois vacants rapporté à la demande de travail (à savoir, la somme de l'emploi et du nombre d'emplois vacants) et le nombre d'emplois vacants rapporté à la population en chômage. Comparée à la première, la seconde mesure est un indicateur nettement plus pertinent des tensions sur le marché du travail.

548. Pour une discussion générale succincte, voir par exemple Handel (2024).

549. Voir par exemple le chapitre 3 de European Commission (2023).

aux États-Unis et au niveau des pays européens[550]. L'encadré 25 introduit leur approche. Selon Rutzer et al. (2020), 10% des travailleurs américains ont un "haut potentiel" à pouvoir réaliser des tâches vertes. Le graphique 16.2 permet une comparaison de cette même proportion entre pays européens et entre secteurs d'un même pays. Dix points de pourcentage séparent les pays aux deux extrêmes (la Norvège et Chypre). Comme cet écart entre des moyennes nationales dépend notamment de la distribution de l'emploi propre à chaque pays, les moyennes sectorielles indiquées à la figure 16.2 sont plus intéressantes. On y perçoit une régularité : le potentiel est généralement bien supérieur dans l'industrie manufacturière et le secteur regroupant l'énergie et la construction que dans les secteurs des services, de l'agriculture, de la sylviculture, de la pêche et des industries extractives.

A partir de cet acquis, Lobsiger et Rutzer (2021b) cherchent à détecter la présence et l'intensité d'une pénurie de main d'oeuvre en Europe. Ils construisent un "indicateur composite" (noté "SSI") qui somme simplement une série de variables en écart à leur moyenne, divisées par leur écart-type[551]. Les auteurs retiennent les variables suivantes, qui toutes devraient, selon eux, être corrélées positivement avec l'intensité des pénuries : l'inverse du taux de chômage, la part des travailleurs immigrés (récents) dans l'emploi, le taux de croissance de l'emploi, la part des travailleurs âgés de 50 à 59 ans dans l'emploi (mesuré au sein de la population âgée de 25 à 59 ans) et la part de l'emploi occupé par des diplômés de l'enseignement secondaire supérieur ou tertiaire. Le choix et l'interprétation de ces variables peut être un objet de débat[552]. Ces variables et donc aussi l'indicateur SSI sont mesurés au niveau des professions[553], ce qui requiert des données statistiques fortement désagrégées mais fiables. Exploitant les données de l'enquête européenne sur les forces de travail de 2016, Lobsiger et Rutzer (2021b) calculent l'indice composite SSI pour les professions à "haut potentiel" d'exercer des tâches vertes et pour celles dont le potentiel est très bas (notions introduites dans l'encadré 25). La figure 16.3 présente sur l'axe vertical l'indice composite des premières et sur l'axe horizontal celui des secondes. On constate que tous les pays se caractérisent par un indice composite supérieur pour les premier groupe de professions. Ceci suggère que le risque de pénurie de main d'oeuvre est d'une acuité supérieure pour les professions à "haut potentiel". Les pays où l'indice composite de ces professions est le plus élevé sont la Croatie, l'Allemagne, la Belgique et la Norvège. Dans le cas de ce dernier, le fait d'avoir la plus grande part de travailleurs exerçant une profession à "haut potentiel" d'exercer des tâches vertes (figure 16.2) se combine avec un des risques les plus élevés de pénurie de main d'oeuvre de ce type (telle que l'indice composite SSI le

550. Voir aussi Lobsiger et Rutzer (2021a) dans le cas spécifique de la Suisse.

551. Les auteurs ne proposent donc aucune hiérarchie entre ces variables qui sont sans doute corrélées entre elles. Le recours à une analyse en composante principale ("principal component analysis") aurait pu être envisagée.

552. La part des travailleurs immigrés au cours des dix dernières années est pour les auteurs un indicateur corrélé positivement avec le manque de travailleurs *qualifiés*. Or, les travailleurs immigrés peuvent, selon leurs profils, contribuer à la réduction des pénuries de ce type de travailleurs et non l'inverse.

553. De la nomenclature ISCO à 3 digits.

capte).

A côté de l'exercice de Lobsiger et Rutzer (2021b), il existe d'autres travaux visant à quantifier la disponibilité de main d'oeuvre face, notamment, à la numérisation et à la décarbonation de nos économies. Au niveau européen, on peut citer le chapitre 3 du rapport de la European Commission (2022b) et le rapport de la European Commission (2023). Ce dernier résume les perspectives ainsi :

> "With the exception of manufacturing of motor vehicles and basic metals, energy-intensive industries are projected to face moderate labour shortages in the future (...) The largest share of EU workers in transformation sectors can be found in manufacturing (16.1%) and construction (6.7%), which are also projected to face moderate-to-average overall shortages by 2035. (...) Transportation and storage, and water supply, sewerage, waste management and remediation activities which constitute 6.1% of the total EU workforce are considered key sectors in the context of the circular economy and the green transition, and have the highest projected future shortages." (European Commission, 2023, p. 54)

Dans le domaine de l'énergie, les scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie à l'horizon 2030 s'accompagnent du message suivant [554] :

> "Energy education and upskilling must be massively upscaled to overcome existing labour shortages and keep pace with the rapidly growing demand for more skilled workers. Governments should also remain watchful for how incentives that draw investment into clean sectors impact other industries competing for similar workers. For instance, construction workers shifting to support new energy projects may create labour supply bottlenecks in other energy sectors" (International Energy Agency, 2025, p. 21).

554. Voir aussi Jansen (2023) qui se centre sur les besoins anticipés de main d'oeuvre pour la production et le déploiement de la production solaire et éolienne d'électricité ainsi que des batteries au sein de l'Union européenne. En ce qui concerne le secteur énergétique au Royaume-Uni, voir par exemple Price Waterhouse Cooper (2022). Aux Pays-Bas, Lankhuizen et al. (2023) combinent une approche input-output et la prise en compte des frictions d'appariement entre emplois vacants et chômeurs afin d'étudier les goulets d'étranglement suite à un choc de demande de main d'oeuvre représentatif de la transition énergétique dans ce pays. Lankhuizen et al. (2023) concluent que l'objectif du gouvernement néerlandais de réduire substantiellement les émissions de GES pourrait, du moins à court terme, être entravé par des goulets d'étranglement sur les marchés du travail.

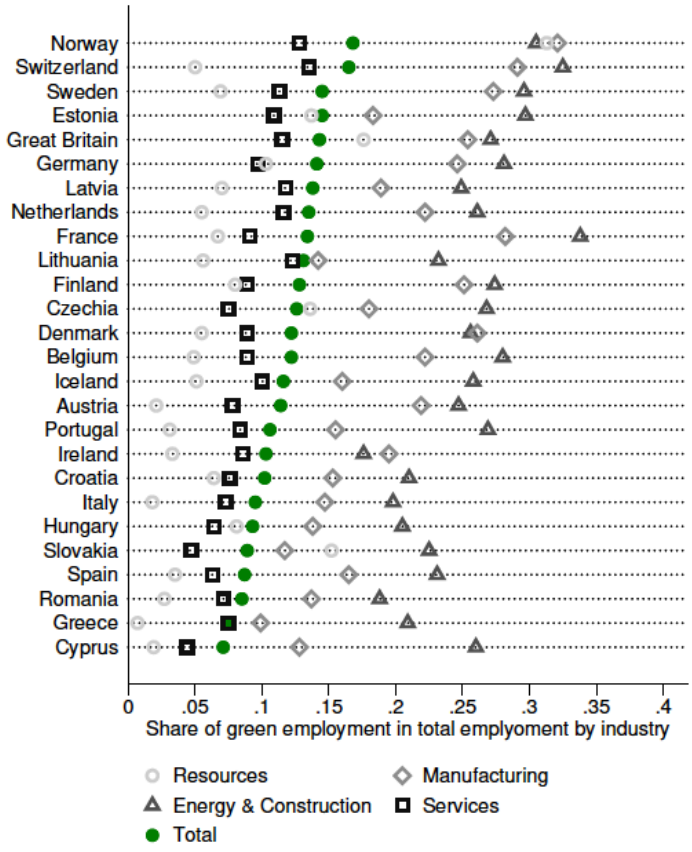


FIGURE 16.2 – Part nationale des travailleurs exerçant une profession qualifiée à "haut potentiel" d'exercer des tâches vertes en 2016 (notion introduite dans l'encadré 25) : niveau national ("Total") et moyenne par grand secteur. Source : Figure 1 de Lobsiger et Rutzer (2021b).

La source est l'Enquête sur les Forces de Travail de 2016. Outre le total de l'économie, le label "Resources" désigne l'agriculture, la sylviculture, la pêche et les industries extractives (section A et B de la classification NACE Rev. 2) ; "Manufacturing" correspond à la section C ; "Energy & Construction" regroupent la production et la distribution d'électricité, de gaz, de vapeur, d'air conditionné et d'eau ainsi que l'assainissement, la gestion des déchets et la dépollution (sections D, E et F) ; "Services" englobe tous les autres secteurs (sections G à S).

Encadré 25 *Potentiel d'exercer des tâches vertes*

*Rutzer et al. (2020) affinent la méthodologie de Vona et al. (2018) grâce à des techniques de machine learning qui exploitent davantage d'information sur l'éventail des 'compétences' requises tout en étant parcimonieuses (où le terme 'compétences' a été précisé à la section 15.4.3 lors de l'exposé de l'étude de Vona et al., 2018). Leur objectif est de réaliser une prédiction du "potentiel de verdissement" des 965 professions présentes dans les données O*NET disponibles en 2017-2018. Rutzer et al. (2020) établissent selon diverses techniques une relation du type*

$$Greenness = f('Compétences') + \varepsilon,$$

où Greenness est le concept de la définition 4, 'Compétences' est le vecteur reprenant chacune des 'compétences' et ε résume l'ensemble des déterminants non observés du degré de greenness. Après estimation, les auteurs exploitent le vecteur de 'compétences' de chacune des 965 professions afin de prédire, pour chacune, un potentiel d'accomplissement de tâches vertes. Ce potentiel est une variable continue entre 0 et 1. Sous un premier seuil de 0,23, se trouve la moitié des travailleurs aux États-Unis, qui ont donc un potentiel qualifié de "très bas" à pouvoir réaliser des tâches vertes. Au-delà de 0,5, on retrouve environ 10% des travailleurs, qui se caractérisent par un "haut potentiel".

*Grâce à un travail, délicat, de conversion de la nomenclature américaine des professions (SOC) vers la nomenclature européenne (ISCO), Lobsiger et Rutzer (2021b) associent les 'compétences' de O*NET aux professions de la classification européenne à l'aide du modèle estimé préféré par Rutzer et al. (2020). Cette association postule que les 'compétences' requises pour exercer un emploi aux États-Unis sont également pertinentes dans chaque pays européen. Sous cette hypothèse, les auteurs produisent, pays par pays et profession par profession (de la classification ISCO à 3 digits), un potentiel d'exercer des tâches vertes. Pour résumer l'information en une mesure de la part des travailleurs à "haut potentiel" d'exercer des tâches vertes, les auteurs doivent adopter un seuil au sein de cet intervalle. Lobsiger et Rutzer (2021b) le fixent de telle manière que le potentiel moyen en Europe soit équivalent au potentiel moyen dans les données O*NET. Ce choix, qui dépend de la distribution des professions dans les deux entités géographiques, apparaît arbitraire.*

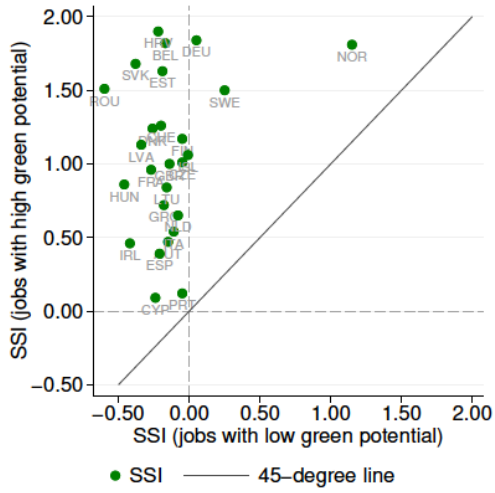


FIGURE 16.3 – Comparaison de l'indice "SSI" de risque de pénurie de main d'oeuvre pour les professions à "haut potentiel" d'exercer des tâches vertes et celles qui ne le sont pas : pays de l'Union européenne en 2016. Source : Figure 4 de Lobsiger et Rutzer (2021b).

SSI : indice composite captant le risque de pénuries de main d'oeuvre.

Les plateformes de rencontre entre emplois vacants et personnes à la recherche d'un emploi sont une source de données déjà évoquée précédemment. A côté de travaux scientifiques [555], les plateformes elles-mêmes se mettent à produire de l'information. Exploitant LinkedIn dans 43 pays de par le monde au cours des sept premiers mois des années 2021 à 2024, Kaura (2024) identifie 38 000 compétences, catégorisées en 249 groupes dont 12 sont qualifiés de verts (couvrant 1200 compétences). Contrairement aux travaux scientifiques, la méthodologie suivie n'est pas détaillée. Entre 2021 et 2024, la part des offres d'emploi qualifiées de vertes ou nécessitant une ou plusieurs compétences vertes a crû annuellement en moyenne de 5,9%. Entre les mêmes années, la croissance de la population ayant au moins une qualification verte ou occupant un emploi qualifié de vert a crû en moyenne de 3,2% seulement. Selon des projections, que le document n'explique pas, l'écart se creuserait au fil du temps (voir aussi LinkedIn, 2024).

En résumé, divers travaux convergent sur le constat que la disponibilité en main d'oeuvre est un frein à la décarbonation des économies avancées. Face à la perception que la formation des travailleurs est une réponse essentielle à ce constat, l'Union européenne a par exemple lancé un "Action Plan Labour and Skills Shortages" [556]. D'autres initiatives existent

555. Voir les articles de Curtis et Marinescu (2023), Sato et al. (2023), Curtis et al. (2024) et Saussay et al. (2024), évoqués ci-dessus. La représentativité de ces sources de données doit continuer à faire l'objet d'une attention.
556. Voir https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/ip_24_1507/

ailleurs [557].

Mais, la question ne se limite pas à la formation. Les employeurs ont également à utiliser efficacement les qualifications de leurs travailleurs. Au sein de l'Union européenne, le rapport de la European Commission (2025b) signale en effet un taux de sur-qualification important de la main d'oeuvre [558]. Il importe évidemment aussi qu'un nombre suffisant de personnes désirent participer au marché du travail [559] et soient attirées par les emplois qu'offrent la décarbonation. De ce point de vue, au chapitre 15, certaines études scientifiques exploitant des données d'emplois vacants ont conclu que la prime salariale des emplois "bas-carbone" baisse au cours des années 2010 et peut même cesser d'être statistiquement significative. Cet aspect et plus généralement les conditions de travail doivent aussi être un point d'attention.

IP_24_1507_EN.pdf.

557. Voir par exemple Smith et al. (2025) et le plan du Conference Board aux États-Unis (https://www.conference-board.org/pdfdownload.cfm?masterProductID=39178) ou celui du gouvernement australien (https://www.dcceew.gov.au/energy/workforce).

558. A la page 33 de ce rapport, l'intensité de cette sur-qualification est approchée, imparfaitement, par la part des personnes ayant atteint le niveau d'enseignement supérieur (niveaux ISCED 5 à 8) qui occupent des emplois pour lesquels le niveau d'enseignement supérieur n'est pas requis (groupes ISCO 4 à 9). En moyenne en 2024, cette part avoisinerait un travailleur sur cinq au sein de l'Union européenne.

559. La fiscalité sur les revenus du travail, la possibilité de concilier vie professionnelle et vie privée mais aussi les politiques régissant l'immigration et influençant l'intégration socio-professionnelle des travailleurs migrants sont quelques déterminants de cette participation.

Troisième partie

Conclusion

Chapitre 17

Conclusion

Entre le début et la fin de la rédaction de ce livre, l'engagement des grandes économies à infléchir le changement climatique s'est affaibli ou est même abandonné. L'action mondiale en faveur du climat (mesurée comme une combinaison des politiques adoptées et de leur rigueur) n'a progressé que de 1% en 2024, confirmant le ralentissement observé depuis 2021 (OECD, 2025, p. 12). Le retrait des États-Unis de l'accord de Paris sur le climat contribue lourdement à ce retournement. Sans remettre en cause l'objectif de la neutralité carbone nette à l'horizon 2050, l'Union européenne a décidé de revoir certaines législations du "Green Deal" qui alourdissent les coûts des entreprises et menacent la compétitivité internationale de l'Europe. A l'horizon de l'année 2040, l'objectif intermédiaire de réduire les émissions européennes de gaz à effet de serre (GES) de 90% par rapport à 1990 a été assorti de mesures de flexibilité, d'une clause de révision et de la postposition à 2028 de l'extension du système de quotas échangeables aux émissions issues des transports routiers, des bâtiments et de certaines petites installations industrielles. Le Royaume-Uni partage l'ambition de la neutralité carbone à l'horizon 2050 mais, faisant face à une opposition croissante, il a postposé certaines mesures de mise en oeuvre. Tout en ayant aussi un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, le dernier plan stratégique énergétique du Japon de février 2025 maintient une très forte dépendance aux énergies carbonées importées. La République populaire de Chine, qui représente 30% des émissions globales de GES, a soumis, en novembre 2025, sa contribution déterminée au niveau national ("Nationally Determined Contribution") pour 2035 dans le cadre de l'accord de Paris de 2015. Tout en continuant à augmenter ses émissions de GES et à dépendre fortement des énergies fossiles, la Chine s'y engage à atteindre le pic de ses émissions de GES en 2030 et atteindre la neutralité carbone en 2060. L'Inde, dont l'objectif de neutralité carbone se situe en 2070, a, en mars 2026, révisé sa contribution déterminée pour la période 2031–2035. Mais, de manière générale, les contributions déterminées au niveau national demeurent largement en deçà de ce qui est requis pour respecter l'accord de Paris (voir par exemple la figure 1.3 de l'OECD, 2025).

Selon les pays, un aveuglement idéologique ou la crainte de réduire le niveau de vie des

générations actuellement en vie et celle de nuire à la profitabilité immédiate des entreprises sont sous-jacents à ce retournement chez les uns et à cette tiédeur chez les autres. Parallèlement, la préoccupation de l'adaptation au changement climatique grandit de manière générale face aux effets déjà perceptibles du changement climatique et aux doutes d'atteindre la neutralité carbone à temps. Tous ces changements s'opèrent dans un contexte marqué notamment par un endettement public généralement élevé, des tensions et une fragmentation géopolitiques et un affaiblissement du multilatéralisme.

A l'origine de ce livre, il y a la crainte de malmener les travailleurs des générations actuelles si l'on combat les crises environnementales, ou à tout le moins le réchauffement climatique, plus vigoureusement. Cette crainte est en effet largement observée, que ce soit, par exemple, parmi ceux qui recherchent des justifications à l'inaction environnementale ou parmi les tenants d'une « transition juste ». Ce livre a tenté d'objectiver les effets sur les travailleurs du changement climatique en cours et des politiques mises en oeuvre pour le contenir. Même si, sur ces thèmes, la littérature scientifique disponible s'intéresse plus souvent aux économies dites avancées (réunies au sein de l'OCDE), ce livre a proposé une synthèse de la littérature internationale concernant un plus large éventail de pays.

Le premier objectif de ce livre a été de résumer les connaissances quant aux effets de diverses manifestations récentes du changement climatique sur le quotidien vécu par les travailleurs d'aujourd'hui et de demain (l'usage du temps, l'accès à l'emploi, l'apprentissage, la réussite d'épreuves, la santé) et sur certains indicateurs économiques liés au travail (en particulier, la productivité du travail). Ce faisant, ce livre a donc délibérément ignoré un ensemble d'indicateurs importants relatifs à la population prise dans son ensemble, comme les taux de morbidité et de mortalité. Cette première partie du livre, qui englobe les chapitres 3 à 7, a traité des effets du réchauffement climatique et de certains phénomènes extrêmes (ouragans, sécheresses, inondations) qui y sont associés. Parmi les professions et les secteurs exposés aux variables climatiques, l'occurrence de températures supérieures à un seuil voisin de 32°C (90°F) affecte l'allocation du temps des travailleurs. Elle nuit à l'emploi, à la productivité et à la santé des travailleurs. La littérature passée en revue a toutefois produit plus de certitudes sur les effets à court terme de variations de la température atmosphérique que sur les conséquences d'un changement persistant et anticipé du climat se traduisant par un réchauffement. Or cette distinction importe puisque des phénomènes d'adaptation, qui sont fort limités à court terme, sont susceptibles d'être plus profonds en longue période en réaction au changement climatique. Cela dit, selon les indicateurs d'effets retenus, un doute plus ou moins grand subsiste toutefois quant à l'ampleur des facultés d'adaptation au réchauffement climatique. Différentes approches ont été mises en oeuvre pour quantifier les effets de la chaleur sur l'acquisition de capital humain (expression qui désigne un stock incarné de savoirs et de compétences utiles dans la vie professionnelle). Au-delà d'effets négatifs immédiats de fortes températures (que le conditionnement d'air peut contenir), un effet défavorable de températures élevées mesu-

rées sur une période longue n'émerge pas systématiquement mais a été mis en évidence par plusieurs auteurs. En raison des professions exercées ou de caractéristiques associées au revenu, les travailleurs moins qualifiés et certains groupes ethniques subissent davantage les effets négatifs évoqués ci-dessus. Plus généralement, une dégradation du climat se marquant par une hausse des températures accroît les inégalités de revenus au sein des pays. L'effet est plus net dans les pays pauvres et ceux caractérisés par une température élevée ou un secteur agricole plus important.

Les phénomènes climatiques extrêmes, qui se multiplient et s'intensifient, ont été abordés au chapitre 7. En ce qui concerne les ouragans (et des phénomènes analogues désignés autrement), il y a lieu de distinguer les effets sur des indicateurs mesurés au niveau des zones sinistrées et ceux mesurés au niveau des individus vivant dans ces zones lors du sinistre. Au niveau des zones sinistrées par les ouragans, l'emploi se contracte sauf dans certains secteurs concernés par la réparation des dommages. Une réallocation des emplois est à l'oeuvre. L'impact sur les populations survivantes est fort hétérogène selon le degré de dévastation. Pour celles qui ont la possibilité de migrer vers des zones géographiques plus prospères, l'impact négatif sur les revenus peut n'être que temporaire. Les sécheresses entraînent une chute des revenus dans le secteur agricole et ce, davantage là où les possibilités d'auto-assurance et les opportunités d'emploi non agricole (via ou non la migration) sont minces. Du point de vue de ces opportunités, les femmes apparaissent désavantagées par rapport aux hommes. Dans les économies avancées, les inondations ne nuisent pas significativement à l'emploi. L'inverse s'observe dans plusieurs pays émergents ou pauvres. Les hommes et les femmes n'apparaissent à nouveau pas égaux car les premiers ont davantage d'opportunités de diversification (travail non agricole, migration).

En bref, la première partie du livre manifeste que le réchauffement et les phénomènes extrêmes associés ont déjà souvent des effets significatifs mais d'ampleur hétérogène sur l'allocation du temps des travailleurs, l'emploi, les revenus, la formation du capital humain, la productivité et la santé des travailleurs. Ils accroissent aussi les inégalités de revenus. Laisser les tendances observées s'amplifier apparaît donc irresponsable en raison des répercussions pour les générations actuellement en vie et plus encore pour celles qui les suivront.

Même si cela demeure contesté par certains, la seconde partie du livre, couvrant les chapitres 8 à 16, a considéré comme acquise la thèse selon laquelle les activités humaines et, en particulier, l'hyper dépendance historique aux énergies fossiles carbonées sont un facteur clé responsable du changement climatique en cours. Les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ont en effet suffisamment étayé ce diagnostic. Le second objectif du livre a donc consisté à se pencher sur les effets des politiques visant à réduire les pressions qu'exerce l'activité économique sur notre environnement. Les manifestations de ces pressions sont hélas multiples. Le chapitre 8 a cherché à clarifier le sens accordé aux mots « transition environnementale ». Il a contrasté une pers-

pective globale et la perspective étroite de la réduction des émissions de GES (que l'on désigne encore par la décarbonation de nos économies). Comme le sort des travailleurs est au centre de ce livre de synthèse des connaissances disponibles, la perspective étroite s'est imposée dans la suite de l'ouvrage. Les études scientifiques présentant de l'information sur des indicateurs du marché du travail traitent en effet de la décarbonation des économies. La littérature sur les politiques s'attaquant à d'autres facettes du problème (politiques de sauvegarde de la biodiversité, par exemple) ne traite, à ma connaissance, pas (encore) des retombées sur les travailleurs.

Réduire notre dépendance aux énergies carbonées requiert notamment le renchérissement de celles-ci. Le chapitre 9 a dès lors résumé la littérature étudiant l'impact de variations des prix de l'énergie et le chapitre 10 a traité des effets de la taxation du carbone et des systèmes de plafonnement des émissions de GES et d'échanges de quotas. Le chapitre 9 s'est limité aux études exploitant des données micro-économiques ou sectorielles. Quelques ordres de grandeur ont émergé. A long terme et dans l'industrie, une augmentation de 10% du prix des énergies réduirait l'emploi d'au plus 1 à 2% au niveau microéconomique (des établissements ou des entreprises) et de 0 à 1% au niveau sectoriel. Selon plusieurs études, ces faibles effets négatifs se marqueraient davantage dans les entreprises intensives en énergie et dans les plus grandes entreprises. La conclusion répétée d'un effet négatif des prix de l'énergie sur l'emploi des travailleurs manuels moins qualifiés est une source de préoccupation dans la mesure où d'autres chocs économiques (automatisation, ouverture au commerce international, etc.) touchent déjà davantage ce groupe de travailleurs. Quelques analyses concluent que les hausses de prix des énergies ont un effet négatif sur les rémunérations.

A propos de la taxation du carbone et des systèmes d'échange de quotas d'émissions de GES, les évaluations économétriques les plus fiables exploitant des données d'entreprises estiment que leur impact sur l'emploi n'est quantitativement pas important et qu'il n'est, le plus souvent, pas statistiquement significatif. Les études scientifiques exploitant des données régionales ou macroéconomiques livrent, elles, un message plus dispersé. A côté d'études rassurantes quant aux effets de la tarification du carbone, un petit nombre d'études économétriques conclut en effet que le système européen d'échange de quotas aurait été responsable d'une baisse de l'emploi ou d'une hausse modeste du chômage. On ne peut concilier ces dernières conclusions et celles au niveau microéconomique qu'à condition que le système européen d'échange de quotas ait eu des effets induits sur les prix dont les conséquences ne sont pas captées par les analyses microéconomiques. Au sein des économies avancées, une taxation du carbone pèse relativement plus sur les dépenses des ménages au bas de la distribution des revenus. Ceci provient de la plus grande part de l'énergie dans leurs dépenses, de la faible réponse de leur consommation d'énergie aux prix mais aussi par la plus grande sensibilité de leurs revenus (les rémunérations occupent une place relativement plus importante comme source de revenu et les secteurs qui occupent ces travailleurs sont plus sensibles aux fluctuations économiques). Que ce soit pour des

raisons éthiques ou au nom de l'acceptabilité socio-politique de la tarification du carbone, son effet régressif peut cependant être corrigé en redistribuant une partie ou la totalité des revenus fiscaux engendrés par la taxation du carbone ou par la vente des quotas d'émissions. Il y a en principe moyen d'organiser cette redistribution de telle sorte que la pauvreté et/ou les inégalités *présentes* diminuent. Un transfert égal par habitant des recettes de la tarification du carbone est un pas dans la bonne direction mais cette forme de redistribution ne peut pas prendre en compte l'hétérogénéité des conditions d'existence (isolement géographique, etc.) qui affectent la situation financière des personnes. Par ailleurs, en plus des effets redistributifs en termes de revenus, divers auteurs soulignent l'importance du processus par lequel ces effets sont atteints. Ils recommandent d'impliquer toutes les parties concernées dans le processus de conception de la taxe et des mécanismes de redistribution des recettes générées.

Les évaluations économétriques des effets de la tarification du carbone ont porté sur des périodes où le niveau de la taxe (du prix du) carbone était relativement bas. Extrapoler leurs conclusions à d'autres contextes présente donc un risque.

Le chapitre 11 s'est tourné vers un autre type d'outil d'analyse : les modèles macroéconomiques distinguant le plus souvent plusieurs secteurs dont ceux de l'énergie. Il s'agit de représentations mathématiques des économies qui dépendent d'hypothèses sur le comportement des acteurs économiques et sur le fonctionnement des marchés. Ces modèles font apparaître un ensemble de paramètres. La valeur attribuée à ceux-ci s'appuie, d'une manière ou d'une autre, sur de l'information passée. Ces modèles ont pour vocation de simuler, sur des périodes plus ou moins longues, l'ajustement de l'économie dans un scénario de référence d'une part et sous l'effet de variantes d'autre part (par exemple, l'adoption ou la réforme de politiques publiques).

A côté de mesures diverses (subventions ciblées, investissements publics, etc.), la taxation du carbone est systématiquement une composante des paquets de réformes étudiés au chapitre 11. Le niveau du prix du carbone y croît au fil du temps et dépasse de beaucoup les valeurs historiques exploitées dans les études mentionnées au chapitre 10. La diversité des modèles macroéconomiques et celle des réformes envisagées rend la comparaison des résultats délicate. A de rares exceptions près, ces études s'accordent sur quelques conclusions qualitatives : la décarbonation des économies impacte peu la croissance économique et le niveau agrégé de l'emploi mais elle entraîne une réallocation sectorielle de l'emploi. Les résultats de simulations de modèles mathématiques abordés au chapitre 15 rejoignent ces propriétés qualitatives. Il y a en revanche une absence de consensus quant à l'impact de ces réformes sur la composition de l'emploi ventilé par niveau de qualification. Selon les scénarios précis et les modèles, les travailleurs moins qualifiés sont les bénéficiaires ou les perdants des mesures de lutte contre le réchauffement climatique. Enfin, selon la plupart des modèles macroéconomiques, les scénarios de décarbonation augmentent les inégalités de revenus. On retrouve cependant la conclusion que cette tendance peut être corrigée par l'utilisation des recettes fiscales perçues grâce aux réformes simulées.

Au chapitre 12, il est apparu utile de prendre du recul par rapport à ces modélisations macroéconomiques. Parmi les doutes émis à leur propos figurent leur manière de prendre en compte l'incertitude, leur fréquent optimisme à propos des possibilités de substitution entre les facteurs de production, leurs hypothèses quant à la mobilité sectorielle des travailleurs, et leur manque d'intégration convaincante de l'économie dans son environnement naturel global.

Il est ensuite apparu utile de quitter la perspective macroéconomique. Une littérature assez abondante a tenté de définir les notions d'emplois « verts » (associés d'une manière ou d'une autre à la préservation de l'environnement) et d'emplois « bruns » (associés aux énergies fossiles et, plus généralement, aux émissions de GES). Cette littérature, abordée au chapitre 13, a aussi quantifié l'importance actuelle de ces deux types d'emplois. Ces travaux sont descriptifs au sens où ils ne cherchent pas à établir les facteurs qui stimulent ou freinent le développement de ces deux catégories d'emplois. La littérature relative aux emplois occupés est la plus ancienne et la plus abondante. De fortes divergences de définition et de mesure marquent hélas cette littérature. Lorsque son point de départ sont les tâches exécutées et que la part des tâches vertes sert de facteur de pondération des emplois, cette littérature conclut à une part des emplois verts proche de 2 à 3% dans les économies avancées. Elle augmente au mieux lentement au fil du temps. Quant aux emplois bruns, leur part est fort hétérogène d'une définition et d'un espace géographique à l'autre (avec des concentrations parfois importantes dans des sous-régions). Cette part décroît lentement. Les femmes sont sous-représentées tant dans les professions vertes que dans les brunes.

Une littérature plus récente s'intéresse aux emplois vacants présents sur des plateformes informatiques. Pour identifier les emplois vacants « bas carbone » et ceux « intensifs en carbone », elle développe des techniques complexes exploitant l'information collectée par ces plateformes. Un avantage de cette littérature est de permettre de distinguer un emploi vacant bas carbone d'un autre qui ne l'est pas au sein de la même profession. Aux États-Unis, la part des premiers est proche d'1% sans tendance claire durant les années 2010. Au Royaume-Uni, cette part avoisine 1,5% à la même époque.

En Europe, les exigences des emplois verts en termes de qualification varient selon qu'on adopte une approche basée sur une nomenclature nord-américaine (tirée de la source O*NET) ou une approche basée sur une nomenclature européenne (tirée de la source ESCO). Sur base de la première source, le verdissement des économies avancées s'accompagne d'une élévation systématique des exigences de formation. Selon la seconde, le message est plus nuancé du fait notamment d'une prise en compte très différente du secteur de l'agriculture. Néanmoins, que l'on considère les emplois occupés ou les emplois vacants, le message dominant des études internationales est que le passage vers une économie bas carbone requiert davantage de compétences scientifiques et un portefeuille de compétences plus vaste. D'autres transitions économiques, que ce livre n'a pas abordé, comme l'intégration des technologies numériques dans quasi tout l'éventail des professions, renforcent ce message dominant.

Le chapitre 14 s'est intéressé à l'économie circulaire. L'organisation économique historique dominante, dite linéaire, élimine beaucoup de ressources naturelles une fois les biens consommés, défectueux ou démodés. Comme l'extraction, l'acheminement et la transformation de ces ressources émet des GES, davantage de réparation, de réaffectation, de recyclage contribuerait à la réduction de ces émissions. En termes généraux, l'économie circulaire vise à limiter les besoins en ressources naturelles et à réduire la quantité de déchets. Il n'y a cependant pas de définition plus précise communément admise. En outre, quelle que soit celle-ci, l'appareil statistique disponible n'a pas été conçu pour permettre une comptabilisation aisée des emplois de l'économie circulaire. Compte tenu de ces limitations, il semble qu'entre 2014 et 2023 la part de l'emploi circulaire stagne autour de 2% au sein de l'Union européenne. Le passage d'un modèle économique linéaire à un autre circulaire, soutenu notamment par des accises et des subventions au recyclage, créerait globalement peu d'emplois mais engendrerait une réallocation sectorielle de l'emploi. Celle-ci s'opérerait entre un nombre limité de secteurs en décroissance (peu intensifs en main d'œuvre) et un nombre lui aussi limité de secteurs en croissance. Il y a actuellement un manque de connaissances sur les effets d'une transition vers l'économie circulaire sur la distribution des métiers et les besoins en compétences.

A côté d'un effet du changement climatique sur les migrations interrégionales et, dans une moindre mesure, internationales, plusieurs chapitres ont mis en évidence un constat commun : le changement climatique tout comme les politiques de décarbonation induisent une réallocation des emplois au sein des pays. Le chapitre 15 s'est donc penché sur ce constat. Les modèles mathématiques de l'économie optent fréquemment pour une des deux hypothèses suivantes : soit une incapacité des travailleurs à changer de secteur, soit – et c'est plus souvent le cas – une mobilité parfaite. Le chapitre 15 a entrepris de confronter ce choix d'hypothèse à des analyses basées sur des faits observés. Il s'avère que les pertes de rémunérations subies par les travailleurs licenciés de secteurs fortement émetteurs de GES sont encore plus importantes et persistantes que celles subies par les travailleurs licenciés d'autres secteurs. Quelques études ont mis en évidence que la mobilité sectorielle des travailleurs licenciés atténue ces effets négatifs mais cette capacité est inégalement répartie. Les travailleurs moins qualifiés, plus âgés et bénéficiant de salaires avantageux dans les emplois bruns connaissent des trajectoires plus compliquées suite à un licenciement. Dans la mesure où les activités en déclin sont concentrées sur le plan géographique, les sous-régions concernées sont aussi malmenées (appauvrissement, chômage accru, etc.). Ces résultats apparaissent incompatibles avec l'hypothèse relativement fréquente de mobilité parfaite entre secteurs (ou entre professions). Ils confortent en revanche l'hypothèse que cette mobilité est fort coûteuse pour bien des travailleurs. Que l'emploi perdu soit brun ou neutre (c'est à dire ni brun ni vert), les études qui se penchent plus spécifiquement sur la mobilité vers les emplois verts concluent à des transitions rares. Le chapitre 15 s'est ensuite interrogé sur les freins à la mobilité professionnelle vers les emplois verts. Trois facteurs explicatifs ont été étudiés : les rémunérations, un mismatch (c'est à dire une inadéquation)

géographique et un mismatch de qualifications. Il y a longtemps eu un consensus sur le fait que les conditions de rémunération ne sont pas un obstacle à la mobilité vers les emplois verts. Des travaux récents exploitant des emplois vacants concluent toutefois à une baisse de la prime salariale des emplois verts durant les années 2010. Par ailleurs, les études qui exploitent des emplois vacants dans tous les secteurs de l'économie concluent que la localisation géographique des emplois vacants verts et celle des emplois bruns ne coïncident guère. Or, il est avéré que les travailleurs manuels ont une mobilité géographique plus limitée que les travailleurs intellectuels. Il n'y a pas de consensus quant à l'intensité du décalage entre les qualifications requises dans les emplois verts et celles dont disposent les travailleurs des autres emplois. Il semble toutefois acquis que le décalage est moindre pour les travailleurs des emplois bruns que pour ceux travaillant dans emplois neutres, sauf, probablement, dans les secteurs de l'extraction et de la construction. De manière générale, l'acuité du décalage de qualifications émerge davantage dans les études plus récentes.

Du chapitre 15 émerge donc le constat que la réallocation des travailleurs est la préoccupation majeure suscitée par les politiques de lutte contre le réchauffement climatique. En principe, la réponse est double. Pour les travailleurs dont la mobilité professionnelle, sectorielle ou géographique est extrêmement limitée, il y a lieu de mener des politiques régionales de soutien au développement d'emplois accessibles en termes de qualifications et de localisation géographique. En corollaire, il y a lieu de soutenir les sous-régions où se concentre le déclin de l'emploi. Pour les autres travailleurs, il importe de soutenir la transition, qu'elle soit professionnelle, sectorielle ou géographique. Selon le cas, il s'agira de leur donner accès à des formations appropriées et/ou à un soutien financer le temps d'opérer cette transition. Du principe à une mise en oeuvre efficace, il reste toutefois un long chemin à parcourir. L'histoire et l'analyse des trajectoires de travailleurs touchés par des licenciements de masse ont en effet montré que l'accompagnement des populations et des sous-régions soumises à un déclin de l'emploi n'a pas toujours été à la hauteur des attentes.

Le chapitre 16 a conclu que la disponibilité en main d'oeuvre freine actuellement le processus de décarbonation. Ce diagnostic émerge dans un contexte marqué par une réduction du taux de chômage durant les premières années après la pandémie de la Covid-19 et par d'autres tendances de fond touchant le marché du travail (vitesse du changement technologique, vieillissement de la population active dans de nombreuses économies, etc.). La perception générale est que la formation des travailleurs est un enjeu majeur face à ces mutations. Il importe évidemment aussi que les entreprises utilisent efficacement les compétences des travailleurs, qu'un nombre suffisant de personnes désirent participer au marché du travail et qu'elles soient attirées par la qualité des emplois offerts par la décarbonation.

Sur tous ces thèmes, les résumés au sein des chapitres du livre apportent bien évidemment davantage de nuances.

Bibliographie

Alberto Abadie : Semiparametric difference-in-differences estimators. Review of Economic Studies, 72:1–19, 2005.

Hala Abou-Ali, Ronia Hawash, Rahma Ali, Yasmine Abdelfattah et Megahed Hassan : Is it getting too hot to work ? Investigating the impact of climate change on labour supply in the MENA region. Applied Economics, 55(25):2847–2862, 2023.

Daron Acemoglu, Philippe Aghion, Leonardo Bursztyn et David Hemous : The environment and directed technical change. American Economic Journal, 102(1):131–166, 2012.

Daron Acemoglu, Ufuk Akcigit, Douglas Hanley et William Kerr : Transition to clean technology. Journal of Polical Economy, 124(1):52–104, 2016.

Daron Acemoglu et David Autor : Skills, tasks and technologies : Implications for employment and earnings. In Orley Ashenfelter et David Card, éditeurs : Handbook of Labor Economics, volume 4B, chapitre 12. North-Holland, 2011.

Viral Acharya, Abhishek Bhardwaj et Tuomas Tomunen : Do firms mitigate climate impact on employment ? Evidence from us heat shocks. NBER Working Paper 31967, National Bureau of Economic Research, December 2024.

Jawad Addoum, David Ng et Ariel Ortiz-Bobea : Temperature shocks and establishment sales. The Review of Financial Studies, 33(3):1331–1366, 2020.

ADEME : Transition(s) 2050 : Choisir maintenant, agir pour le climat. Rapport. Agence de la Transition écologique, République française, Novembre 2021.

ADEME : Transition(s) 2050 : Choisir maintenant, agir pour le climat. Feuilleton Les effets macroéconomiques. Agence de la Transition écologique, République française, Mars 2022.

ADEME, F. Vicard, I. Care & Consult, C. Leblanc, OFCE et A. Saussay : Modélisation macroéconomique appliquée à l'économie circulaire : Etat de l'art et préconisations de développement. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2018.

Andrew Adewale Alola, Seyi Saint Akadiri et Ojonugwa Usman : Domestic material consumption and greenhouse gas emissions in the EU-28 countries : Implications for environmental sustainability targets. Sustainable Development, 29(2):388–397, 2021.

Shisham Adhikari : Resolving coordination frictions in green labor transitions : Minimizing unemployment, costs, and welfare distortions. MPRA Paper 123479, Munich Personal RePEc Archive, Munich, January 2025.

Achyuta Adhvaryu, Namrata Kala et Anant Nyshadham : The light and the heat : Productivity co-benefits of energy-saving technology. The Review of Economics and Statistics, 102(4):779–792, 2020.

Farzana Afridi, Kanika Mahajan et Nikita Sangwan : The gendered effects of droughts : Production shocks and labor response in agriculture. Labour Economics, 78(102227):1–16, 2022.

Philippe Aghion, Timo Boppart, Michael Peters, Matthew Schwartzman et Fabrizio Zilibotti : A theory of endogenous degrowth and environmental sustainability. NBER Working Paper 33634, National Bureau of Economic Research, June 2025.

Mika Akesaka et Hitoshi Shigeoka : Hotter days, wider gap : The distributional impact of heat on student achievement. Discussion Paper 18165, Institute for the Study of Labor (IZA), September 2025.

Naomi-Rose Alexander, Longji Li, Jorge Mondragon, Sahar Priano et Marina Tavares : The green future : Labor market implications for men and women. Working Paper WP/24/156, International Monetary Fund, July 2024.

Sabina Alkire, Ruth Meinzen-Dick, Amber Peterman, Agnes Quisumbing, Greg Seymour et Ana Vaz : The women's empowerment in agriculture index. World Development, 52:71–91, 2013.

Stefan Ambec, Mark Coheny, Stewart Elgiez et Paul Lanoie : The Porter hypothesis at 20 : Can environmental regulation enhance innovation and competitiveness ? Review of Environmental Economics and Policy, 7(1):2–22, 2013.

Francisco André et Alejandro Cardeneteand Esther Velázquez : Performing an environmental tax reform in a regional economy. a computable general equilibrium approach. The Annals of Regional Science, 39:375–392, 2005.

Pierre André : Carbon dividends : An integrationist approach. Journal of Applied Philosophy, Forthcoming, 2026.

M. Andrews, T. Schank et R. Simmons : Does worksharing work ? Some empirical evidence from the IAB-Establishment panel. Scottish Journal of Political Economy, 52(2):141–176, 2005.

George-Marios Angeletos, Joao Guerreiro et Dalton Rongxuan Zhang : From RANK to HANK, without FIRE. Working Paper 34596, National Bureau of Economic Research, December 2025.

Manfred Antoni, Markus Janser et Florian Lehmer : The hidden winners of renewable energy promotion : Insights into sector-specific wage differentials. Energy Policy, 86:595–613, 2015.

Arthur Apostel et Mikkel Barslund : Measuring and characterising green jobs : A literature review. Energy Research & Social Science, 111(103477):1–21, 2024.

Fernando Aragón, Juan Pablo Rud et Gerhard Toews : Resource shocks, employment, and gender : Evidence from the collapse of the UK coal industry. Labour Economics, pages 54–67, 2018.

Manuel Arellano et Stephen Bond : Some tests of specification for panel data : Monte carlo evidence and an application to employment equations. The Review of Economic Studies, 58:277—297, 1991.

Kenneth Arrow, Partha Dasgupta, Lawrence Goulder, Kevin Mumford et Kirsten Oleson : Sustainability and the measurement of wealth. Environment and Development Economics, 17:317–335, 2012.

Kenneth Arrow, Partha Dasgupta, Lawrence Goulder, Kevin Mumford et Kirsten Oleson : Sustainability and the measurement of wealth : Further reflections. Environment and Development Economics, 18:504–516, 2013.

Guido Ascari, Andrea Colciago, Timo Haber et Stefan Wöhrmüller : Inequality along the european green transition. Working Paper 830, De Nederlandsche Bank, Amsterdam, March 2025.

T. Asikainen, A. Bitat, E. Bol, V. Czako, A. Marmier, S. Muench, I. Murauskaite-Bull, F. Scapolo et E. Stoermer : The future of jobs is green. Rapport technique EUR 30867, Publications Office of the European Union, 2021.

Andrew Atkeson et Patrick Kehoey : Models of energy use : Putty-putty versus putty-clay. The American Economic Review, 89(4):1028–1043, 1999.

Diane Aubert et Mireille Chiroleu-Assouline : Environmental tax reform and income distribution with imperfect heterogeneous labour markets. European Economic Review, 116:60–82, 2019.

Maximilian Auffhammer, V. Ramanathan et Jeffrey Vincent : Climate change, the monsoon, and rice yield in india. Climatic Change, 111:411–424, 2012.

David Autor, David Dorn et Gordon Hanson : The China shock : Learning from labor-market adjustment to large changes in trade. Annual Review of Economics, 8:205–240, 2016.

Deven Azevedo, Hendrik Wolff et Akio Yamazaki : Do carbon taxes kill jobs ? Firm-level evidence from British Columbia. Climate Change Economics, 14(2):2350010, 2023.

Mustafa Babiker et Richard Eckaus : Unemployment effects of climate policy. Environmental Science and Policy, 10(7-8):600–609, 2007.

Ronald Bachmann, Markus Janser, Florian Lehmer et Christina Vonnahme : Disentangling the greening of the labour market : The role of changing occupations and worker flows. IAB Discussion Paper 12-2024, IAB, Forschungsinstitut der Bundesagentur für Arbeit, Germany, 2024.

Javier Baez, German Caruso, Valerie Mueller et Chiyu Niu : Droughts augment youth migration in Northern Latin America and the Caribbean. Climatic Change, 140:423–435, 2017a.

Javier Baez, German Caruso, Valerie Mueller et Chiyu Niu : Heat exposure and youth migration in Central America and the Caribbean. American Economic Review : Papers & Proceedings, 107 (5):446–450, 2017b.

Sadhika Bagga, Lukas Friedrich Mann, Ayşegül Şahin et Giovanni Violante : Job amenity shocks and labor reallocation. NBER Working Paper 33787, National Bureau of Economic Research, May 2025.

Andrew Baker, Brantly Callaway, Scott Cunningham, Andrew Goodman-Bacon et Pedro Sant'Anna : Difference-in-differences designs : A practitioner's guide. Journal of Economic Literature, Forthcoming, 2026.

Edward Balistreri : Operationalizing equilibrium unemployment : A general equilibrium external economies approach. Journal of Economic Dynamics and Control, 26:347–374, 2002.

Rosario Maria Ballatore, Alessandro Palma et Daniela Vuri : Degrees of deception : How score manipulation mitigates temperature's impact on student performance. Discussion paper 17643, Institute for the Study of Labor (IZA), Bonn, January 2015.

Jan Baran, Aleksander Szpor et Jan Witajewski-Baltvilks : Low-carbon transition in a coal-producing country : A labour market perspective. Energy Policy, 147(111878):1–11, 2020.

Alessandro Barattieri, Patrice Borda, Alberto Brugnoli, Martino Pelli et Jeanne Tschopp : The short-run dynamic employment effects of natural disasters : New insights from Puerto Rico. Ecological Economics, 134(103529), March 2023.

Edward Barbier : An economic perspective on planetary boundaries. Annual Review of Resource Economics, 17:189–207, 2025.

Lint Barrage : Climate change impacts on public finances around the world. Annual Review of Resource Economics, 17:281–300, 2025.

Lint Barrage et Solomon Hsiang, éditeurs. Handbook of the Economics of Climate Change, volume 1. Elsevier, December 2024.

Lint Barrage et Solomon Hsiang, éditeurs. Handbook of the Economics of Climate Change, volume 2. Elsevier, 2026.

Lint Barrage et Willam Nordhaus : Policies, projections, and the social cost of carbon : Results from the Dice-2023 model. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121(13 e2312030121):1–8, 2024.

Cesar Barreto, Robert Grundke et Zeev Krill : The cost of job loss in carbon-intensive sectors : Evidence from Germany. Working Paper 1774, OECD, Novembre 2023.

Geoffrey Barrows, Raphael Calel, Martin Jégard et Hélène Ollivier : Estimating the effects of regulation when treated and control firms compete : A new method with application to the EU ETS. CESifo Working Paper 10438, Center for Economic Studies and the ifo Institute, Munich, May 2023.

Timothy Bartik : Who benefifits from state and local economic development policies ? Rapport technique, W.E. Upjohn Institute for Employment Research, Kalamazoo, MI, 1991.

Timothy Bartik : Using place-based jobs policies to help distressed communities. Journal of Economic Perspectives, 34(3):99–127, 2020.

Timothy Bartik : Long-run effects on county employment rates of demand shocks to county and commuting zone employment. Regional Science and Urban Economics, 105(103988):1–11, 2024.

Bernardo Bastien-Olvera et Frances Moore : Use and non-use value of nature and the social cost of carbon. Nature Sustainability, 4:101–108, 2021.

Bernardo Bastien-Olvera et Frances Moore : Climate impacts on natural capital : Consequences for the social cost of carbon. Annual Review of Resource Economics, 14:515–532, 2022.

Christiane Baumeister et James Hamilton : Structural interpretation of vector autoregressions with incomplete identification : Revisiting the role of oil supply and demand shocks. American Economic Review, 109(5):1873–1910, 2019.

Patrick Baylis : Temperature and temperament : Evidence from Twitter. Journal of Public Economics, 184(104161):1–15, 2020.

Patrick Baylis, Prashant Bharadwaj, Jamie Mullins et Nick Obradovich : Climate and migration in the United States. Journal of Public Economics, 249(105446):1–9, 2025.

Jonathon Becker, Morgan Browning Maxwell Brown b, Yongxia Cai, Daden Goldfinger, James McFarland, Sergey Paltsev, Shane Weisberg et Mei Yuan : US economy-wide decarbonization : Sectoral and distributional impacts. Energy and Climate Change, 6(100181):1–14, 2025.

A. Patrick Behrer et R. Jisung Park : Will we adapt ? Temperature, labor and adaptation to climate change. Harvard Kennedy School Working Paper, November 2017.

Michel Beine et Lionel Jeusette : A meta-analysis of the literature on climate change and migration. Journal of Demographic Economics, 87:293–344, 2021.

Ariel Belasen et Solomon Polachek : How hurricanes affect wages and employment in local labor markets. American Economic Review, 98(2):49–53, 2008.

Ariel Belasen et Solomon Polachek : How disasters affect local labor markets : The effects of hurricanes in Florida. The Journal of Human Resources, 44(1):251–276, 2009.

Cristina Bellés-Obrero, Giulia Montresor et Catia Nicodemo : When policy meets weather : Extreme temperatures and workplace safety. BSE Working paper 1519, Barcelona School of Economics, October 2025.

Nicola Benatti, Martin Groiss, Petra Kelly et Paloma López-García : Environmental regulation and productivity growth in the Euro area : Testing the Porter hypothesis. ECB Working Paper 2820, European Central Bank, May 2023.

Nicola Benatti, Martin Groiss, Petra Kelly et Paloma López-García : The impact of environmental regulation on clean innovation : Are there crowding out effects ? ECB Working Paper 2946, European Central Bank, May 2024.

Melinda Benson et Robin Craig : The end of sustainability. Society and Natural Resources, 27:777–782, 2014.

Antonio Bento, Noah Miller, Mehreen Mookerjee et Edson Severnini : A unifying approach to measuring climate change impacts and adaptation. Journal of Environmental Economics and Management, 121(102843):1–20, 2023.

Katharina Bergant, Rui Mano et Ippei Shibata : From polluting to green jobs : A seamless transition in the U.S. Working Paper WP/22/129, International Monetary Fund, July 2022.

L. Berger, Th. Bréchet, J. Pestiaux et V. van Steenberghe : Case-study - the transition of belgium towards a low carbon society : A macroeconomic analysis fed by a participative approach. Energy Strategy Reviews, 29(100463):1–4, 2020.

Loïc Berger, Johannes Emmerling et Massimo Tavoni : Managing catastrophic climate risks under model uncertainty aversion. Management Science, 63(3):749–765, 2017.

Peter Berkowitz, Michael Storper et Max Herbertson : Place-based policies of the European Union : Contrasts and similarities to the US experience. NBER Working Paper 33513, National Bureau of Economic Research, February 2025.

Eli Berman et Linda Bui : Environmental regulation and labor demand : Evidence from the South Coast Air Basin. Journal of Public Economics, 79(2):265–295, 2001.

Audrey Berry : The distributional effects of a carbon tax and its impact on fuel poverty : A microsimulation study in the French context. Energy Policy, 124:81–94, 2019.

Antoine Bertheau, Edoardo Maria Acabbi, Cristina Barcelo, Andreas Gulyas, Stefano Lombardi et Raffaele Saggio : The unequal consequences of job loss across countries. American Economic Review : Insights, 5(3):393–408, 2023.

Saki Bigio, Diego Känzig, Pablo Sánchez et Conor Walsh : Carbon pricing and inequality : A normative perspective. NBER Working Paper 34125, National Bureau of Economic Research, August 2025.

Gert Bijnens, éditeur. Productivity in the Face of Climate Change. Numéro 1 in NBB Economic Review. National Bank of Belgium, 2024.

Gert Bijnens, John Hutchinson, Jozef Konings et Arthur Saint Guilhem : The interplay between green policy, electricity prices, financial constraints and jobs : Firm-level evidence. NBB Working Paper 399, National Bank of Belgium, April 2021.

Gert Bijnens, John Hutchinson et Arthur Saint Guilhem : Navigating the carbon price shock : Electricity costs and employmentreallocation in Europe. Utilities Policy, 99(102144):1–16, 2026.

Gert Bijnens, Jozef Konings et Stijn Vanormelingen : The impact of electricity prices on European manufacturing jobs. Applied Economics, 54(1):38–56, 2022.

Adrien Bilal et Diego Känzig : The macroeconomic impact of climate change : Global vs. local temperature. NBER Working Paper 32450, National Bureau of Economic Research, November 2024.

Adrien Bilal et Diego Känzig : Does unilateral decarbonization pay for itself ? NBER Working Paper 33364, National Bureau of Economic Research, January 2025.

Adrien Bilal et Esteban Rossi-Hansberg : Anticipating climate change across the United States. https://sites.google.com/site/adrienbilal/, October 2025.

Adrien Bilal et James Stock : Macroeconomics and climate change. NBER Working Paper 33567, National Bureau of Economic Research, March 2025.

Olivier Blanchard, Christian Gollier et Jean Tirole : The portfolio of economic policies needed to fight climate change. Annual Review of Economics, 15:689–722, 2023.

Raimund Bleischwitz, Miying Yang, Beijia Huang, Xiaozhen XU, Jie Zhou, Will McDowall, Philip Andrews-Speed, Zhe Liu et Geng Yong : The circular economy in china : Achievements, challenges and potential implications for decarbonisation. Resources, Conservation and Recycling, 183(106350):1–11, 2022.

Joshua Blonz, Brigitte Roth Tran et Erin Troland : The canary in the coal decline : Appalachian household finance and the transition from fossil fuels. Journal of Financial Economics, 175 (104167):1–21, 2026.

John Bluedorn, Niels-Jakob Hansen, Diaa Noureldin, Ippei Shibata et Marina M. Tavares : Transitioning to a greener labor market : Cross-country evidence from microdata. Energy Economics, 126(106836):1–13, 2023.

Alina Bobasu, Michael Dobrew et Amalia Repele : Energy price shocks, monetary policy and inequality. European Economic Review, 175(104986):1–17, 2025.

Lukas Boer, Andrea Pescatori et Martin Stuermer : Energy transition metals : Bottleneck for net-zeo emissions ? Journal of the European Economic Association, 22(1):200–220, 2024.

Christian Bogmans, Andrea Pescatori et Ervin Prifti : The impact of climate policy on oil and gas investment : Evidence from firm-level data. European Economic Review, 165(104750):1–18, 2024.

Katharina Bohnenberger : Is it a green or brown job ? A taxonomy of sustainable employment. Ecological Economics, 200(107469):1–9, 2022.

Filippo Bontadini et Francesco Vona : Anatomy of green specialisation : Evidence from EU production data, 1995–2015. Environmental and Resource Economics, 85:707–740, 2023.

Francesca Borgonovi, Elisa Lanzi, Helke Seitz, Ruben Bibas, Jean Fouré, Hubert Plisiecki et Laura Atarody : The effects of the EU fit for 55 package on labour markets and the demand for skills. OECD Social, Employment and Migration Working Papers 297, OECD, July 2023.

Mario Bossler, Alexander Moog et Thorsten Schank : Labor demand responses to changing gas prices. The B.E. Journal of Economic Analysis & Policy, 23(4):1073–1080, 2023.

W. J. Wouter Botzen, Olivier Deschenes et Mark Sanders : The economic impacts of natural disasters : A review of models and empirical studies. Review of Environmental Economics and Policy, 13(2):167–341, 2019.

Leah Boustan, Matthew Kahn, Paul Rhode et Maria Lucia Yanguas : The effect of natural disasters on economic activity in us counties : A century of data. Journal of Urban Economics, 118(103257): 1–13, 2020.

Lans Bovenberg et Rudd de Mooij : Environmental levies and distortionary taxation. American Economic Review, 84(4):1085–1089, 1994.

Alex Bowen et Bob Hancké : The social dimensions of 'greening the economy'. https://ec.europa.eu/social/BlobServlet?docId=22185&langId=en, June 2019.

Alex Bowen, Karlygash Kuralbayevab et Eileen Tipoec : Characterising green employment : The impacts of 'greening' on workforce composition. Energy Economics, 72:263–275, 2018.

James Boyce : The Case for Carbon Dividends. The Case for Carbon Dividends, Medford, 2019.

Lucas Bretschger et Ara Jo : Complementarity between labor and energy : A firm-level analysis. Journal of Environmental Economics and Management, 124(102934):1–12, 2024.

Gro Harlem Brundtland : Our Common Future : Report of the World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, New York, 1987.

Irene Brunetti, Federico Fabio Frattini, Martino Kuntze, Andrea Ricci et Francesco Vona : Exploring skills in the green transition : New insights from Italian data world. INAPP Working Paper 134, Istituto nazionale per l'analisi delle politiche pubbliche, Roma, February 2025.

Tao Bu, Wenhao Du, Chengxiang Tang, Yahong Liu, Xinyuan Wang, Yueheng Wang et Daisheng Tang : Market-oriented environmental regulations, employment adjustment and transfer path : Quasi-experimental evidence from China's carbon emissions trading pilot. Journal of Cleaner Production, 369(133292):1–16, 2022.

Nina Budina, Lixue Chen et Laura Nowzohour : Why some don't belong : The distributional effects of natural disasters. Working Paper WP/23/2, International Monetary Fund, January 2023.

Mark Budolfson, Francis Dennig, Frank Errickson, Simon Feindt, Maddalena Ferranna, Marc Fleurbaey, David Klenert, Ulrike Kornek, Kevin Kuruc, Aurélie Méjean, Wei Peng, Noah Scovronick, Dean Spears, Fabian Wagner et Stéphane Zuber : Climate action with revenue recycling has benefits for poverty, inequality and well-being. Nature Climate Change, 11:1111–1116, 2021.

Tatyana Bulavskaya, Jinxue Hu, aSaeed Moghayer et Frédéric Reynès : EXIOMOD 2.0 : EXtended Input-Output MODel a full description and applications. Working Paper 2016-2, Netherlands Organisation for Applied Scientific Research TNO, The Hague, The Nederlands, 2016.

Matthias Burgert, Werner Roeger, Janos Varga, Jan in 't Veld et Lukas Vogel : A global economy version of QUEST : Simulation properties. Rapport technique European Economy - Discussion Papers 126, Directorate General Economic and Financial Affairs (DG ECFIN), European Commission., 2020.

Marshall Burke et Kyle Emerick : Adaptation to climate change : Evidence from US agriculture. American Economic Journal : Economic Policy, 8(3):106–140, 2016.

Marshall Burke, Felipe González, Patrick Baylis, Sam Heft-Neal, Ceren Baysan, Sanjay Basu et Solomon Hsiang : Higher temperatures increase suicide rates in the United States and Mexico. Nature Climate Change, 8(8):723–729, 2018.

Marshall Burke, Mustafa Zahid, Mariana Martins, Christopher Callahan, Richard Lee, Tumenkhusel Avirmed, Sam Heft-Neal, Mathew Kiang, Solomon Hsiang et David Lobell : Are we adapting to climate change ? NBER Working Paper 32985, National Bureau of Economic Research, September 2024.

Paul Burke, Rohan Best et Frank Jotzo : Closures of coal-fired power stations in Australia : Local unemployment effects. The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 63(1): 142–165, 2019.

Michał Burzyński, Christoph Deuster, Frédéric Docquier et Jaime de Melo : Climate change, inequality, and human migration. Journal of European Economic Association, 20(3):1145–1197, 2022.

Marika Cabral et Marcus Dillender : Air pollution, wildfire smoke, and worker health. NBER Working Paper 32232, National Bureau of Economic Research, March 2024.

Pierre Cahuc, Stéphane Carcillo et André Zylberberg : Labor economics. MIT Press, Cambridge, 2014.

Xiqian Cai, Yi Liu et Jin Wang : The impact of temperature on manufacturing worker productivity : Evidence from personnel data. Journal of Comparative Economics, 46:889–905, 2018.

Yongyang Cai, Timothy Lenton et Thomas Lontzek : Risk of multiple interacting tipping points should encourage rapid CO_2 emission reduction. Nature Climate Change, 6:520–525, 2016.

Yongyang Cai et Thomas Lontzek : The social cost of carbon with economic and climate risks. Journal of Polical Economy, 127(6):2684–2734, 2019.

Raphael Calel : Adopt or innovate : Understanding technological responses to cap-and-trade. American Economic Journal : Economic Policy, 12(3):170–201, 2020.

Raphael Calel et Antoine Dechezleprêtre : Environmental policy and directed technological change : Evidence from the European carbon market. The Review of Economics and Statistics, 98 (1):173–191, 2016.

Gaël Callonnec et Raphaël Cancé : Evaluation macroéconomique de la stratégie nationale bas carbone (snbc2) avec le modèle TreeME. Rapport technique, Ministère de la Transition Ecologique, Février 2022.

Gaël Callonnec, Hervé Gouëdard, Meriem Hamdi-Cherif, Gissela Landa, Paul Malliet, Frédéric Reynès et Aurélien Saussay : Macroeconomic effects of achieving carbon neutrality in france. Energy and Climate Change, 6(100174):1–9, 2025.

Gaël Callonnec, Gissela Landa, Paul Mallie, Frédéric Reynès et Yasser Yeddir-Tamsamani : A full description of the Three-ME model : Multi-sector macroeconomic model for the evaluation of environmental and energy policy. https://www.ofce.sciences-po.fr/pdf/documents/threeme/doc1.pdf, Mars 2013.

Cambridge Econometrics : E3ME model manual. www.e3me.com, December 2022.

Eugenia Canessa et Gianna Claudia Giannelli : Women's employment and natural shocks. Discussion Paper 14055, Institute for the Study of Labor (IZA), January 2021.

Alessandro Cantelmo, Giovanni Melina et Chris Papageorgiou : Macroeconomic outcomes in disaster-prone countries. Journal of Development Economics, 161(103037):1–23, 2023.

Bart Capéau, André Decoster, Nabil Sheikh Hassan, Jonas Vanderkelen, Toon Vanheukelom et Stijn Van Houtven : We zitten allemaal in dezelfde storm, maar niet in hetzelfde schuitje. Leuvense Economische Standpunten, 192:1–5, 2022.

Jared Carbone, Nicholas Rivers, Akio Yamazaki et Hidemichi Yonerawa : Comparing applied general equilibrium and econometric estimates of the effect of an environmental policy shock. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 7(4):687–719, 2020.

Tamma Carleton, Esther Duflo, Kelsey Jack et Guglielmo Zappalà : Adaptation to climate change. In Lint Barrage et Solomon Hsiang, éditeurs : Handbook of the Economics of Climate Change, volume 1, chapitre 4, pages 143–248. Elsevier, December 2024.

Mark Carney : Breaking the tragedy of the horizon – climate change and financial stability. https://www.bankofengland.co.uk/-/media/boe/files/speech/2015/breaking-the-tragedy-of-the-horizon-climate-change-and-financial-stability.pdf, September 2015.

Chantel Carr et Jesse Stein (Eds.) : Working Through Planetary Breakdown : Labour, Skill and the Changing Climate. Routledge, London, 2025.

Germán Caruso, Inés de Marco et Ilan Noy : Climate changes affect human capital. Economics of Disasters and Climate Change, 8:157–196, 2024.

Kenneth Castellanos et Garth Heutel : Unemployment, labor mobility, and climate policy. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 11(1):1–40, January 2024.

Orsetta Causa, Maxime Nguyen et Emilia Soldani : A new measurement approach for identifying high-polluting jobs across European countries. Economics Department Working Paper 1795, OECD, 2024a.

Orsetta Causa, Emilia Soldani, Maxime Nguyen et Tomomi Tanaka : Labour markets transitions in the greening economy : Structural drivers and the role of policies. Economics Department Working Paper 1803, OECD, 2024b.

Malik Çürük, Rik Rozendaal et Tobias Wendler : Gender differences in the employment effects of climate policy. Energy Economics, 145(108394):1–12, 2025.

Cedefop : Green skills and environmental awareness in vocational education and training. Synthesis report. Research paper no 24, Publications Office of the European Union, 2012.

Cedefop : The green employment and skills transformation : insights from a European Green Deal skills forecast scenario. Publications Office of the European Union, 2021.

Cedefop : Work-based learning and the green transition. Publications Office of the European Union, 2022.

Cedefop et Eurofound : Skills forecast : Trends and challenges to 2030. Publications Office of the European Union, Luxemburg, 2018.

Jean Château, Ruben Bibas et Elisa Lanzi : Impacts of green growth policies on labour markets and wage income distribution : A general equilibrium application to climate and energy policies. Environmental Working Paper 137, OECD, November 2018.

Jean Château, Rob Dellink et Elisa Lanzi : An overview of the OECD ENV-Linkages model : Version 3. Environmental Working Paper 65, OECD, June 2014.

Jean Château, Florence Jaumotte et Gregor Schwerhoff : Economic and environmental benefits from international cooperation on climate policies. Departmental papers Series DP/2022/007, International Monetary Fund, March 2022.

Jean Château et Eleonora Mavroeidi : The jobs potential of a transition towards a resource efficient and circular economy. Environmental Working Paper 167, OECD, August 2020.

Jean Château, Hugo Rojas-Romagosa, Sneha Thube et Dominique van der Mensbrugghe : IMF-ENV : Integrating climate, energy, and trade policies in a general equilibrium framework. IMF Working Paper WP/25/77, International Monetary Fund, April 2025.

Xiaoguang Chen et Lu Yang : Temperature and industrial output : Firm-level evidence from China. Journal of Environmental Economics and Management, 95:257))274, 2019.

Ying Chen : Environmental regulation, local labor market, and skill heterogeneity. Regional Science and Urban Economics, 101(103898):1–15, 2023.

Joyita Roy Chowdhury, Yashobanta Parida et Priti Agarwal : How flood affects rural employment in India : A gender analysis. International Journal of Disaster Risk Reduction, 73(102881):1–18, 2022.

Guillaume Clavères : The distribution of losses caused by the energy terms of trade shock. Trésor-Eco 318, Direction générale du Trésor, Ministère de l'Economie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et Numérique, Paris, Decembre 2022.

Ronald Coase : The problem of social cost. Journal of Law and Economics, 3(1):1–44, 1960.

Simona Cociuba et James MacGee : Sectoral reallocations with an aging population. European Economic Review, 181(105182):1–28, 2026.

Günter Coenen, Matija Lozej et Romanos Priftis : Macroeconomic effects of carbon transition policies : an assessment based on the ECB's new area-wide model with a disaggregated energy sector. European Economic Review, 167(104798):1–32, 2024.

Gail Cohen, Joao Tovar Jalles, Prakash Loungani et Ricardo Marto : The long-run decoupling of emissions and output : Evidence from the largest emitters. Energy Policy, 118:58–68, 2018.

Gail Cohen, Joao Tovar Jalles, Prakash Loungani et Pietro Pizzuto : Trends and cycles in CO_2 emissions and incomes : Cross-country evidence on decoupling. Journal of Macroeconomics, 71 (103397):1–16, 2022.

Jonathan Colmer : Temperature, labor reallocation, and industrial production : Evidence from India. American Economic Journal : Applied Economics, 14(4):101–124, 2021.

Jonathan Colmer, Ralf Martin et Mirabelle Muûls : Does pricing carbon mitigate climate change ? Firm-level evidence from the European Union Emissions Trading System. The Review of Economic Studies, 92:1625–1660, 2025.

Marie Connolly : Climate change and the allocation of time. IZA World of Labor, 417:1–10, 2018.

Davide Consoli, Giovanni Marin, Alberto Marzucchi et Francesco Vona : Do green jobs differ from non-green jobs in terms of skills and human capital ? Research Policy, 45:1046–1060, 2016.

Christine Corlet Walker, Angela Druckman et Tim Jackson : Welfare systems without economic growth : A review of the challenges and next steps for the field. Ecological Economics, 186 (107066):1–12, 2021.

Guido Matias Cortes et Giovanni Gallipoli : The costs of occupational mobility : An aggregate analysis. Journal of the European Economic Association, 16(2):275–315, 2018.

Sam Cosaert, Adrián Nieto Castro et Konstantinos Tatsiramos : Temperature and the timing of work. Discussion Paper 16480, Institute for the Study of Labor (IZA), IZA, Bonn, September 2023.

Michael Cox, Andreas Peichl, Nico Pestel et Sebastian Siegloch : Labor demand effects of rising electricity prices : Evidence for Germany. Energy Policy, 75:266–277, 2014.

Ayşegül Şahin, Joseph Song, Giorgio Topa et Giovanni Violante : Mismatch unemployment. American Economic Review, 104(11):3529–3564, 2014.

Jesus Crespo Cuaresma : Natural disasters and human capital accumulation. The World Bank Economic Review, 24(2):280–302, 2010.

Jingbo Cui, Junjie Zhang et Yang Zheng : Carbon pricing induces innovation : Evidence from China's regional carbon market pilots. AEA Papers and Proceedings, 108:453–457, 2018.

E. Mark Curtis et Iona Marinescu : Green energy jobs in the US : What are they, and where are they ? Environmental and Energy Policy and the Economy, 4:202–237, 2023.

E. Mark Curtis, Layla O'Kane et R. Jisung Park : Workers and the green-energy transition : Evidence from 300 million job transitions. Environmental and Energy Policy and the Economy, 5:127–161, 2024.

Yannis Dafermos, Andrew McConnel, Maria Nikolaidi, Servaas Storm et Boyan Yanovski : Macroeconomic modeling in the anthropocene : Why the E-DSGE framework is not fit for purpose and what to do about it. Working Paper 229, Institute for New Economic Thinking, October 2024.

Simone D'Alessandro, André Cieplinski, Tiziano Distefano et Kristofer Dittmer : Feasible alternatives to green growth. Nature Sustainability, 3(4):329))335, 2020.

Joséphine Dalimier, Kevin Maréchal et Nicolas Dendoncker : Transition and transformation : A cross-fertilizing approach to complement the study of systemic and sustainable changes (food system application). Environmental Innovation and Societal Transitions, 58(101059):1–19, 2026.

Herman Daly : Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. Ecological Economics, 22:261–266, 1997.

Partha Dasgupta : The Economics of Biodiversity : The Dasgupta Review. HM Treasury, London, 2021.

Shouro Dasgupta, Elizabeth Robinson, Soheil Shayegh, Francesco Bosello, R. Jisung Park et Simon Gosling : Heat stress and the labour force. Nature Reviews Earth and Environment, 5:859–872, 2024.

Antoine Dechezleprêtre, Adrien Fabre, Tobias Kruse, Bluebery Planterose, Ana Sanchez Chico et Stefanie Stantcheva : Fighting climate change : International attitudes toward climate policies. American Economic Review, 115(4):1258–1300, 2025.

Antoine Dechezleprêtre, Daniel Nachtigall et Frank Venmans : The joint impact of the European Union emissions trading system on carbon emissions and economic performance. Journal of Environmental Economics and Management, 118(102758):1–41, 2023.

Antoine Dechezleprêtre et Misato Sato : The impacts of environmental regulations on competitiveness. Review of Environmental Economics and Policy, 11(2):183–206, 2017.

Tatyana Deryugina et Solomon Hsiang : Does the environment still matter ? Daily temperature and income in the united states. NBER Discussion paper 20750, National Bureau of Economic Research, December 2014.

Tatyana Deryugina, Laura Kawano et Steven Levitt : The economic impact of hurricane Katrina on its victims : Evidence from individual tax returns. American Economic Journal : Applied Economics, 10(2):202–233, 2018.

Tatyana Deryugina, Frances Moore et Richard Tol : Environmental applications of the Coase theorem. Environmental Science and Policy, 120:81–88, 2021.

Olivier Deschenes : Climate policy and labor markets. In Don Fullerton et Catherine Wolfram, éditeurs : The Design and Implementation of U.S. Climate Policy, pages 37–49. University of Chicago Press, 2012.

Olivier Deschenes : Temperature, human health, and adaptation : A review of the empirical literature. Energy Economics, 46:606–619, 2014.

Olivier Deschenes : Environmental regulations and labor markets. IZA World of Labor, 22v2:1–12, 2018.

Olivier Deschenes : Temperature, productivity, and income. IZA World of Labor, 505:1–11, 2023.

Olivier Deschenes et Michael Greenstone : Climate change, mortality, and adaptation : Evidence from annual fluctuations in weather in the US. American Economic Journal : Applied Economics, 3(4):152–185, 2011.

Klaus Desmet, Robert Kopp, Dávid Krisztián Nagy Scott Kulp, Michael Oppenheimer, Esteban Rossi-Hansberg et Benjamin Strauss : Evaluating the economic cost of coastal flooding. American Economic Journal : Macroeconomics, 13:444–486, 2021.

Klaus Desmet et Esteban Rossi-Hansberg : Climate change economics over time and space. Annual Review of Economics, 16:271–304, 2024.

Erich Dierdorff, Jennifer Norton, Donald Drewes et Christina Kroustalis : Greening of the world of work : Implications for O*NET-SOC and new and emerging occupations. https://www.onetcenter.org/dl_files/Green.pdf, February 2009.

Erich Dierdorff, Jennifer Norton, Christina Gregory, David Rivkin et Phil Lewis : Greening of the world of work : Revisiting occupational consequences. https://www.onetcenter.org/dl_files/Green2.pdf, December 2011.

Simon Dietz : Introduction to integrated assessment modeling of climate change. In Lint Barrage et Solomon Hsiang, éditeurs : Handbook of the Economics of Climate Change, volume 1, chapitre 1, pages 1–51. Elsevier, December 2024.

Simon Dietz, James Rising, Thomas Stoerk et Gernot Wagner : Economic impacts of tipping points in the climate system. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(34 e2103081118):1–9, 2021a.

Simon Dietz et Nicholas Stern : Endogenous growth, convexity of damage and climate risk : How Nordhaus' framework supports deep cuts in carbon emissions. The Economic Journal, 125:574–620, 2015.

Simon Dietz, Frederick van der Ploeg, Armon Rezai et Frank Venmans : Are economists getting climate dynamics right and does it matter ? Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 8(5):895–921, 2021b.

Marcus Dillender : Climate change and occupational health. Journal of Human Resources, 56 (1):184–224, 2021.

Francesca Diluiso, Barbara Annicchiarico, Matthias Kalkuhl et Jan Minx : Climate actions and macro-financial stability : The role of central banks. Journal of Environmental Economics and Management, 110(102548):1–22, 2021.

Yazid Dissou, Lilia Karnizova et Qian Sun : Industry-level econometric estimates of energy-capital-labor substitution with a nested CES production function. Industry-level Econometric Estimates of Energy-Capital-Labor Substitution with a Nested CES Atlantic Economic Journal, 43:107–121, 2015.

Rafael Dix-Carneiro : Trade liberalization and labor market dynamics. Econometrica, 82(3):825–885, 2014.

Björn Döhring, Atanas Hristov, Anna Thum-Thysen et Cristiano Carvello : Reflections on the role of natural capital for economic activity. European Economy Discussion Papers 180, European Commission, February 2023.

Geoffroy Dolphin et Gianluigi Ferrucci : The EU's CBAM : Implications for member states and trading partners. Working paper WP/25/125, International Monetary Fund, June 2025.

Robin Döttling et Magdalena Rola-Janicka : Too levered for Pigou : Carbon pricing, financial constraints, and leverage regulation. Journal of Financial Economics, 172(104105):1–18, 2025.

Thomas Douenne : The vertical and horizontal distributive effects of energy taxes : A case study of a French policy. The Energy Journal, 41(3):231–253, 2020.

Thomas Douenne, Albert Hummel et Marcelo Pedroni : Optimal fiscal policy in a climate-economy model with heterogeneous households. Economic Journal, Forthcoming, 2026.

Mario Draghi : The future of European competitiveness – A competitiveness strategy for Europe. https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead_en, September 2024.

Katharina Drescher et Benedikt Janzen : When weather wounds workers : The impact of temperature on workplace accidents. Journal of Public Economics, 241(105258):1–17, 2025.

Eugenie Dugoua et Jacob Moscona : The economics of climate innovation : Technology, climate policy, and the clean energy transition. CESifo Working Paper 12267, Center for Economic Studies and the ifo Institute, Munich, November 2025.

Élise Dupont, Marc Germain et Hervé Jeanmart : Feasibility and economic impacts of the energy transition. Sustainability, 13(5345):1–34, 2021.

Damien Dussaux : The joint effects of energy prices and carbon taxes on environmental and economic performance : Evidence from the French manufacturing sector. OECD Environment Working Papers 154, OECD, Paris, 2020.

Maximilian Ehrlich et Henry Overman : Place-based policies and spatial disparities across European cities. Journal of Economic Perspective, 34(3):128–149, 2020.

James Elliott et Jeremy Pais : Rass, class and hurricane Katrina : Social differences in human response to disaster. Social Science Research, 35(2):295–321, 2006.

Kyle Emerick : Agricultural productivity and the sectoral reallocation of labor in rural India. Journal of Development Economics, 135:488–503, 2018.

Horst Entorf : Mismatch Explanations of European Unemployment. Springer, 1998.

Per Espen Stoknesa et Johan Rockström : Redefining green growth within planetary boundaries. Energy Research and Social Science, 44:41–49, 2018.

Eurofound : Energy scenario : Employment implications of the Paris climate agreement. Publications Office of the European Union, Luxemburg, 2019.

European Commission : Impact assessment accompanying the document : Stepping up Europe's 2030 climate ambition : Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. Commission Staff Working Document SWD(2020) 176 final, European Commission, Brussels, September 2020.

European Commission : Green skills and knowledge concepts : Labelling the ESCO classification. Technical report, European Commission, Employment, Social Affairs and Inclusion, January 2022a.

European Commission : Labour market and wage developments in Europe, annual review 2022. Publications Office of the European Union, Luxemburg, October 2022b.

European Commission : Employment and social developments in Europe 2023. Publications Office of the European Union, Luxemburg, July 2023.

European Commission : Climate action progress report 2025. European Union, October 2025a.

European Commission : Employment and social developments in Europe 2023. Publications Office of the European Union, Luxemburg, September 2025b.

European Commission, Cambridge Econometrics, Trinomics and ICF : Impacts of circular economy policies on the labour market. https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fc373862-704d-11e8-9483-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-72385040, May 2018.

European Environment Agency : European climate risk assessment. EEA Report 01/2024, European Environment Agency, Luxemburg, 2024a.

European Environment Agency : Trends and projections in europe. EEA Report 11/2024, European Environment Agency, Luxemburg, 2024b.

European Network of Public Employment Services : Greening of the labour market – impacts for the public employment services. Rapport technique, European Commission, Brussels, September 2021.

European Scientific Advisory Board on Climate Change : Towards EU climate neutrality. Progress, policy gaps and opportunities. https://climate-advisory-board.europa.eu/, January 2024.

Jean-François Fagnart et Marc Germain : Les limites environnementales á la croissance en macroéconomie. Reflets et Perspectives de la vie économique, LI(4):25–45, 2012.

Jean-François Fagnart, Marc Germain et Benjamin Peeters : Can the energy transition be smooth ? A general equilibrium approach to the EROEI. Sustainability, 12(3):1–29, 2020.

Jean-François Fagnart, Marc Germain et Bruno Van der Linden : Working time reduction and employment in a finite world. Scandinavian Journal of Economics, 125(1):170–207, 2023.

Andrew Fanning et Kate Raworth : Doughnut of social and planetary boundaries monitors a world out of balance. Nature, 646:47–56, 2025.

Simon Feindt, Ulrike Kornek, José Labeaga, Thomas Sterner et Hauke Ward : Understanding regressivity : Challenges and opportunities of european carbon pricing. Energy Economics, 103 (105550):1–21, 2021.

Moustafa Feriga, Nancy Lozano Gracia et Pieter Serneels : The impact of climate change on work : Lessons for developing countries. The World Bank Research Observer, 40(1):104–146, February 2025.

Luis Fernández Intriago : Carbon taxation, green jobs, and sectoral human capital. https://www.luisfernandezintriago.com/research, November 2021.

Alessandro Ferrari et Valerio Nispi Landi : Whatever it takes to save the planet ? Central banks and unconventional green policy. Macroeconomic Dynamics, 28:299–324, 2024.

Susana Ferreira : Extreme weather events and climate change : Economic impacts and adaptation policies. Annual Review of Resource Economics, 16:207–231, 2024.

Romain Fillon, Céline Guivarch et Nicolas Taconet : Optimal climate policy under tipping risk and temporal risk aversion. Journal of Environmental Economics and Management, 121 (102850):1–17, 2023.

Mattia Filomena et Matteo Picchio : Unsafe temperatures, unsafe jobs : The impact of weather conditions on work-related injuries. Journal of Economic Behavior and Organization, 224:851–875, 2024.

Alan Finkelstein Shapiro et Gilbert Metcalf : The macroeconomic effects of a carbon tax to meet the U.S. Paris agreement target : The role of firm creation and technology adoption. Journal of Public Economics, 218(104800):1–18, 2023.

Karen Fisher-Vanden et John Weyant : The evolution of integrated assessment : Developing the next generation of use-inspired integrated assessment tools. Annual Review of Resource Economics, 12:471–487, 2020.

Ram Fishman, Paul Carrillo et Jason Russ : Long-term impacts of exposure to high temperatures on human capital and economic productivity. Journal of Environmental Economics and Management, 93:221–238, 2019.

Marc Fleurbaey : On sustainability and social welfare. Journal of Environmental Economics and Management, 71:34–53, 2015.

Doris Folini, Aleksandra Friedl, Felix Kübler et Simon Scheidegger : The climate in climate economics. Review of Economic Studies, 92:299–338, 2025.

Jean-Marc Fournier, Tannous Kass-Hanna, Liam Masterson, Anne-Charlotte Paret et Sneha Thube : Cross-border impacts of climate policy packages in North America. Working Paper WP/24/68, International Monetary Fund, March 2024.

Panagiotis Fragkos, Kostas Fragkiadakis, Benjamin Sovacool, Leonidas Paroussos, Zoi Vrontisi et Ioannis Charalampidis : Equity implications of climate policy : Assessing the social and distributional impacts of emission reduction targets in the European Union. Energy, 237(121591): 1–14, 2021.

Gustav Fredriksson : Labor reallocation, green subsidies, and unemployment. https://www.gustav-fredriksson.com/research, January 2025.

Lea Fricke, Clemens Fuest et Dominik Sachs : Carbon emissions and redistribution : The design of carbon tax rebates. CESifo Working Papers 12085, Center for Economic Studies and the ifo Institute, Munich, August 2025.

Don Fullerton : The circular economy. CESifo Working Paper 11109, Center for Economic Studies and the ifo Institute, Munich, May 2024.

Don Fullerton, Callie Babbitt, Melissa Bilec, Shan He, Cindy Isenhour, Vikas Khanna, Eunsang Lee et Thomas Theis : Introducing the circular economy to economists. Annual Review of Resource Economics, 14:493–514, 2022.

Don Fullerton et Holly Monti : Can pollution tax rebates protect low-wage earners ? Journal of Environmental Economics and Management, 66:539–553, 2013.

Don Fullerton et Erich Muehlegger : Who bears the economic burdens of environmental regulations ? Review of Environmental Economics and Policy, 13(1):62—82, 2019.

Alessia Fulvimari, Umed Temursho, Aiste Vaitkeviciute et Matthias Weitzel : Economic and distributional effects of higher energy prices on households in the EU. European Commission, Brussels, May 2023.

Nicola Gagliardi, Elena Grinza et François Rycx : The productivity impact of global warming : Firm-level evidence for uppercaseEurope. Discussion Paper 17241, Institute of Labor Economics (IZA), August 2024.

Johannes Gallé, Rodrigo Oliveira, Daniel Overbeck, Nadine Riedel et Edson Severnini : Carbon taxation and firm behavior in emerging economies : Evidence fromSouth Africa. Discussion Paper 18212, Institute for the Study of Labor (IZA), October 2025.

Rafael Garaffa, Matthias Weitzel, Toon Vandyck, Kimon Keramidas, Paul Dowling, Florian Fosse, Stéphane Tchung-Ming, Ana Díaz Vázquez, Peter Russ, Burkhard Schade, Andreas Schmitz, Jacques Després, Antonio Soria Ramirez, Andrea Diaz Rincon, Luis Rey Los Santos et Krzysztof Wojtowicz : Stocktake of G20 countries' climate pledges reveals limited macroeconomic costs and employment shifts. One Earth, 6:1591–1604, 2023.

Pablo Garcia, Pascal Jacquinot, Črt Lenarčič, Kostas Mavromatis, Niki Papadopoulou et Edgar Silgado-Gómez : Green transition in the euro area : Domestic and global factors. European Economic Review, 182(105206):1–29, 2026.

Teevrat Garg, Maulik Jagnani et Vis Taraz : Temperature and human capital in india. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 7(6):1113–1150, 2020.

Cloé Garnache, Elisabeth Isaksen et Maria Nareklishvili : Labor market impacts of the green transition : Evidence from a contraction in the oil industry. CESifo Working Paper 12057, Center for Economic Studies and the ifo Institute, Munich, August 2025.

Christina Gathmann et Uta Schönberg : How general is human capital ? A task-based approach. Journal of Labor economics, 28:1–49, 2010.

Marc Germain : Optimal versus sustainable degrowth policies. Ecological Economics, 136:266–281, 2017.

Marc Germain : Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz : Back to a controversy. Ecological Economics, 160:168–182, 2019.

Stefano Giglio, Bryan Kelly et Johannes Stroebel : Climate finance. Annual Review of Financial Economics, 13:15–36, 2021.

Stefano Giglio, Theresa Kuchler, Johannes Stroebel et Olivier Wang : The economics of biodiversity loss. NBER Working Paper 32678, National Bureau of Economic Research, July 2024.

Stefano Giglio, Theresa Kuchler, Johannes Stroebel et Olivier Wang : Nature loss and climate change : The twin-crises multiplier. American Economic Association Papers and Proceedings, 115:409–414, 2025.

Pierre-Louis Girard, Claire Le Gall, William Meignan et Philippe Wen : Economic growth and decarbonisation. Trésor-Eco 315, Direction générale du Trésor, Paris, Octobre 2022.

Alexandre Godzinski : Le modèle Vulcain : une approche en équilibre général calculable de l'économie circulaire et de l'énergie. Etudes et Documents 147, Commissariat Général au Développement Durable, Mai 2016.

Paul Goldsmith-Pinkham, Isaac Sorkin et Henry Swift : Bartik instruments : What, when, and how. American Economic Review, 110(8):2586–2624, 2020.

Christian Gollier : Discounting. In Lint Barrage et Solomon Hsiang, éditeurs : Handbook of the Economics of Climate Change, volume 1, chapitre 3, pages 113–142. Elsevier, December 2024.

Mikhail Golosov, Johns Hassler, Per Krusell et Aleh Tsyvinski : Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium. Econometrica, 82(1):41–88, 2014.

Lawrence Goulder : Environmental taxation and the double dividend : A reader's guide. International Tax and Public Finance, 2:157–183, 1995.

Lawrence Goulder, Marc Hafstead et Roberton Williams III : General equilibrium impacts of a federal clean energy standard. American Economic Journal : Economic Policy, 8(2):186–218, 2016.

Lawrence Goulder, Xianling Long, Jieyi Lu et Richard Morgenstern : China's unconventional nationwide CO_2 emissions trading system : Cost-effectiveness and distributional impacts. Journal of Environmental Economics and Management, 111(102561):1–25, 2022.

Joshua Graff Zivin, Solomon Hsiang et Matthew Neidell : Temperature and human capital in the short- and the long-run. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 5(1):77–105, 2018.

Joshua Graff Zivin et Matthew Neidell : Temperature and the allocation of time : Implications for climate change. Journal of Labor Economics, 32(1):1–26, 2014.

Joshua Graff Zivin, Yingquan Song, Qu Tang et Peng Zhang : Temperature and high-stakes cognitive performance : Evidence from the national college entrance examination in China. Journal of Environmental Economics and Management, 104(102365), 2020.

Jonas Grafström et Siri Aasma : Breaking circular economy barriers. Journal of Cleaner Production, 292(126002):1–14, 2021.

Julia Granata et Josefina Posadas : Why look at tasks when designing skills policy for the green transition ? Policy Research Working Paper 10753, World Bank Group, April 2024.

Wayne Gray, Ron Shadbegian et Ann Wolverton : Environmental regulation and labor demand : What does the evidence tell us ? Annual Review of Resource Economics, 15:177–197, 2023.

John Grigsby et Nathan Zorzi : The labor market consequences of rapid sectoral shifts. NBER Working Paper 34922, National Bureau of Economic Research, March 2026.

Jeffrey Groen, Mark Kutzbach et Anne Polivka : Storms and jobs : The effect of hurricanes on individuals' employment and earnings over the long term. Journal of Labor Economics, 28 (3):653–685, 2020.

André Gröger et Yanos Zylberberg : Internal labor migration as a shock coping strategy : Evidence from a typhoon. American Economic Journal : Applied Economics, 8(2):123–153, April 2016.

Ben Groom, Moritz Drupp, Mark Freeman et Frikk Nesje : The future, now : A review of social discounting. Annual Review of Resource Economics, 14:467–491, 2022.

Ben Groom et Zachary Turk : Reflections on the Dasgupta review on the economics of biodiversity. Environmental and Resource Economics, 79:1–23, 2021.

Arti Grover et Matthew Kahn : Enhancing firm resilience to climate change : A review of impact, adaptation strategies and policy options. Journal of Economic Surveys, 40:675–693, 2025.

Helmut Haberl, Dominik Wiedenhofer, Doris Virág, Gerald Kalt, Barbara Plank, Paul Brockway, Tomer Fishman, Daniel Hausknost, Fridolin Krausmann, Bartholomäus Leon-Gruchalski, Andreas Mayer, Melanie Pichler, Anke Schaffartzik, Tânia Sousa, Jan Streeck et Felix Creutzig : A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II : Synthesizing the insights. Environmental Research Letters, 15(065003):1–42, 2020.

Drew Haerer et Lincoln Pratson : Employment trends in the U.S. electricity sector, 2008–2012. Energy Policy, 82:85–98, 2015.

Marc Hafstead et Roberton Williams III : Unemployment and environmental regulation in general equilibrium. Journal of Public Economics, 160:50–65, 2018.

Marc Hafstead et Roberton Williams III : Distributional effects of environmental policy across workers : A general-equilibrium analysis. Proceedings of the Annual Conference on Taxation of the National Tax Association, 112:1–35, 2019.

Marc Hafstead et Roberton Williams III : Jobs and environmental regulation. In Matthew Kotchen, James Stock et Catherine Wolfram, éditeurs : Environmental and Energy Policy and the Economy, volume 1, pages 192–240. National Bureau of Economic Research, 2020.

Marc Hafstead et Roberton Williams III : Modeling the labor implications of the energy transition. NBER working paper 34723, National Bureau of Economic Research, January 2026.

Marc Hafstead, Roberton Williams III et Yunguang Chen : Environmental policy, full-employment models, and employment : A critical analysis. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 9(2):199–234, 2022.

Stefanie Haller et Marie Hyland : Capital-energy substitution : Evidence from a panel of Irish manufacturing ,ÄÄfirms. Energy Economics, 34:501–510, 2014.

P.A. Hancock, Jennifer Ross et James Szalma : A meta-analysis of performance response under thermal stressors. Human Factors, 49(5):759–960, 2007.

Michael Handel : Labor shortages : What is the problem ? Intereconomics : Review of European Economic Policy., 59(3):136–142, 2024.

Julien Hanoteau et David Talbot : Impacts of the Québec carbon emissions trading scheme on plant-level performance and employment. Carbon Management, 10(3):287–298, 2019.

Martin Hänsel et Daniel Spiro : Four questions about the distributional effects of climate policy. CESifo Working Paper 12348, Center for Economic Studies and the ifo Institute, Munich, December 2025.

Gordon H. Hanson : Local labor market impacts of the energy transition : Prospects and policies. Working Paper No. 30871, National Bureau of Economic Research, January 2023.

Tilman Hartley et Giorgos Kallis : Interest-bearing loans and unpayable debts in slow-growing economies : Insights from ten historical cases. Ecological Economics, 188(107132):1–12, 2021.

John Hassler, Per Krusell et Anthony Smith, Jr : Environmental macroeconomics. In John Taylor et Harald Uhlig, éditeurs : Handbook of Macroeconomics, volume 2B, chapitre 24, pages 1893–. Elsevier, 2016.

Catherine Hausman et David Rapson : Regression discontinuity in time : Considerations for empirical applications. Annual Review of Resource Economics, 10:533–552, 2018.

Luke Haywood, Markus Janser et Nicolas Koch : The welfare costs of job loss and decarbonization : Evidence from Germany's coal phaseout. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 11(3):577–611, 2024.

Geoffrey Heal et Antony Millner : Uncertainty and ambiguity in environmental economics : Conceptual issues. In Partha Dasgupta, Subhrendu Pattanayak et V. Kerry Smith, éditeurs : Handbook of Environmental Economics, volume 4, chapitre 10, pages 439–468. Elsevier, 2018.

Geoffrey Heal et Jisung Park : Temperature stress and the direct impact of climate change : A review of an emerging literature. Review of Environmental Economics and Policy, 10(2):347–362, 2016.

Geoffrey Heal et R. Jisung Park : Feeling the heat : Temperature, physiology, and the wealth of nations. Working Paper 19725, National Bureau of Economic Research, 2013.

James Heckman, Hidehiko Ichimmura, Jeffrey Smith et Petra Todd : Characterizing selection bias using experimental data. Econometrica, 66(5):1017–1098, 1998.

James Heckman, Hidehiko Ichimmura et Petra Todd : Matching as an econometric evaluation estimator : Evidence from evaluating a job training programme. Review of Economic Studies, 64 (4):605–654, 1997.

J. Vernon Henderson, Bo Yeon Jang, Adam Storeygard et David N. Weil : Climate change, population growth, and population pressure. NBER Working Paper 32145, National Bureau of Economic Research, February 2024.

Ireri Hernandez Carballo, Gian Maria Mallarino et Marco Percoco : The impact of green policies on local economic performance : Evidence from the EU ETS. Working Paper Series 27, Università Bocconi, GREEN, April 2025a.

Ireri Hernandez Carballo, Elena Verdolini, Jan Christoph Steckel, Massimo Tavoni et Francesco Vona : The economics of a just transition. CESifo Working Paper 12357, Center for Economic Studies and the ifo Institute, Munich, December 2025b.

Garth Heutel et J. Paul Kelleher : The ethics of pollution pricing. NBER Working Paper 33300, National Bureau of Economic Research, December 2024.

Garth Heutel et Xin Zhang : Efficiency wages, unemployment, and environmental policy. Energy Economics, 104(105639):1–15, 2021.

Josiah Hickson et Joseph Marshan : Labour market effects of bushfires and floods in Australia : A gendered perspective. Economic Record, 98(S1):1–23, 2022.

Erik Hille et Patrick Möbius : Do energy prices affect employment ? Decomposed international evidence. Journal of Environmental Economics and Management, 96:1–21, 2019.

Jean Hindriks et Gareth Myles : Intermediate Public Economics. MIT Press, second édition, 2013.

Philipp Hochmuth, Per Krusell et Kurt Mitman : Distributional consequences of becoming climate-neutral. Discussion Paper 17861, Institute for the Study of Labor (IZA), Bonn, April 2025.

Dylan Hogan et Wolfram Schlenker : Empirical approaches to climate change impact quantification. In Lint Barrage et Solomon Hsiang, éditeurs : Handbook of the Economics of Climate Change, volume 1, chapitre 2, pages 53–111. Elsevier, December 2024.

Katharina Hölscher, Julia Wittmayer et Derk Loorbach : Transition versus transformation : What's the difference ? Environmental Innovation and Societal Transitions, 27:1–3, 2018.

Solomon Hsiang : Climate econometrics. The Annual Review of Resource Economics, 8:43–75, 2016.

Solomon Hsiang : The global economic impact of climate change : An empirical perspective. NBER Working Papers 34357, National Bureau of Economic Research, October 2025.

Solomon Hsiang et Amir Jina : The causal effects of environmental catastrophe on economic growth : Evidence from 6,700 tropical cyclones. NBER Working Papers 20352, National Bureau of Economic Research, July 2014.

Solomon Hsiang, Paulina Oliva et Reed Walker : The distribution of environmental damages. Review of Environmental Economics and Policy, 13(1):83–103, 2019.

Klaus Hubacek, Xiangjie Chen, Kuishuang Feng, Thomas Wiedmann et Yuli Shan : Evidence of decoupling consumption-based CO_2 emissions from economic growth. Advances in Applied Energy, 4(100074):1–10, 2021.

Jennifer Hunt : Has work-sharing worked in Germany ? Quarterly Journal of Economics, 114:117–148, 1999.

Lucas Husted, Isaac Opper et R. Jisung Park : The impact of natural disasters on human capital. EdWorkingPaper 22-548, Annenberg Institute at Brown University, 2022.

Intergovernmental Panel on Climate Change : Climate change 2021 : Summary for policymakers. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf, 2021.

Intergovernmental Panel on Climate Change : Climate change 2022 : impacts, adaptation and vulnerability. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/, 2022.

International Energy Agency : World energy employment 2024. International Energy Agency, Paris, March 2025.

International Labour Office : Working on a warmer planet : The impact of heat stress on labour productivity and decent work. Rapport technique, International Labour Office, Geneva, 2019.

International Labour Organisation : Guidelines for a Just Transition Towards Environmentally Sustainable Economies and Societies for all. International Labour Organisation, Geneva, 2015.

Andrew Ireland, David Johnston et Rachel Knott : Heat and worker health. Journal of Health Economics, 102800:1–15, 2023.

Jim Jackson et Peter Victor : Does credit create a 'growth imperative' ? A quasi-stationary economy with interest-bearing debt. Ecological Economics, 120:32–48, 2015.

Jim Jackson et Peter Victor : The transition to a sustainable prosperity : A stock-flow-consistent ecological macroeconomic model for Canada. Ecological Economics, 177(106787):1–14, 2020.

Tim Jackson : Prosperity without Growth : Economics for a Finite Planet. Earchscan, Londo, Sterling, VA, 2009.

Bas Jacobs et Frederick van der Ploeg : Redistribution and pollution taxes with non-linear Engel curves. Journal of Environmental Economics and Management, 95:198–226, 2019.

Louis Jacobson, Robert LaLonde et Daniel Sullivan : Earnings losses of displaced workers. American Economic Review, 83(4):685–709, 1993.

Adam Jaffe : Technological opportunity and spillovers of R&D : Evidence from firms' patents, profits, and market value. American Economic Review, 76(5):984–1001, 1986.

Jannik Jansen : When Europe talks climate, it needs to think jobs. Policy brief, Jacques Delors Center, Hertie School, Berlin, December 2023.

Markus Janser : The greening of jobs in Germany : First evidence from a text mining based index and employment register data. IAB-Discussion Paper 14/2018, Institute for Employment Research, 2018.

Barbara Janta, Eliza Kritikos et Thibault Clack : The green transition in the labour market : how to ensure equal access to green skills across education and training systems. EENEE analytical report, The European Expert Network on Economics of Education, Luxemburg : Publications Office of the European Union, 2023.

Florence Jaumotte, Weifeng Liu et Warwick McKibbin : Mitigating climate change : Growth-friendly policies to achieve net zero emissions by 2050. Working Paper WP/21/195, International Monetary Fund, 2021.

Seema Jayachandran : Selling labor low : Wage responses to productivity shocks in developing countries. The Journal of Political Economy, 114(3):538–575, 2006.

Svenn Jensen, Kristina Mohliny, Karen Pittelz et Thomas Sterner : An introduction to the Green Paradox : The unintended consequences of climate policies. Review of Environmental Economics and Policy, 9(2):246–265, 2015.

Svenn Jensen et Christian Traeger : Uncertainty in climate-economic modeling. In Lint Barrage et Solomon Hsiang, éditeurs : Handbook of the Economics of Climate Change, volume 1, chapitre 7, pages 351–423. Elsevier, December 2024.

Katrina Jessoe, Dale Manning et J. Edward Taylor : Climate change and labour allocation in rural mexico : Evidence from annual fluctuations in weather. The Economic Journal, 128(608):230–261, 2018.

Ruixue Jia, Xiao Ma et Victoria Xie : Expecting floods : Firm entry, employment, and aggregate implication. American Economic Journal : Macroeconomics, Forthcoming, 2025.

Eugénie Joltreau et Katrin Sommerfeld : Why does emissions trading under the EU emissions trading system (ETS) not affect firms' competitiveness ? Empirical findings from the literature. Climate Policy, 19(4):453–471, 2019.

Philip Jung, Philipp Korfmann et Edgar Preugschat : Optimal regional labor market policies. European Economic Review, 152(104318):1–25, 2023.

Matthew Kahn et Erin Mansur : Do local energy prices and regulation affect the geographic concentration of employment ? Journal of Public Economics, 101:105–114, 2013.

Matthew E. Kahn, Kamiar Mohaddes, Ryan N. C. Ng, M. Hashem Pesaran, Mehdi Raissi et Jui-Chung Yang : Long-term macroeconomic effects of climate change : A cross-country analysis. Working Paper WP/19/215, International Monetary Fund, 2019.

Giorgos Kallis, Jason Hickel, Daniel O'Neill, Tim Jackson, Peter Victor, Kate Raworth, Juliet Schor, Julia Steinberger et Diana Ürge-Vorsatz : Post-growth : The science of wellbeing within planetary boundaries. The Lancet Planetary Health, 9(1):e62–e78, January 2025.

Diego Känzig : The macroeconomic effects of oil supply news : Evidence from OPEC announcements. American Economic Review, 111(4):1092–1125, 2021.

Diego Känzig : The unequal economic consequences of carbon pricing. https://dkaenzig.github.io/diegokaenzig.com/Papers/kaenzig_jmp_unequal_consequences_carbon_pricing.pdf, June 2025.

Diego Känzig et Maximilian Konradt : Climate policy and the economy : Evidence from Europe's carbon pricing initiatives. IMF Economic Review, 72(3):1081–1124, 2024.

Akash Kaura : Understanding the green transition : Supply and demand dynamics. LinkedIn Economic Graph Research Note, September 2024.

Daiji Kawaguchi, Hisahiro Naito et Izumi Yokoyama : Assessing the effects of reducing standard hours : Regression discontinuity evidence from Japan. Journal of The Japanese and International Economies, 43:59–76, 2017.

Klaus Keller, Benjamin Bolker et David Bradford : Uncertain climate thresholds and optimal economic growth. Journal of Environmental Economics and Management, 48:723–741, 2004.

René Kemp et Derk Loorbach : Transition management : A reflexive governance approach. In Jan-Peter Voss, Dierk Bauknecht et René Kemp, éditeurs : Reflexive Governance for Sustainable Development, chapitre 5. Edward Elgar, Cheltenham, UK, 2006.

Tord Kjellstrom, David Briggs, Chris Freyberg, Bruno Lemke, Matthias Otto et Olivia Hyatt : Heat, human performance, and occupational health : A key issue for the assessment of global climate change impacts. Annual Review of Public Health, 37(97–112), 2016.

Hannah Klauber, Nicolas Koch et Nico Pestel : The immediate and lasting effects of heat waves on workers. IZA Discussion paper 18176, Institute for the Study of Labor (IZA), October 2025.

Marit Klemetsen, Knut Einar Rosendahl et Anja Lund Jakobsen : The impact of the EU ETS on Norwegian plants' environmental and economic performance. Climate Change Economics, 11 (1):1–32, 2020.

Charles Kolstad et Frances Moore : Estimating the economic impacts of climate change using weather observations. Review of Environmental Economics and Policy, 14(1):1–24, 2020.

Maximilian Konradt et Giacomo Mangiante : The unequal costs of carbon pricing : Economic and political effects across European regions. Economic Journal, page Forthcoming, 2026.

Maximilian Konradt et Beatrice Weder di Mauro : Carbon taxation and greenflation : Evidence from Europe and Canada. Journal of the European Economic Association, 21(6):2518–2546, 2023.

Jouni Korhonen, Antero Honkasalo et Jyri Seppälä : Circular economy : The concept and its limitations. Ecological Economics, 143:37–46, 2018.

Ulrike Kornek, David Klenert, Ottmar Edenhofer et Marc Fleurbaey : The social cost of carbon and inequality : When local redistribution shapes global carbon prices. Journal of Environmental Economics and Management, 107(102450):1–31, 2021.

Benjamin Krebs : Temperature and cognitive performance : Evidence from mental arithmetic training. Environmental and Resource Economics, 87:2035–2065, 2024.

Jens Krüger et Michael Neugart : Weather and intertemporal labor supply : Results from German time-use data. Labour, 32(1):112–140, 2018.

Wenjing Kuai, Robert Elliott, Toshihiro Okubo et Ceren Ozgen : Estimating the green wage premium. Discussion Paper 17878, Institute for the Study of Labor (IZA), April 2025.

Christina Kwauk et Victoria Casey : A new green learning agenda : Approaches to quality education for climate action, 2021.

Alessandra La Notte, Ioanna Grammatikopoulou, Mayra Zurbaran-Nucci, Alexandra Marques, Silvia Ferrini, Silvia Cerilli et Marialuisa Tamborra : Linking accounts for ecosystem services and benefits to the economy through bridging (LISBETH) Part II. Publications Office of the European Union JRC130438, European Commission, Luxemburg, 2022.

Charles Labrousse et Yann Perdereau : Geography versus income : The heterogeneous effects of carbon taxation. Working Paper 3104, European Central Bank, 2025.

Wangyang Lai, Yun Qiu, Qu Tang, Chen Xi et Peng Zhang : The effects of temperature on labor productivity. Annual Review of Resource Economics, 15:213–232, 2023.

Maureen Lankhuizen, Dario Diodato, Anet Weterings, Olga Ivanova et Mark Thissen : Identifying labour market bottlenecks in the energy transition : A combined IO-matching analysis. Economic Systems Research, 35(2):157–182, 2023.

Frithjof Laubinger, Elisa Lanzi et Jean Chateau : Labour market consequences of a transition to a circular economy : A review paper. Environmental Working Paper 162, OECD, May 2020.

Kurt Lavetti : Compensating wage differentials in labor markets : Empirical challenges and applications. Journal of Economic Perspectives, 37(3):189–212, 2023.

Richard Layard, Stephen Nickell et Richard Jackman : Unemployment : Macroeconomic performance and the labour market. Oxford University Press, Oxford, 1991.

Junhyeong Lee, Yong Ho Lee, Won-Jun Choi, Seunghon Ham, Seong-Kyu Kang, Jin-Ha Yoon, Min Joo Yoon, Mo-Yeol Kang et Wanhyung Lee : Heat exposure and workers' health : A systematic review. Reviews on Environmental Health, 37(1):45–59, 2022.

Wang-Sheng Lee et Ben Li : Extreme weather and mortality : Evidence from two millennia of Chinese elites. Journal of Health Economics, 76(102401):1–17, 2021.

Yeyoung Lee, Beliyou Haile, Greg Seymour et Carlo Azzarri : The heat never bothered me anyway : Gender-specific response of agricultural labor to climatic shocks in Tanzania. Applied Economic Perspectives and Policy, 43:732–749, 2021.

Andrea Leiter, Harald Oberhofer et Paul Raschhky : Creative disasters ? Flooding effects on capital, labour and productivitywithin european firms. Environmental and Resource Economics, 43:333–350, 2009.

Derek Lemoine : Estimating the consequences of climate change from variation in weather. NBER Working Paper 25008, National Bureau of Economic Research, May 2024.

Derek Lemoine, Catherine Hausman et Jeffrey Shrader : A guide to climate damages. Journal of Economic Literature, Forthcoming, 2026.

Derek Lemoine et Christian Traeger : Watch your step : Optimal policy in a tipping climate. American Economic Journal : Economic Policy, 6(1):137–166, 2014.

Derek Lemoine et Christian Traeger : Ambiguous tipping points. Journal of Economic Behavior & Organization, 132:5–18, 2016a.

Derek Lemoine et Christian Traeger : Economics of tipping the climate dominoes. Nature Climate Change, 6:514–519, 2016b.

Pilar L'Hotellerie-Fallois, Marta Manrique Simón et Danilo Bianco : EU policies for the green transition, 2019-2024. Banco de Espana Occasional Paper 2424, Banco de Espana, October 2024.

Chengzheng Li et Zheng Pan : How do extremely high temperatures affect labormarket performance ? Evidence from rural China. Empirical Economics, 61:2265–2291, 2021.

Zhenran Li, Meng Wang et Qunwei Wang : Job destruction and creation : Labor reallocation entailed by the clean air action in China. China Economic Review, 79(101945):1–22, 2023.

Junghyun Lim, Michaël Aklin et Morgan Frank : Location is a major barrier for transferring US fossil fuel employment to green jobs. Nature Communications, 14(5711):1–9, September 2023.

LinkedIn : Global green skills report 2024. https://economicgraph.linkedin.com/research/green-skills-resources, 2024.

Richard Lipsey et Kevin Lancaster : The general theory of second best. The Review of Economic Studies, 24(1):11–32, 1956.

Maggie Liu, Yogita Shamdasani et Vis Taraz : Climate change and labor reallocation : Evidence from six decades of the Indian census. American Economic Journal : Economic Policy, 15(2):395–423, May 2023.

Leandro Javier Llorente-González et Xavier Vence : How labour-intensive is the circular economy ? A policy-orientated structural analysis of the repair, reuse and recycling activities in the European Union. Resources, Conservation & Recycling, 162(105033):1–11, 2020.

Michael Lobsiger et Christian Rutzer : The green potential of occupations in Switzerland. Swiss Journal of Economics and Statistics, 157(8):1–21, 2021a.

Michael Lobsiger et Christian Rutzer : Green potential of Europe's labour force : Relative share and possible skills imbalances. WWZ Working Paper 2021/04, Universität Basel, 2021b.

Derk Loorbach, Niki Frantzeskaki et Flor Avelino : Sustainability transitions research : Transforming science and practice for societal change. Annual Review of Environment and Resources, 42:599–626, 2017.

Melissa LoPalo : Temperature, worker productivity, and adaptation : Evidence from survey data production. American Economic Journal : Applied Economics, 15(1):192–229, 2023.

Marta Lopes et Alessandro Tondini : Firm-level effects of reductions in working hours. Working Paper 2022-05, IRVAPP Research Institute for the Evaluation of Public Policies, Trento, July 2022.

Claudia Macaluso : Skill remoteness and post-layoff labor market outcomes. American Economic Journal : Macroeconomics, 17(2):134–176, 2025.

Sharon Maccini et Dean Yang : Under the weather : Health, schooling, and economic consequences of early-life rainfall. American Economic Review, 99(3):1006–1026, 2009.

Stephen Machin, Kjell Salvanes et Panu Pelkonen : Education and mobility. Journal of the European Economic Association, 10(2):417–450, 2012.

Nicole Maestas, Kathleen Mullen, David Powell, Till von Wachter et Jeffrey Wenger : The value of working conditions in the united states and implications for the structure of wages. American Economic Review, 113(7):2007–2047, 2023.

Sara Maestre-Andrés, Stefan Drews et Jeroen van den Bergh : Perceived fairness and public acceptability of carbon pricing : A review of the literature. Climate Policy, 19(9):1186–1204, 2019.

Joana Elisa Maldonado, Anneleen Vandeplas, Istvan Vanyolos, Mauro Vigani et Alessandro Turrini : Assessing green job dynamics in the EU : A comparison of alternative methodologies. Discussion Paper 206, European Commission, July 2024.

Giacomo Mangiante : The geographic effects of carbon pricing. European Economic Review, 168 (104825):1–16, 2024.

Alan Manning et Barbara Petrongolo : How local are labor markets ? Evidence from a spatial job search model. American Economic Review, 107(10):2877–2907, 2017.

Giovanni Marin, Marianna Marino et Claudia Pellegrin : The impact of the European emission trading scheme on multiple measures of economic performance. Environmental and Resource Economics, 71(2):551–582, 2018.

Giovanni Marin et Francesco Vona : Climate policies and skill-biased employment dynamics : Evidence from EU countries. Journal of Environmental Economics and Management, 98:1–19, 2019.

Giovanni Marin et Francesco Vona : The impact of energy prices on socioeconomic and environmental performance : Evidence from french manufacturing establishments, 1997–2015. European Economic Review, 135(103739):1–19, 2021.

Ioana Marinescu et Roland Rathelot : Mismatch unemployment and the geography of job search. American Economic Journal : Macroeconomics, 10(3):42–70, 2018.

Ralf Martin, Laure de Preux et Ulrich Wagner : The impact of a carbon tax on manufacturing : Evidence from microdata. Journal of Public Economics, 117:1–14, 2014.

Ralf Martin, Mirabelle Muûls et Ulrich Wagner : The impact of the European Union emissions trading scheme on regulated firms : What is the evidence after ten years ? Review of Environmental Economics and Policy, 10(1):129–148, 2016.

Ricardo Marto, Chris Papageorgiou et Vladimir Klyuev : Building resilience to natural disasters : An application to small developing states. Journal of Development Economics, 135:574–586, 2018.

Andreu Mas-Colell, Michael Whinston et Jerry Green : Microeconomic Theory. Oxford University Press, 1995.

Riccardo Mastinia, Giorgos Kallis et Jason Hickelc : A green new deal without growth ? Ecological Economics, 179(106832):1–9, 2021.

Jean-François Maystadt, Ashok Mishra, Valerie Mueller et Matthew Smoldt : The causes and policy responses to forced migration and environmental degradation in Africa. Annual Review of Resource Economics, 16:301–322, 2024.

Mariana Mazzucato : Governing the economics of the common good : From correcting market failures to shaping collective goals. Journal of Economic Policy Reform, 27(1):1–24, 2023.

Mariana Mazzucato et Josh Ryan-Collins : Putting value creation back into "public value" : from marketfixing to market-shaping. Journal of Economic Policy Reform, 25(4):345–360, 2022.

Donella Meadows, Dennis Meadows, Jørgen Randers et William Behrens III : The Limits to growth. Other Potomac Associates Books, Washington D.C., 1972.

Pierre Mérel et Matthew Gammans : Climate econometrics : Can the Panel approach account for long-run adaptation ? American Journal of Agricultural Economics, 103(4):1207–1238, 2021.

Magnus Merkle et Geoffroy Dolphin : Distributional impacts of heterogenous carbon prices in the EU. Working Paper WP/24/149, International Monetary Fund, July 2024.

Gilbert Metcalf et James Stock : Measuring the macroeconomic impact of carbon taxes. American Economic Association Papers and Proceedings, 110:101–106, 2020.

Gilbert Metcalf et James Stock : The macroeconomic impact of Europe's carbon taxes. American Economic Journal : Macroeconomics, 15(3):265–286, 2023.

Frances Moore, Moritz Drupp, James Rising, Simon Dietz, Ivan Rudik et Gernot Wagner : Synthesis of evidence yields high social cost of carbon due to structural model variation and uncertainties. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121(52 e2410733121):1–11, 2024.

Frances Moore et David Lobell : Adaptation potential of European agriculture in response to climate change. Nature Climate Change, 4:610–614, 2014.

Richard Morgenstern, William Pizer et Jhih-Shyang Shih : Jobs versus the environment : An industry-level perspective. Journal of Environmental Economics and Management, 43(3):412–436, 2002.

Linguère Mously Mbaye : Climate change, natural disasters, and migration. IZA World of Labor, 346:1–10, 2017.

Jamie Mullins et Corey White : Temperature and mental health : Evidence from the spectrum of mental health outcomes. Journal of Health Economics, 102240:1–22, 2019.

Matthias Multani, Kris Bachus, Kasper Ampe, Yoko Dams et Lize Borms : Impacts of the circular economy on the labour market : Literature review. https://hiva.kuleuven.be/nl/onderzoek/thema/klimaatendo/p/themas/MICHELLE, 2022.

Haroon Mumtaz et Angeliki Theophilopoulou : The distributional effects of climate change. An empirical analysis. European Economic Review, 169(104828):1–12, 2024.

Mark Muro, Adie Tomer, Ranjitha Shivaram et Joseph KaneApril : Clean energy jobs. Metropolitan Policy Program at Brookings, April 2019.

Wim Naudé : Melancholy hues : The futility of green growth and degrowth, and the inevitability of societal collapse. Discussion Paper 16139, IZA Institute for Labor, IZA, Bonn, May 2023.

Matthew Neidell, Joshua Graff Zivin, Megan Sheahan, Jacqueline Willwerth, Charles Fant, Marcus Sarofim et Jeremy Martinich : Temperature and work : Time allocated to work under varying climate and labor market conditions. PLoS ONE, 16(8):1–14, 2021.

Matthew Neidell et Nico Pestel : Air pollution and worker productivity. IZA World of Labor, 363v2:1–11, February 2023.

Arash Nekoei : Will markets provide humane jobs ? CESifo Working Paper 9533, Center for Economic Studies and the ifo Institute, 2023.

David Neumark et Helen Simpson : Place-based policies. In William Strange Gilles Duranton, J. Vernon Henderson, éditeur : Handbook of Regional and Urban Economics, volume 5, chapitre 18. Elsevier, 2015.

Rebecca Newman et Ilan Noy : The global costs of extreme weather that are attributable to climate change. Nature Communications, 14(6103):1–13, 2023.

Willam Nordhaus : Climate change : The ultimate challenge for economics. American Economic Review, 109(6):1991–2014, 2019.

William Nordhaus : To slow or not to slow : The economics of the greenhouse effect. The Economic Journal, 101(407):920—937, 1991.

Matthew Notowidigdo : The incidence of local labor demand shocks. Journal of Labor Economics, 38(3):687–725, 2020.

OECD : Towards Green Growth. OECD, Paris, 2011.

OECD : Cost-Benefit Analysis and the Environment : Further Developments and Policy Use. OECD Publishing, Paris, 2018.

OECD : Global Material Resources Outlook to 2060 Economic Drivers and Environmental Consequences. OECD Publishing, Paris, 2019.

OECD : Job Creation and Local Economic Development 2023 : Bridging the Great Green Divide. OECD Publishing, Paris, March 2023.

OECD : Employment outlook : The Net-Zero Transition and the Labour Market. OECD Publishing, Paris, 2024.

OECD : The Climate Action Monitor 2025. OECD Publishing, Paris, 2025a.

OECD : Environmental Outlook on the Triple Planetary Crisis : Stakes, Evolution and Policy Linkages. OECD Publishing, Paris, 2025b.

OECD et UNDP : Investing in Climate for Growth and Development : The Case for Enhanced NDCs. OECD Publishing, Paris, 2025.

Nils Ohlendorf, Michael Jakob, Jan Christoph Minx, Carsten Schröder et Jan Christoph Steckel : Distributional impacts of carbon pricing : A meta-analysis. Environmental and Resource Economics, 78:1–42, 2021.

Stan Olijslagers, Frederick van der Ploeg et Sweder van Wijnbergen : On current and future carbon prices in a risky world. Journal of Economic Dynamics & Control, 146(104569):1–27, 2023.

Paulina Oliva : Migration and the environment : A look across perspectives. Regional Science and Urban Economics, 107(104005):1–11, 2024.

Christopher Olk, Colleen Schneider et Jason Hickel : How to pay for saving the world : Modern monetary theory for a degrowth transition. Ecological Economics, 214(107968):1–12, 2023.

Stan Openshaw : The modifiable areal unit problem, volume Concepts and techniques in modern geography 38. Geo Books, Norwich, Englan, 1984.

Alexandre Ounnas : The green employment index : A composite indicator to assess the greenness of employment in the EU. Working paper 2/2025, Transeuroworks, 2025.

Fiorella Padoa Schioppa, éditeur. Mismatch and labour mobility. Cambridge University Press, 1991.

Filippo Pallotti, Gonzalo Paz-Pardo, Jiri Slacalek, Oreste Tristani et Giovanni Violante : Who bears the costs of inflation ? Euro area households and the 2021–2022 shock. ECB Working Paper 2877, European Central Bank, 2023.

Xiaofei Pan et Buhui Qiu : The impact of flooding on firm performance and economic growth. PLoS ONE, 17(7):1–29, 2022.

R. Jisung Park : Hot temperature and high-stakes performance. Journal of Human Resources, 57 (2):400–434, 2022.

R. Jisung Park : Slow Burn : The Hidden Costs of a Warming World. Princeton University Press, Princeton, 2024.

R. Jisung Park, A. Patrick Behrer et Joshua Goodman : Learning is inhibited by heat exposure, both internationally and within the United States. Nature Human Behavior, 5:19–27, 2021a.

R. Jisung Park, Joshua Goodman, Michael Hurwitz et Jonathan Smith : Heat and learning. American Economic Journal : Economic Policy, 12(2):306–339, 2020.

R. Jisung Park, Nora Pankratz et A. Patrick Behrer : Temperature, workplace safety, and labor market inequality. Discussion Paper 14560, Institute for the Study of Labor (IZA), July 2021b.

Timothée Parrique, Jonathan Barth, François Briens, Christian Kerschner, Alejo Kraus-Polk, Anna Kuokkanen et Joachim Spangenberg : Decoupling debunked : Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability. European Environmental Bureau, July 2019.

Jayash Paudel : Effects of natural disasters on human capital. Annual Review of Resource Economics, 17:323–337, 2015.

Nico Pestel : Employment effects of green energy policies. IZA World of Labor, 76v2:1–11, 2019.

Robert Pindyck : Climate change policy : What do the models tell us ? Journal of Economic Literature, 51(3):860–872, 2013.

Robert Pindyck : The use and misuse of models for climate policy. Review of Environmental Economics and Policy, 11(1):100–114, 2017.

Robert Pindyck : What we know and don't know about climate change, and implications for policy. Environmental and Energy Policy and the Economy, 2:4–43, 2021.

Robert Pindyck : Population, productivity, and sustainable consumption. American Economic Journal : Macroeconomics, 16(4):218–238, 2024.

Jean Pisani-Ferry : Climate policy is macroeconomic policy, and the implications will be significant. Rapport technique Policy Brief 21-20, Peterson Institute for International Economics, August 2021.

Christopher A. Pissarides : Equilibrium unemployment theory. MIT Press, Cambridge (MA), 2000.

Aude Pommeret : Les incidences économiques de l'action pour le climat. sobriété. https://www.strategie.gouv.fr/publications/incidences-economiques-de-laction-climat, Mai 2023.

Aude Pommeret, Francesco Ricci et Katheline Schubert : Critical raw materials for the energy transition. European Economic Review, 141(103991):1–24, 2022.

David Popp, Francesco Vona, Giovanni Marin et Ziqiao Chen : The employment impact of green fiscal push : Evidence from the American Recovery Act. Brookings Papers on Economic Activity, FALL:1–49, 2021.

Michael Porter et Claas van der Linde : Green and competitive : Ending the stalemate. Harvard Business Review, 73(5):120–134, 1995.

Price Waterhouse Cooper : The energy transition and jobs : Can people transition to new green jobs ? https://www.pwc.co.uk/who-we-are/purpose/the-energy-transition-and-jobs.pdf, August 2022.

Price Waterhouse Cooper : Green jobs barometer. https://www.pwc.co.uk/who-we-are/purpose/green-jobs-barometer-2023.pdf, December 2023.

Cristhian Prieto, Arthur Grimes et Ilan Noy : The effect of cyclones on workers' mental health. CESifo Working Paper 12009, Center for Economic Studies and the ifo Institute, Munich, August 2025.

Christian Pröbsting : Aggregate and distributional effects of a carbon tax. https://sites.google.com/site/proebstingchristian/home, October 2024.

Mengmeng Qiang, Hangyi Lai et Zhenxi Lyu : Carbon emissions trading and employment : Evidence from China. Sustainability, 17(1404):1–1à, 2025.

Pedro Raposo et Jan van Ours : How a reduction of standard working hours affects employment dynamics. De Economist, 158(2):193–207, 2010.

Sebastian Rausch, Gilbert Metcalf et John Reilly : Distributional impacts of carbon pricing : A general equilibrium approach with micro-data for households. Energy Economics, 33:S20–S33, 2011.

Stefan Reindl et Stephanie Hollings : From sustainability to ecological civilization. In Michael Peters, Benjamin Green, Greg, William Misiaszek et Xudong Zhu, éditeurs : Handbook of Ecological Civilization. Concept, Philosophy, and Pedagogy, Springer International Handbooks of Education. Springer, 2025.

Lars Repp, Marko Hekkert et Julian Kirchherr : Circular economy-induced global employment shifts in apparel value chains : Job reduction in apparel production activities, job growth in reuse and recycling activities. Resources, Conservation & Recycling, 171:105621, 2021.

Richa Richa, Ilan Noy et Subir Sen : Extreme weather and inter-state migration in India. CESifo Working Paper 10919, Center for Economic Studies and the ifo Institute, Munich, January 2024.

Katherine Richardson, Will Steffen, Wolfgang Lucht, Jørgen Bendtsen, Sarah E. Cornell, Jonathan F. Donges, Markus Drüke, Ingo Fetzer, Govindasamy Bala, Werner von Bloh, Georg Feulner, Stephanie Fiedler, Dieter Gerten, Tom Gleeson, Matthias Hofmann, Willem Huiskamp, Matti Kummu, Chinchu Mohan, David Nogués-Bravo, Stefan Petri, Miina Porkka, Stefan Rahmstorf, Sibyll Schaphoff, Kirsten Thonicke, Arne Tobian, Vili Virkki, Lan Wang-Erlandsson, Lisa Weber et Johan Rockström : Earth beyond six of nine planetary boundaries. Science Advances, 9(37):eadh2458, 1–16, 2023.

Juan-Pablo Rud, Michael Simmons, Gerhard Toews et Fernando Aragon : Job displacement costs of phasing out coal. Journal of Public Economics, 236(105167):1–9, 2024.

Christian Rutzer, Matthias Niggli et Rolf Weder : Estimating the green potential of occupations : A new approach applied to the U.S. labor market. WWZ Working Paper 2020/03, Universität Basel, 2020.

Sebastiano Sabato et Matteo Mandelli : Towards an eu framework for a just transition : Welfare policies and politics for the socio,Äëecological transition. European Political Science, 23:14–26, 2024.

Rafael Sánchez : Do reductions of standard hours affect employment transitions ? Evidence from Chile. Labour Economics, 20:24–37, 2013.

Misato Sato, Leanne Cass, Aurélien Saussay, Francesco Vona, Leo Mercer et Layla O'Kane : Skills and wage gaps in the low-carbon transition : Comparing job vacancy data from the US and UK. Policy report, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment and Centre for Climate Change Economics and Policy, London School of Economics and Political Science, January 2023.

Aurélien Saussay, Misato Sato, Francesco Vona et Layla O'Kane : Emerging skills and wage gaps in the low-carbon transition. Fondazione Eni Enrico Mattei, June 2024.

Quirin Schiermeier : Droughts, heatwaves and floods : How to tell when climate change is to blame. Nature, 560:20–22, 2018.

Wolfram Schlenker et Michael J. Roberts : Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106 (37):15594–15598, 2009.

Johannes Schmieder, Till von Wachter et Jörg Heining : The costs of job displacement over the business cycle and its sources : Evidence from Germany. American Economic Review, 113 (5):1208–1254, 2023.

Benoît Schmutz, Modibo Sidibé et Élie Vidal-Naquet : Why are low-skilled workers less mobile ? The role of mobility costs and spatial frictions. Annals of Economics and Statistics, 142:283–304, June 2021.

Ronnie Schöb : The double-dividend hypothesis of environmental taxes : A survey. In Henk Folmer et Tom Tietenberg, éditeurs : The International Yearbook of Environmental and Resource Economics, volume 2005/2006, chapitre 6. Edward Elgar Publishing, 2005.

Nathalie Scholl, Sebastien Turban et Peter Gal : The green side of productivity : An international classification of green and brown occupations. OECD Productivity Working Papers 2023-33, OECD, May 2023.

Baoping Shang : The poverty and distributional impacts of carbon pricing : Channels and policy implications. Review of Environmental Economics and Policy, 17(1):64–85, 2023.

Qing-long Shao et Beatriz Rodríguez-Labajos : Does decreasing working time reduce environmental pressures ? New evidence based on dynamic panel approach. Journal of Cleaner Production, 125:227–235, 2016.

Robert Shimer : Optimal taxation of consumption externalities with search unemployment. https://sites.google.com/site/robertshimer/research/workingpapers, October 2013.

SIA : Navigating the landscape of green jobs. https://www.sia-partners.com/en/insights/publications/navigating-landscape-green-jobs, April 2024.

Tobias Sieg, Thomas Schinko, Kristin Vogel, Reinhard Mechler, Bruno Merz et Heidi Kreibich : The impact of flooding on firm performance and economic growth. PLoS ONE, 14(4):1–21, 2019.

M. Skuterud : Identifying the potential of work-sharing as a job-creation strategy. Journal or Labor Economics, 25:265–287, 2007.

Nicole Smith, Martin Van Der Werf, Madeleine Adelson et Jeff Strohl : Falling behind : How skills shortages threaten future jobs. Georgetown University Center on Education and the Workforce, 2025.

V. Kerry Smith : Should benefit–cost methods take account of high unemployment ? Symposium introduction. Review of Environmental Economics and Policy, 9(2):165–178, 2015.

Nick Sofroniou et Pauline Anderson : The green factor : Unpacking green job growth. International Labour Review, 160(1):21–41, 2021.

Robert Solow : Intergenerational equity and exhaustible resources. Review of Economic Studies, 41(Symposium on the Economics of Exhaustible Resources):29–45, 1974.

E. Somanathan, Rohini Somanathan, Anant Sudarshan et Meenu Tewari : The impact of temperature on productivity and labor supply : Evidence from Indian manufacturing. Journal of Political Economy, 129(6):1797–1827, 2021.

Robert Stavins : The relative merits of carbon pricing instruments : Taxes versus trading. Review of Environmental Economics and Policy, 16(1):62–82, 2022.

Will Steffen, Katherine Richardson, Johan Rockström, Sarah Cornell, Ingo Fetzer, Elena Bennett, Reinette Biggs, Stephen Carpenter, Wim de Vries, Cynthia de Wit, Carl Folke, Dieter Gerten, Jens Heinke, Georgina Mace, Linn Persson, Veerabhadran Ramanathan, Belinda Reyers et Sverker Sörlin : Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet. Science, 347(6223):736–747, 2015.

Nicholas Stern et Joseph Stiglitz : Climate change and growth. Industrial and Corporate Change, 32:277–303, 2023.

Nicholas Stern, Joseph Stiglitz et Charlotte Taylor : The economics of immense risk, urgent action and radical change : towards new approaches to the economics of climate change. Journal of Economic Methodology, 29(3):181–216, 2022.

Joseph Stiglitz : Growth with exhaustible natural resources : Efficient and optimal growth path. Review of Economic Studies, 41(Symposium on the Economics of Exhaustible Resources):123–137, 1974.

Joseph Stiglitz : REPLY Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. Ecological Economics, 22:269–270, 1997.

Jason Taylor : Work-sharing during the great depression : Did the 'president's reemployment agreement' promote reemployment ? Economica, 78:133–153, 2011.

Jordi Teixidó, Stefano Verde et Francesco Nicolli : The impact of the EU Emissions Trading System on low-carbon technological change : The empirical evidence. Ecological Economics, 164 (106347):1–13, 2019.

The Adecco Group et Draup : The green wage premium : Does it pay to move into a green job ? https://www.adeccogroup.com, January 2025.

Govinda Timilsina : Carbon taxes. Journal of Economic Literature, 60(4):1456–1502, 2022.

Adie Tomer, Joseph Kane et Caroline George : How renewable energy jobs can uplift fossil fuel communities and remake climate politics. Research report, Brookings Institution, February 2021.

Robert Topel : Local labor markets. Journal of Political Economy, 94(3):S111–S143, 1986.

Christian Traeger : Temperature shocks and climate change : A conceptual analysis. CESifo Working Paper 12353, Center for Economic Studies and the ifo Institute, December 2025.

Stefanos Tyros, Dan Andrews et Alain de Serres : Doing green things : Skills, reallocation, and the green transition. Rapport technique 1763, OECD Economics Department Working Papers, June 2023.

UNEP/ILO/IOE/ITUC : Green jobs : Towards decent work in a sustainable, low-carbon world. https://www.ilo.org/publications/green-jobs-towards-decent-work-sustainable-low-carbon-world-full-report, September 2008.

United Nations : Natural capital accounting for sustainable macroeconomic strategies. Department of Economic and Social Affairs, New-York, 2020.

United Nations Department of Economic and Social Affairs : The Sustainable Development Goals Report 2025. United Nations, July 2025.

Patricia Urban, Vasileios Rizos, Alexandre Ounnas, Amin Kassab et Hayk Kalantaryan : Jobs for the green transition : Definitions, classifications and emerging trends. https://www.ceps.eu/ceps-publications/jobs-for-the-green-transition/, September 2023.

Sehrish Usman, Guzmán González-Torres Fernández et Miles Parker : Going NUTS : The regional impact of extreme climate events over the medium term. European Economic Review, 178(105081):1–10, 2025.

Anna Valero : Net zero and the labour market : Evidence from the UK. LSE Public Policy Review, 3(2):1–11, 2025.

Anna Valero, Jiaqi Li, Sabrina Muller, Capucine Riom, Viet Nguyen-Tien et Mirko Draca : Are 'green' jobs good jobs ? https://cep.lse.ac.uk/pubs/download/special/cepsp39.pdf, October 2021.

Ton van den Bremer et Frederick van der Ploeg : The risk-adjusted carbon price. American Economic Review, 111(9):2782–2810, 2021.

Frederick van der Ploeg et Armon Rezai : Climate change, climate policy, and the macroeconomy. In Lint Barrage et Solomon Hsiang, éditeurs : Handbook of the Economics of Climate Change, volume 2. Elsevier, 2026.

Frederick van der Ploeg, Armon Rezai et Miguel Tovar Reaños : Third-best carbon taxation : Trading off emission cuts, equity, and efficiency. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 12(4):1023–1058, 2025.

Anneleen Vandeplas, Istvan Vanyolos, Mauro Vigani et Lukas Vogel : The possible implications of the green transition for the EU labour market. European Economy Discussion Papers 176, European Commission's Directorate-General for Economic and Financial Affairs, December 2022.

Janos Varga, Werner Roeger et Jan in 't Veld : A multisector dynamic general equilibrium model with energy and a model-based assessment to reach the EU climate targets. Economic Modelling, 114(105911):1–15, 2022.

Hal Varian : Intermediate Microeconomics : A Modern Approach. W.W. Norton and Company, 8 édition, 2010.

Konstantinos Vatalis, Georgios Avlogiaris et Thomas Tsalis : Just transition pathways of energy decarbonization under the global environmental changes. Journal of Environmental Economics and Management, 309(114713):1–8, 2022.

Sveva Vitellozzi et Gianna Claudia Giannelli : Thriving in the rain : Natural shocks, time allocation, and women's empowerment in Bangladesh. World Development, 181(106684):1–18, 2024.

Jefim Vogel et Jason Hickel : Is green growth happening ? An empirical analysis of achieved versus Paris-compliant CO2–GDP decoupling in high-income countries. The Lancet Planetary Health, 7 (9):e759–e769, 2023.

Till von Wachter : Summary of the literature on job displacement in the us and eu : What we know and what we would like to know. In David Marsden et François Rycx, éditeurs : Wage Structures, Employment Adjustments and Globalization, Applied Econometrics Assocation Series, chapitre 3, pages 64–121. Palgrave MacMillan, 2010.

Francesco Vona : Job losses and political acceptability of climate policies : Why the 'job-killing' argument is so persistent and how to overturn it. Climate Policy, 19(4):524–532, 2019.

Francesco Vona, Giovanni Marin et Davide Consoli : Measures, drivers and effects of green employment : Evidenc from US local labor markets, 2006 - 2014. Journal of Economic Geography, 19:1021–1048, 2019.

Francesco Vona, Giovanni Marin, Davide Consoli et David Popp : Environmental regulation and green skills : An empirical exploration. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 5(4):713–753, 2018.

Jan-Peter Voss et René Kemp : Sustainability and reflexive governance : Introduction. In Jan-Peter Voss, Dierk Bauknecht et René Kemp, éditeurs : Reflexive Governance for Sustainable Development, chapitre 1. Edward Elgar, Cheltenham, UK, 2006.

Zoi Vrontisi, Ioannis Charalampidis, Konstantinos Fragkiadakis et Alkistis Florou : Towards a just transition : Identifying EU regions at a socioeconomic risk of the low-carbon transition. Energy and Climate Change, 5(100129):1–12, 2024.

W. Reed Walker : Environmental regulation and labor reallocation : Evidence from the clean air act. American Economic Review : Papers & Proceedings, 101(3):442–447, 2011.

W. Reed Walker : The transitional costs of sectoral reallocation : Evidence from the clean air act and the workforce. The Quarterly Journal of Economics, 128(4):1787–1835, 2013.

Chang'an Wang, Xiaoqian Liu, Qian Xi et Ying Zhang : The impact of emissions trading program on the labor demand of enterprises : Evidence from China. Frontier in Environmental Sciences, 10(872248):1–12, 2022.

Feng Wang, Yijie Jiang, Wulin Zhang et Fang Yang : Elasticity of factor substitution and driving factors of energy intensity in China's industry. Energy and Environment, 30(3):285–407, 2019.

Jing Wang, Yijing Wang et Jian Song : The policy evaluation of China's carbon emissions trading scheme on firm employment : A channel from industrial automation. Energy Policy, 178(113590): 1–15, 2023.

Qian Wang, Klaus Hubacek, Kuishuang Feng, Yi-Ming Wei et Qiao-Mei Liang : Distributional effects of carbon taxation. Applied Energy, 184:1123–1131, 2016.

Xing Wang, Pengyu Li, Yangguang Yuan et Qianxiang Zhang : The impact of the carbon trading market on corporate employment : Theoretical and empirical evidence. Energy, 320(135098):1–8, 2025.

Jeremy Weber : How should we think about environmental policy and jobs ? An analogy with trade policy and an illustration from us coal mining. Review of Environmental Economics and Policy, 14(1):44–66, 2020.

Feng Wei et Chi Man Yip : The ins and outs of employment : Labor market adjustments to carbon taxes. European Economic Review, 179(105128):1–26, 2025.

Matthias Weitzel, Toon Vandyck, Luis Rey Los Santos, Marie Tamba, Umed Temursho et Krzysztof Wojtowicz : A comprehensive socio-economic assessment of EU climate policy pathways. Ecological Economics, 204(107660):1–15, 2023.

Martin Weitzman : Prices vs. quantities. The Review of Economic Studies, 41(4):477–491, October 1974.

Martin Weitzman : Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change. Review of Environmental Economics and Policy, 5(2):275–292, 2011.

Martin Weitzman : Tail-hedge discounting and the social cost of carbon. Journal of Economic Literature, 51(3):873–882, 2013.

Damian Whittard, Peter Bradley, Van Phan et Felix Ritchie : Working towards an environmentally sustainable and equitable future ? New evidence on green jobs from linked administrative data in the UK. Journal of Cleaner Production, 494(145025):1–32, 2025.

World Bank Group : China Climate and Development Report. The World Bank Group, October 2022.

World Economic Forum : The cost of inaction : A CEO guide for navigating climate risk. https://www.bcg.com/press/11december2024-climate-risk-cost-of-inaction, December 2024.

World Meteorogical Organization : WMO global annual to decadal climate update (2025-2029). https://wmo.int/sites/default/files/2025-05/WMO_GADCU_2025-2029_Final.pdf, May 2025.

Akio Yamazaki : Jobs and climate policy : Evidence from British Columbia's revenue-neutral carbon tax. Journal of Environmental Economics and Management, 83:197–216, 2017.

Shubo Yang, Atif Jahanger, Juan Hu et Ashar Awan : Impact of China's carbon emissions trading scheme on firm-level pollution abatement and employment : Evidence from a national panel dataset. Energy Economics, 136(107744):1–13, 2024.

Fujin Yi, Tianhao Zhou, Luyun Yu, Bruce McCarl, Yanjun Wang, Fei Jiang et Yafeng Wang : Outdoor heat stress and cognition : Effects on those over 40 years old in China. Weather and Climate Extremes, 32(100308):1–15, 2021.

Moises Yi, Steffen Mueller et Jens Stegmaier : Industry mix, local labor markets, and the incidence of trade shocks. Journal of Labor Economics, 42(3):837–875, July 2024.

Chi Man Yip : On the labor market consequences of environmental taxes. Journal of Environmental Economics and Management, 89:136–152, 2018.

Da-Jin Yu et Jin Li : Evaluating the employment effect of China's carbon emission trading policy : Based on the perspective of spatial spillover. Journal of Cleaner Production, 292(126052):1–13, 2021.

Haijun Zhang et Maosheng Duan : China's pilot emissions trading schemes and competitiveness : An empirical analysis of the provincial industrial sub-sectors. Journal of Environmental Management, 258(109997):1–8, 2020.

Haoran Zhang : Coal busts and urban recovery : Evidence from China. Regional Science and Urban Economics, 101(103921):1–14, 2023.

Peng Zhang, Olivier Deschenes, Kyle Meng et Junjie Zhang : Temperature effects on productivity and factor reallocation : Evidence from a half million chinese manufacturing plants. Journal of Environmental Economics and Management, 88:1–17, 2018.

Xin Zhang, Xi Chen et Xiaobo Zhang : Temperature and low-stakes cognitive performance. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 11(1):75–96, 2024.

Jingjing Zheng, Jiang He, Xuefeng Shao et Wei Liu : The employment effects of environmental regulation : Evidence from eleventh five-year plan in China. Journal of Environmental Management, 316(115197):1–13, 2022.

Trevor Zink et Roland Geyer : Circular economy rebound. Journal of Industrial Ecology, 21(3):593–602, 2017.